

Kapitel 8. Konstruktion, kalibrering og validering af den nationale vandressourcemodel (DK-model)

Hans Jørgen Henriksen, Lars Trolborg, Anker Lajer Højberg og Per Nyegaard, GEUS

Kapitel 8. Konstruktion, kalibrering og validering af den nationale vandressourcemodel (DK-model)	1
8.1 Kapitel sammenfatning.....	2
8.2 Formål og succékriterier for den Nationale Vandressource Model (DK-model).....	3
8.2.1 Formål med den Nationale Vandressource Model	3
8.2.2 Succeskriterier for den nationale vandressourcemodel	4
8.2.3 Øvrige anvendelser af DK-model i vandressourceforvaltningen.....	6
8.3 Metodik for konstruktion af national vandressourcemodel	7
8.3.1 Udfordringer ved opstilling af storskala model for hele landet	7
8.4 Tolkningsmetodik	8
8.4.1 Øerne (Fyn, Sjælland mm.)	8
8.4.2 Jylland	15
8.4.3 Bornholm	20
8.4.4 Diskussion af hvordan forskellige metoder forventes at påvirke slutresultatet i modellering.....	22
8.5 Sammenfatning vedr. konceptuel model for hele landet	25
8.6 Modelkode.....	26
8.6.1 DK-modellens rodzonemodul	28
8.7 Modelopstilling og parameterfastsættelse.....	31
8.8 Fastlæggelse af nøjagtighedskriterier	31
8.9 Kalibrerings- og valideringsmetodik for Sjælland og Fyn	35
8.10 Kalibrerings- og valideringsmetodik for Jylland	44
8.10.1 Observationsdata og kalibreringsmetodik for Jylland	44
8.10.2 Kalibrerings- og valideringsresultat for Jylland	48
8.11 Sammenligning af DK-model med Suså model.....	53
8.12 Validering i forhold til ældre data for Hovedstadsregionen.....	55
8.13 Betydning af konceptuel model for indvindingsoplande og opholdstider	56
8.14 Referencer	57

I kapitlet beskrives formål og succékriterier for projektet: National vandressourcemodel. Projektet blev iværksat i 1996 i en projektkontrakt med Miljø- og Energiministeriet. GEUS har forestået konstruktionen af den nationale vandressourcemodel, herunder opstilling, kalibrering og validering af modellen. Der er sideløbende hermed foregået en videreudvikling af det tilgrundliggende modelsystem (MIKE SHE/MIKE 11), foretaget af DHI i et særskilt projekt finansieret af Erhvervsfremmestyrelsen.

Modellen for Fyn er opstillet og rapporteret i 1997. De 3 delmodeller for Sjælland er rapporteret i 1998. Jyllandsmodellerne er rapporteret i 2002. Det har ikke været muligt at afslutte modellen for Bornholm indenfor projektets rammer og temarapportens tidsfrist.

I forbindelse med at der fremkom nye klimadata fra DMI midt i projektføreløbet, har det været nødvendigt at gentage modelcyklus 2-3 gange for samtlige deloplande. Det skyldes at der blev konstateret problemer med vandbalancen, som ikke gav konsistens. Disse problemer er omtalt i tidligere kapitler. Derfor var det nødvendigt at korrigere nettonedbøren, med dette krævede yderligere to inverse kalibreringer, og efterfølgende dynamiske valideringskørsler, før de på forhånd opstillede nøjagtighedskriterier i langt de fleste tilfælde kunne opfyldes.

Processen med opstilling af konceptuel model, modelopstilling, fastlæggelse af nøjagtighedskriterier, kalibrering, validering, simulering og usikkerhedsvurderinger er beskrevet i nærværende kapitel. Ligeledes er sammenligning med Suså model og validering i forhold til afsænkninger i Københavnsområdet beskrevet.

8.1 Kapitel sammenfatning

Der er opstillet en integreret grundvands- og overfladevandsmodel med 1x1 km grid for Danmark dækkende 43.000 km². Modellen består af et relativt simpelt rodzonemodul til beregning af nettonedbør og en detaljeret og omfattende tre-dimensional grundvandsmodel til simulering af grundvandsdannelse og trykniveau i forskellige geologiske lag. Modellen består af et relativt detaljeret overflademodul, der beskriver afstrømning i dræn og vandløb, herunder udveksling mellem grundvand og vandløb. Modellen er baseret på MIKE SHE / MIKE 11 modelsystemet og udnytter de fleste af de data der foreligger i de nationale databaser vedrørende geologi, jordarter, topografi, vandløbssystem, klima og hydrologi.

Konstruktionen af en hydrologisk model af DK-modellens kompleksitet, som indeholder så mange data om geologi, jordarter, arealanvendelse, topografi, vandløbssystem, oppumpning og klima, har været særdeles omfattende og udfordrende, fordi alle disse data ikke har været sammenstillet på denne måde før, og derfor ikke nødvendigvis indebærer gensidig konsistens. Formålet med et sådant modelstudie er at udvikle et værktøj til efterfølgende anvendelse i praktisk vandressourceforvaltning, i dette tilfælde til opgørelse af de udnyttelige grundvandsressourcer. En meget vigtig sidegevinst ved et sådant modelstudie er den mulighed som gennemførelsen af hele processen giver for en kvalitetssikring af de hydrologiske data og procesforståelse på stor skala. Der er også eksempler hvor arbejdet med modellen gav vigtig feed-back til problemer i den geologiske tolkning eller problemet med at få vandbalancen til at gå op (her var resultater fra DK-modellen medvirkende til at DJF, DMU, GEUS og DMI valgte at udarbejde nye anbefalinger til nedbør og fordampning, bl.a. baseret på Makkink i stedet for Penman, jf. kapitel 7).

Det endelige resultat af DK-modellen viser, at det har været muligt at konstruere en kombineret grundvands- og overfladevandsmodel med en horisontal maskevidde på 1 x 1 km², som giver pålidelige resultater med hensyn til simulering af trykniveau og afstrømning. Modellen er parat til operationel anvendelse, fx opgørelse af grundvandsdannelse til magasiner i forskellig dybde, samt vurdering af følgevirkninger af forskellige vandindvindingsstrategier på regional skala. Desuden er modellen et brugbart værktøj til analyse af klimaændringers indvirkning på de udnyttelige vandressourcer, herunder drikkevandsressourcer.

Det skal imidlertid understreges at modellen kun er dokumenteret anvendelig til simuleringer på regionalskala eller oplandsskala (> 50-100 km²). Skalaproblematikken medfører, at det ikke er muligt at benytte en storskala model som DK-modellen til simulering af lokal skala. Fx er det ikke muligt at benytte DK-modellen til vurdering af strømningsveje og opholdstider indenfor OSD områder.

Endnu resterer Bornholm, idet modellen er opstillet for Bornholm, men kalibrering og validering mangler.

Modellen for Sjælland opfylder som helhed de opstillede valideringskriterier, men en enkelt delmodel (Sydsjælland) har problemer med simulering af trykniveau i forhold til observationer. Modellerne for Østjylland og Nordjylland opfylder ikke kravet til simuleret afstrømning i forhold til observationer ved faste målestationer, men vurderes på trods heraf rimeligt pålidelige, idet beskrivelsen af grundvandsafstrømningen til vandløb, bl.a. minimumsafstrømning, er god.

Alle øvrige delmodeller opfylder de opstillede nøjagtighedskriterier i forhold til afvigelser mellem simuleret og målt trykniveau (udfra pejledata), afstrømning (udfra daglige værdier ved vandføringsmålestationer) og gennemsnitlige afstrømningsvolumener i vandløb.

Det er vurderet at en opfyldelse af valideringskriterierne i problemområderne vil kræve en revision af den konceptuelle model, evt. suppleret med forbedrede klima inputdata (fx 20 x 20 km grid).

De opstillede formål og succékriterier for den nationale vandressourcemodel og stort set opfyldte (eller forventes opfyldte i løbet af i 2003) med et PhD studie, MIKE SHE udvikling, publicering både i internationale tidsskrifter og faglig formidling til offentligheden, temamøder, nyhedsbreve, pejlestationsnet og integration af ressourceovervågning.

8.2 Formål og succékriterier for den Nationale Vandressource Model (DK-model)

8.2.1 Formål med den Nationale Vandressource Model

Den Nationale Vandressource Model (DK-model) blev iværksat i 1996 med henblik på kvantificering af vandressourcens størrelse og regionale og tidslige variation.

Der var behov for at få udviklet og etableret et landsdækkende system, der kobledes målinger af grundvandstanden fra det nationale pejlestationsnet og afstrømningsmålinger i vandløb med hydrologiske modelanalyser. Målet hermed var, på baggrund af input til modelsystemet i form af nedbør og fordampning, at kunne foretage en mere præcis kvantificering og overvågning af udviklingen i grundvandsressourcens aktuelle størrelse og regionale fordeling.

Integrering med den eksisterende overvågning af grundvandskvaliteten kunne ydermere give et væsentligt forbedret grundlag for vurdering af Danmarks samlede tilgængelige ferskvandsressource med hensyn til mængde og kvalitet.

Det er projektets (DK-modellens) overordnede formål *at udvikle og etablere en landsdækkende vandressource model som grundlag for at bestemme Danmarks samlede tilgængelige drikkevandsressource, herunder dennes tidsmæssige variation og regionale fordeling, samt vurdere den mulige fremtidige udvikling* (Henriksen, 2001).

Mere specifikt er formålene med projektet:

- At forstå processer og parametre der styrer grundvandsdannelsen, herunder udvikling af værktøjer til generering af inputdata til vandressourcemodellen på basis af satellitdata samt udvikling af forbedrede beregningsrutiner til kvantificering af den arealdistribuerede nedsivning til grundvandet
- At opbygge en national vandressourcemodel bestående af en 3-dimensional, dynamisk grundvandsmodel for Danmark. Dette giver mulighed for vurdering af ressourcens nuværende og fremtidige størrelse og fordeling samt mulighed for integrering af resourceovervågning i vandmiljøplanens overvågningsprogram med henblik på samlet vurdering af ferskvandsressourcens mængde, kvalitet og beskyttelse
- At reorganisere og effektivisere det nationale resource-overvågningsnet (pejlestationsnettet) på grundvand, herunder opbygning og implementering af systemer for dataopsamling og lagring, transmission og bearbejdning under anvendelse af tidssvarende teknologi
- At videreudvikle det tilgrundliggende modelsystem med rutiner og moduler, som er nødvendige i forbindelse med de særlige skalaforhold, krav til kvalitetsdokumentation, krav til opdatering og udveksling af modeldata samt nuværende og fremtidige behov i forbindelse med modellering af kvantitet, kvalitet og beskyttelse.

8.2.2 Succeskriterier for den nationale vandressourcemodel

Der var i projektkontrakten anført følgende succeskriterier (Henriksen, 2001):

Succeskriterie 1. PhD studie

Der er igangsat et PhD studium i maj 1999 om videnopbygning vedr. metoder til analyse af usikkerheden på modelsimuleret grundvandsdannelse til magasiner i forskellig dybde og med relevans i forhold til grundvandsbeskyttelse. Der fokuseres i dette studie på usikkerheden relateret til modelstruktur, konceptuel model og geologisk model. Der er udpeget to feltlokaliteter: Vårby å på Vestsjælland og Odense/Odense å på Fyn.

Kriteriet vurderes fuldt ud opfyldt med igangsættelse af PhD studie pr. maj 1999. Fokus er ændret fra satellitdata til grundvandsdannelse, geologisk model og datering men begrundes fortsat særdeles relevant jf. behov i forbindelse med zoneringsen.

Succeskriterie 2. MIKE SHE udvikling

Der er foretaget dels en udvikling på selve beregningskomponenterne i MIKE SHE, og dels udvikling af redskaber under og sideløbende med projektet (Geoeditor og GIS-baserede værktøjer) - DHI(2000). MIKE SHE modelkoden er blevet væsentligt bedre gennemtestet

og svagheder er blevet afhjulpet. Kriteriet vurderes fuldt ud opfyldt som følge af at der er opnået medfinansiering fra Erhvervsfremmestyrelsen til MIKE SHE udvikling.

Succeskriterie 3. Publicering

Resultaterne fra projektet publiceres i anerkendte, internationale tidsskrifter under projektforsøget og i forbindelse med dets afslutning. Derudover påregnes et antal populærartikler publiceret i danske tidsskrifter (danskVAND, Vand & Jord). Der arbejdes målrettet med som minimum 3 artikler til internationale tidsskrifter:

- *Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark (Henriksen et al., JHydrol 2526). Publiceres i Journal of Hydrology i 2003 (Hydrol 6886)*
- *Transient modeling of regional ground water flow using parameter estimates from steady-state automatic calibration (Sonnenborg et al., 2003). Publiceret i Journal of Hydrology 273 (2003) 188-204.*
- *Capture zone, travel time and solute transport predictions using inverse modeling and different geological models (Bill Harrar et al., 2003). Godkendt til publicering i Hydrogeology Journal i januar 2003.*
- *Application of a national hydrological model for water resources predictions in Denmark (med fokus på vurdering af udnyttelig ressource). Påbegyndes i 2003.*

Dette kriterium forventes opfyldt ved mindst 3 publicerede artikler. Formidling overfor brugere og offentlighed har været god bl.a. i kraft af den etablerede hjemmeside. En bredere formidling overfor offentligheden gennemføres, når temarapporten er afsluttet 1. maj 2003. Her går projektet over i en driftsfase og behov for adgang til DK-modellens database og ydelser fx over Internettet skal afklares med amter og øvrige interessenter. Dette vil bl.a. ske ved drøftelser med amterne.

Succeskriterie 4. Temamøder

Dette kriterium vurderes opfyldt. Der har været afholdt adskillige temamøder hvor DK-modellen har været præsenteret. Der blev afholdt midtvejsevaluering i 1999 og der afholdtes et DVK temamøde om udkast til temarapporten (maj 2002). Det kan eventuelt overvejes at arrangere et slutseminar når modellen er opstillet for hele landet og når der foreligger resultater af simuleringer af den udnyttelige vandressource i forbindelse med temarapporten, hvor fremlægning og drøftelse i en bredere kreds kan være nyttig.

Succeskriterie 5. Kvartårligt nyhedsbrev

Er stort set opfyldt som følge af den løbende opdatering af hjemmesiden "vandmodel.dk". Det overvejes hvordan muligheder for udtræk fra DK-model kan implementeres så geologisk model, nettonedbør, grundvandspotentialer, vandløbsafstrømning og grundvandsdannelse til magasiner i forskellig dybde vil kunne udtrækkes på en tidssvarende facon.

Succeskriterie 6. Pejlestationsnet / IT

Etableringen af 10 on-line pejlestationer og ca. 35 datalogger stationer samt yderligere pejlestationer i amternes regionale pejlestationsnet med en samling af samtlige peyledata i Jupiter databasen giver mulighed for løbende overvågning og overblik over grundvandsstandens regionale og tidlige variationer på landsplan. *Er delvist opfyldt. Der er ikke opnået medfinansiering fra Forskningsministeriets programmidler vedr. IT. I stedet er opnået en medfinansiering fra GEUS til etablering af 10 on-line pejlestationer.*

Succeskriterie 7. Ressourceovervågning

I forbindelse med revisionen af Vandmiljøplanens overvågningsprogram er det målet at integrere ressourceovervågningen med den eksisterende kvalitetsovervågning, således at der kan opnås et bedre billede af den tilgængelige og udnyttelige ferskvandsressources tilstand. *Dette kriterium er endnu ikke opfyldt, men der er muligheder for i forbindelse med revision af VMP III at komme nærmere en opfyldelse af kriteriet. Der arbejdes på at optage ressourceovervågningen i NOVANA programmet for at opfylde Vandrammedirektivet.*

8.2.3 Øvrige anvendelser af DK-model i vandressourceforvaltningen

DK-modellen udgør i dag en værdifuld "referenceramme" for opstillingen af lokale og mere detaljerede modeller i forbindelse med zoner og detailkortlægning af grundvandsressourcen (eksempler herpå fra en række områder bl.a. Svendborg, Nyborg, Odense, Vårby å, Tude å, Tølløse, Bjergsted, Suså, Falster, Stevn, Roskilde Amt, Københavns Amt og Sønderø området).

Lokalmodeller har givet ny viden om opholdstider i grundvand og til overfladevand. Resultaterne viser at effekten af fx Vandmiljøplanen bliver forsinket i op til flere år i overfladevandssystemet og op til flere årtier i de dybe grundvandssystemer. Denne konklusion understøttes for det dybe grundvands vedkommende af aldersdateringer (Henriksen et al., 2001), samt af resultaterne fra grundvandsovervågningsprogrammet, GEUS (2002).

Det andet problem er at klimatiske variationer i form af forskelle fra det ene år til det andet i nedbør og vintertemperatur medfører meget store naturlige variationer i nitratudvaskningen. Disse variationer vil ofte være større end den ønskede effekt af Vandmiljøplanen, fordi datagrundlaget indeholder de store klimatiske betingede naturlige variationer, der i denne sammenhæng optræder som "støjkilde" (Henriksen et al., 2001).

Endelig er der i forbindelse med arbejdet med DK-modellen påvist usikkerheder på opstillede vandbalancer for LOOP områder, som det er vigtigt at få belyst nærmere. Disse udgør grundlaget for opstillede kvælstofbalancer for ler- og sandjordsoplande (Refsgaard et al., 2001; Plauborg et al., 2002; DVK, 2002). Der er behov for at arbejde videre med en mere detaljeret beskrivelse af udvaskningen fra rodzonen ved forskellige landbrugspraksis og gødningsanvendelser, og koble fx Daisy eller andre modeller på DK-modellen. Dette er påbegyndt med et PhD studie i 2003 i Hydrologisk Afdeling.

DK-modellen vil kunne udgøre kernen i et konsekvensberegningværktøj til beskrivelse af kvælstofpåvirkningen af grundvand og overfladevand, som følge af landbrugspraksis, gødningstilførsel og klimatiske variationer på stor skala.

8.3 Metodik for konstruktion af national vandressourcemodel

Der er konstrueret en integreret grundvands / overfladevandsmodel for hele landet dækkende 43.000 km². Modellen er baseret på et 1 km² beregningsnet, hvor nettonedbøren er beregnet med et simpelt rodzonemodul, grundvandsstrømningen er beregnet med en relativ detaljeret 3D grundvandskomponent, som beskriver grundvandsdannelse og trykniveau i forskellige geologiske lag og en vandløbskomponent, som definerer afstrømning i vandløb og beskriver udveksling mellem grundvand og vandløb. Modellen er baseret på MIKE SHE systemet med udnyttelse af omfattende databaser for geologi, jordart, topografi, vandløbssystem, klima og hydrologi.

8.3.1 Udfordringer ved opstilling af storskala model for hele landet

En storskala modellering med dynamisk simulering af vandløbsafstrømning for oplande ca. 50.000 km² er tidligere blevet udført i forskellige studier (Refsgaard, 2001). Disse studier inkluderede imidlertid ikke simulering af grundvandssystemet i en detaljeringsgrad som benyttet i DK-model. Baseflow blev i disse studier håndteret ved "lineære reservoirer".

Grundvandsmodellering af hydraulisk tryk og strømning for store oplande er blevet udført af forskellige forskere (D'Agnese et al., 1999; South Florida Management District, 1997; de Lange, 1996). Disse modeller var dog alle baseret på antagelse om stationaritet og inkluderede ikke overfladevands processer.

Dynamisk og integreret grundvands/overfladevands modellering er tidligere blevet udført, men kun for mindre områder (Refsgaard et al., 1998). Der er derfor nogen særlige videnskabelig og modeltekniske udfordringer ved gennemførelse af et projekt som DK-modellen:

- En rumlig distribueret fysisk baseret model som indeholder en integreret beskrivelse af både overfladevand og grundvand kræver en stor mængde data for at opnå troværdige simuleringer. Opstilling af en sådan model forudsætter derfor en konsekvent metodik for fastsættelse af parameterværdier ud fra feltdata i eksisterende databaser.
- Det er på forhånd ikke helt klart hvilken metodik der skal anvendes til kalibrering af en sådan model. Invers modellering har haft udbredt anvendelse både indenfor dynamisk overfladevandsmodellering og stationær grundvandsmodellering (Gupta et al., 1998; Madsen, 2000). For en integreret, storskala model som DK-modellen, har invers modellering ikke tidligere været benyttet og det er ikke helt afklaret, hvorvidt denne metodik er fordelagtig i denne kontekst.

En model af denne type simulerer basalt set de vigtigste processer af det hydrologiske kredsløbs landfase. Det giver imidlertid ikke nogen garanti for at modellen også giver en pålidelig og nøjagtig simulering af alle processer i kredsløbet. Modellen ser ud til at kunne simulere aggregerede processer korrekt, f.eks. afstrømning fra oplandet eller trykniveau i givne punkter, så er der ikke hermed noget bevis for at de underliggende processer bliver simuleret med den samme nøjagtighed. Det er derfor helt afgørende nødvendigt at fastlægge og anvende systematiske valideringstests, så modellens troværdighed og begrænsninger for modellen kan dokumenteres.

8.4 Tolkningsmetodik

Formålet med den konceptuelle model er at opstille en tolkningsmodel, dvs. en arbejdshypotese for hvordan strømmingen i grundvandssystemet foregår. Den hydrogeologiske tolkningsmodel er derfor **ikke** en sædvanlig geologisk/stratigrafisk model, men derimod en opdeling af geologien på grundlag af vandførende egenskaber.

Opsætningen af de hydrogeologiske tolkningsmodeller til DK-modellen har gennem forløbet gennemgået en udvikling fra at være 'håndkraft'-styret til at blive digitalt interaktivt.

Opsætningen af de hydrogeologiske modeller er i høj grad styret af, at modellen skal dække et stort område – f.eks. Fyn eller Sjælland, samt af hvilken grid/maskestørrelse som skal benyttes i strømningsmodellen. Da områderne er store, findes der mange tusinde borer, som evt. kan benyttes under tolkningen. Det har derfor ikke været muligt at benytte samme metoder til tolkningen, som anvendes til mindre modelområder.

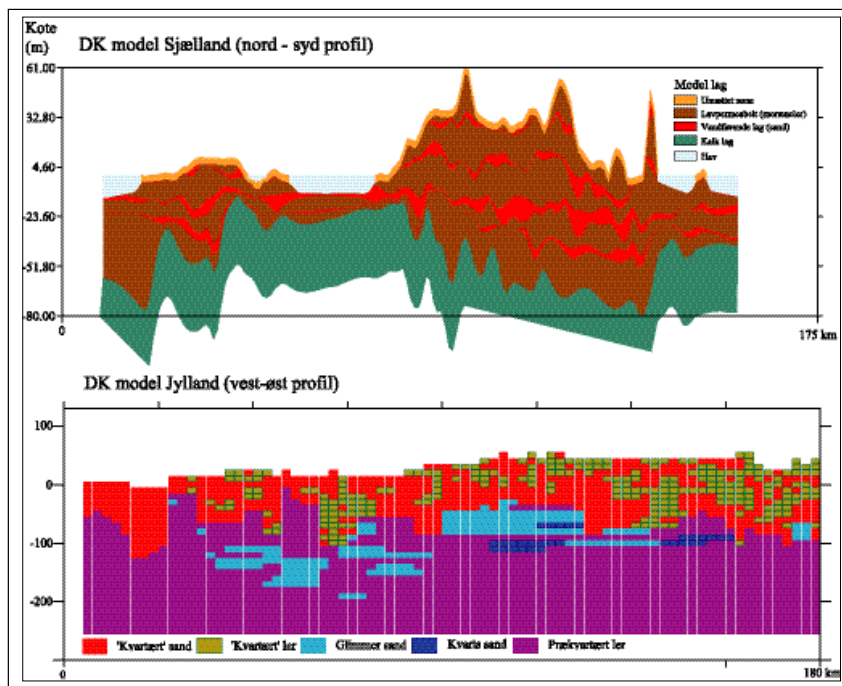
Dette har resulteret i to typer af hydrogeologiske modeller – en 'lagkage'-model hvor alle lag er gennemgående men med varierende tykkelse, og en 'kasse'-model hvor kasserne har en fast størrelse. Lagkagemodellen er benyttet for Øerne, medens kassemodellen er benyttet for Jylland og Bornholm. Modelopsætningen er nærmere beskrevet i det følgende (se også www.vandmodel.dk).

8.4.1 Øerne (Fyn, Sjælland mm.)

Opsætning af de hydrogeologiske modeller for Øerne er baseret på de geologiske basisdatakort (1:50.000) og på udtræk af data fra GEUS's boringsdatabase ZEUS/JUPITER. Ud fra lagdata er der udtegnet V-Ø profiler med henblik på at opnå den første opfattelse af udbredelsen af de vandførende lag og af deres antal, samt af forløbet af den prækvartære overflade og dens sammensætning. Ud fra basisdatakort er derpå fordelingen af borerne filterintervallerne undersøgt for at give indblik i de betydende vandførende sandlags fordeling inden for model området (Fyn). Desuden er der lavet histogrammer over fordelingen af filtre i forhold til kote 0 for alle atlasblade (Sjælland), hvorved de vigtigste indvindingsniveauer i sandmagasinerne illustreres. Kalkboringerne er generelt ikke filtersatte. Ud fra disse oplysninger samt tidligere hydrogeologiske undersøgelser er der opstillet en hydrogeologisk tolkningsmodel eller en såkaldt konceptuel model.

Fyn var det første område for hvilket der blev opstillet en tolkningsmodel. Den blev opstillet som en konceptuel model med tre sandlag – primært smeltevandssand og –grus, 4 lerlag – primært moræneler og 2 prækvartære lag af ler fra Paleocæn/Eocæn og Danien kalk. Det øverste sandlag har kun en sekundær betydning for vandindvindingen, og vandindvinding fra kalken foregår primært på den østlige del af Fyn.

Den hydrogeologiske tolkningsmodel for Sjælland, Lolland-Falser og Møn er opbygget efter samme mønster, dog er der tilføjet et ekstra sandlag og et lerlag, som hovedsagligt forekommer i de dybere dele af de prækvartære dalstrukturerne – Alnap og Søndersø dalene. De prækvartære vandførende aflejringer består her af kalksten fra Kridt (Lolland-Falster, Møn og Sydsjælland) og Danien (Nordsjælland og Stevns) og glaukonitholdigt sand og kalksten fra Paleocæn (Midtsjælland). De prækvartære lerede aflejringer består hovedsageligt af ler og mergel fra Paleocæn og fedt ler fra Eocæn og findes primært i Vestsjælland og på Sydlolland.



Figur 8.1 Metodik for opstilling af konceptuel model for Øerne og Jylland/Bornholm

Efter disse indledende forberedelser er hydrogeologien tolket. Der er her taget hensyn til formålet med strømningsmodellen og den gridstørrelse den foretager beregner på – 1x1 km². Desuden er der taget hensyn til tidsfaktoren, samt til antallet af borer.

Det mest hensigtsmæssige ville have været, hvis hver boring blev tolket i forhold til den hydrogeologiske tolkningsmodel, men dette var ikke muligt på grund af de mange borer og det forhold at tolkningen blev foretaget 'i hånden'.

Det er derfor valgt at gennemføre tolkningen på grundlag af de eksisterende geologiske basisdatakort (cirkeldiagramkort). Ud fra UTM-nettet er området opdelt i et 2x2 km net og i midten af hver kvadrat er der indsat en fiktiv boring, som er tolket ud fra den konceptuelle model og primært fra de borer der ligger inden for kvadratet.

Hvis der ingen borer findes i kvadratet er de omkringliggende borer benyttet. Da det ikke er alle borer, som er vist på basisdatakortene, vil der nødvendigvis ske et datatab under tolkningen.

Tolkningen er derpå skrevet ind i en datafil med oplysninger om sandlagenes topkote og tykkelse, samt med oplysninger om topkoten af de prækvartære lag og topkoten for de vandførende prækvartære lag. Hvor der foreligger boringsoplysninger inden for kvadratet er kote og tykkelse angivet som heltal, og hvor der er 'gættet' er der brugt decimaltal.

Da alle lag skal være gennemgående er der anvendt en tykkelse på 0.3/0.1 m hvor lagene ikke ses i boringerne. Endelig er oplysninger fra PC-ZEUS anvendt til kvalitetssikring og til analyse af sandlinser i lerlagene, der efterfølgende er implementeret sammen med den glacialtektoniske variabilitet.

Efter tolkningen er data importeret som punkter til en database (SAS[®]), samt importeret i MIKE SHE hvorfra der slutlig er dannet T2-datafiler med de geologiske lag til grundvandsmodellen.

Den numeriske grundvandsmodel for Sjælland indeholder følgende 11 hydrostratigrafiske enheder (se figur 8.1):

- I landområder er modellens øverste lag 3.5 meter tykt og udgør den umættede zone samt den øverste del af den mættede zone. Laget regnes for opsprækket og relativt vandførende.
- Et forholdsvist lavpermabelt lag bestående hovedsagelig af moræneler og evt. lidt sen- og postglaciale lerede aflejringer. Laget er det øverste lerlag og findes især i områder med topografi over ca. 50 meter.
- Et vandførende lag eller snarere linser af smeltevandssand og grus, som udgør sekundære lokale magasiner. Laget, som er det øverste sandlag, ligger omkring kote 30 til 50 meter og har begrænset udstrækning (se figur 8.2).
- Et lavpermabelt lerlag bestående hovedsageligt af moræneler evt. også smeltevandsler og -silt. Laget er dæklag til de primære smeltevandssandsmagasiner.
- Et vandførende lag af smeltevandssand og -grus. Laget er det regionale primære øvre magasin og har en relativ stor udstrækning med lagtykkelser over 10 meter i mange områder, især i Midt- og Nordsjælland. Laget findes ofte omkring kote 0 til -15 meter.
- Et lavpermabelt lerlag bestående hovedsageligt af moræneler evt. også smeltevandsler og -silt. Laget adskiller de regionale primære øvre smeltevandssandsmagasiner fra dybere liggende magasiner.
- Et vandførende lag af smeltevandssand og -grus, som udgør et regionalt nedre primært magasin. Laget har relativ stor udstrækning og har tykkelser over 10 meter i mange områder, især i Nord- og Vestsjælland samt på Lolland. Laget mangler dog, hvor de prækvartære aflejringer ligger højt som på Østsjælland og på Møn. Laget findes ofte omkring kote -20 til -35 meter.
- Et lavpermabelt lerlag bestående hovedsageligt af moræneler evt. også smeltevandsler og -silt. Laget adskiller de regionale primære øvre smeltevandssandsmagasiner fra et dybtliggende magasin. Laget mangler i nogle områder (Nordsjælland), hvor der derfor er hydraulisk kontakt mellem de kvartære sandmagasiner.
- Et vandførende lag af smeltevandssand og grus, som et dybtliggende nedre primært magasin, der især findes i dybe sænkninger i den prækvartære overflade som i Nordsjælland og på Lolland samt i mindre udstrækning i Vestsjælland. Laget findes ofte dybere end kote -45 meter.
- Et lavpermabelt lerlag bestående hovedsageligt af Kvartær ler og silt samt prækvartære lerede aflejringer (Palæocæn og Eocæn ler). Laget adskiller de kvartære smeltevandssandsmagasiner fra de prækvartære magasiner. I en del områder findes laget ikke og der er derfor hydraulisk kontakt mellem det overliggende kvartære sand og de prækvartære vandførende aflejringer.
- Vandførende prækvartære kalkaflejringer fra Danien og Kridt samt Danien grønsandsaflejringer.
- Impermeabel bund i modellen antages at ligge 50 meter under top af prækvartære vandførende magasin

Figur 8.1 viser hydrogeologien for et tværsnit gennem Sjælland. Lerlagene i de lavpermeable hydrostratigrafiske enheder (1, 2, 4, 6, 8 og 10), består overvejende af moræneler. I visse områder indgår desuden interglaciale, senglaciale og postglaciale ferskvandsler, samt interglaciale saltvandsler i disse enheder og for lag 10 desuden Lillebæltssler, Røsnæsler, paleocænt ler og mergel.

For lavpermeable lag er den vertikale hydrauliske ledningsevne den vigtigste parameter, hvorimod den horisontale ledningsevne har mindre betydning. Den vertikale hydrauliske ledningsevne afhænger bl.a. af forekomsten af sprækker og sandvinduer. Da udbredelsen af sprækker og sandvinduer imidlertid ikke kendes i detaljer, er det i DK-modellen antaget at lag 2, 4, 6, 8 og 10 har samme horisontale og vertikale hydrauliske ledningsevne. Vandudvekslingens størrelse mellem et øvre og et dybere vandførende lag antages således omvendt proportional med tykkelsen af det lavpermeable lag ved en given trykniveau for

skel. Der er ikke taget hensyn til, at smeltevandsler har en lavere hydraulisk ledningsevne end f.eks. moræneler eller at visse sekvenser af moræneler kan være mere lavpermeable end andre.

Den øverste del af moræneleren kan inddeles i følgende 'sprækkezoner':

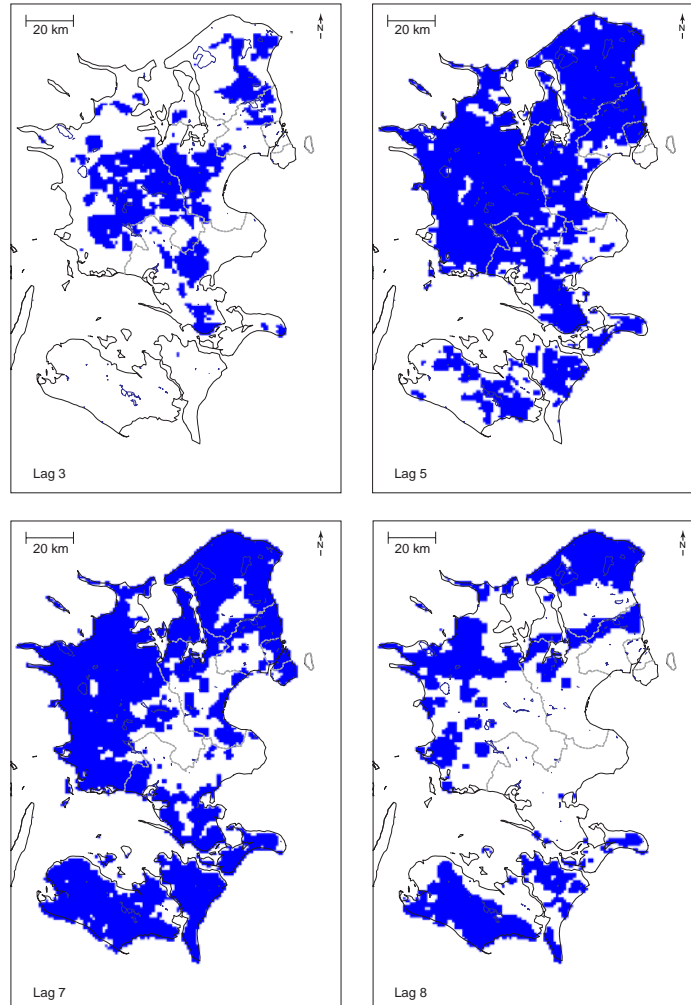
- de øverste 0-1.5 meter under terræn, hvor moræneleren er meget opsprækket som følge af udtørring, ormehuller, gravegange, rodhuller etc.
- fra ca. 1.5 meter under terræn til grundvandsspejlet (eller evt. et sandlag, hvis dette ligger højere), hvor der som oftest vil optræde udtørringssprækker og i 'belastet moræneler' sandsynligvis tektoniske sprækker forårsaget af isens tryk på underlaget
- under grundvandsspejlet vil der ofte optræde tektoniske sprækker og i enkelte tilfælde fossile udtørringssprækker som følge af tidligere tørre klimaperioder (for bl.a. ca. 8500 år siden). De tektoniske sprækker har traditionelt en større hydraulisk ledningsevne i denne dybde og kan gennemsætte moræneleret til større dybde
- i områder præget af neotektonik f.eks. saltdomer og forkastningszoner (f.eks. Carlsberg forkastningen i København) er moræneleren ofte gennemsat af sprækker

Kortlægning af sprækker forudsætter detaljerede undersøgelser og kan ikke vurderes alene ud fra boringsdata. Det er derfor i DK-modellen antaget, at de øverste 3.5 m har en relativ høj hydraulisk ledningsevne, mens de dybere lerlag har en lavere værdi.

Modellernes sandlag (lag 3, 5, 7 og 9) består overvejende af smeltevandssand og -grus. Med den givne maskevidde på 1x1 km antages det, at transmissivitetstværdier baseret på målinger, f.eks. angivet som specifik ydelse i GEUS's borearkiv, ikke er repræsentative for de kvartære aflejringer. De kan derfor ikke umiddelbart ved interpolation benyttes til en horisontal distribuering af den hydrauliske ledningsevne. I stedet antages den hydrauliske ledningsevne for enhederne at være konstant. Denne kraftige simplificering medfører, at variationen i transmissiviteten udelukkende afhænger af tykkelsen af det vandførende lag.

De vandførende enheder falder typisk sammen med grundvandsmagasiner kortlagt af amterne på Sjælland og kan i disse områder have en betydelig tykkelse på 15-30 meter. Udbredelsen af de vandførende lag er vist i nedenfor i Figur 8.2. I områder, hvor der ikke er truffet lokale magasiner antages en beregningsmæssig tykkelse af de vandførende magasiner på 0.1 m, jf. at beregningsmodellen forudsætter en 'lagkage-geologi'.

For kridt/danienkalk/grønsandskalk antages det, at den beregningsmæssige tykkelse af den vandførende del er på 50 meter. Transmissiviteten for dette lag, modsat alle andre hydrostratigrafiske enheder, er distribueret. Transmissivitetfordelingen er interpoleret (kri-
ging) ud fra estimeret semivariogram, som er baseret på udvalgte observationer af hydrauliske ledningsevner, som igen er baseret på observationer af specifik ydelse.



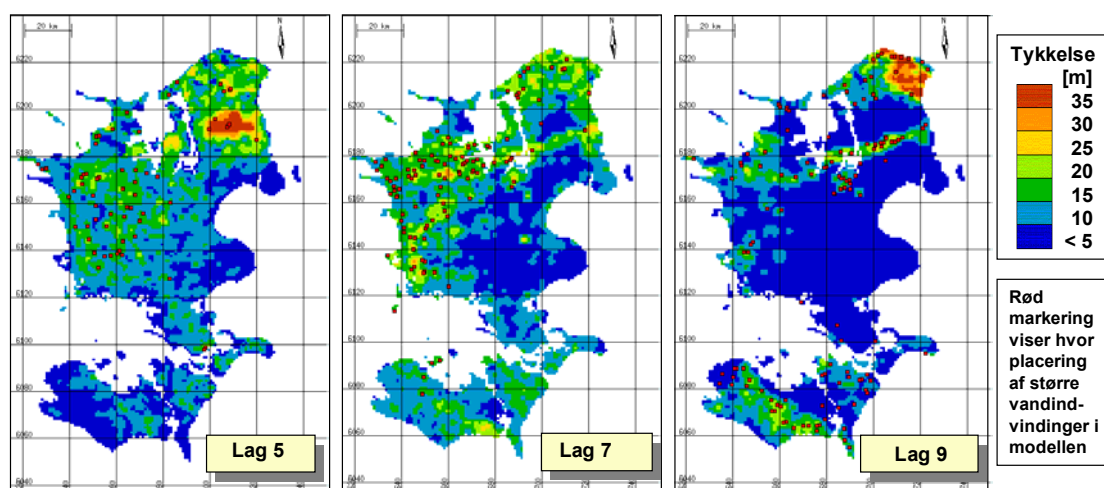
Figur 8.2 Udbredelsen af vandførende lag (områder med vandførende lag tykkere end 1 m vist med mørkt)

Beregningslag for Øerne

Bunden af det øverste lag i modellen er i landområder fastsat til en dybde på 3.5 m under modeltop. I havområder er tykkelsen af det øverste lag fastlagt ved vanddybden.

Inddata til den geologiske model består af tolket topkote og tykkelse for de 4 smeltevands-sandlag (lag 3, 5, 7 og 9) i den hydrostratigrafiske model. Desuden indgår topkoter for den vandførende del af kalken (lag 11) samt kalkens tykkelse, som er sat til 50 meter. Tykkelsen af de mest vandførende lag (lag 5, 7 og 9) er vist nedenfor (Figur 8.3) sammen med oplysninger om placering af større vandindvindinger. Toppen af beregningslag 3 (svarende til lag 5 i den hydrostratigrafiske model) er i øvrigt det niveau der jf. kapitel 3 er udvalgt til indikatorer for grundvandsdannelsen (for Fyn og Sjælland).

På baggrund af oplysninger i JUPITER er de enkelte geologiske lag analyseret i forhold til indholdet af sand eller ler i de enkelte borer, således at der ud fra sandprocenten er implementerede linser, hvor de lavpermeable lag er antaget at være mere permeable som følge af sandvinduer. For Vestjylland er der desuden implementeret tektoniklinser.



Figur 8.3 Tykkelse af vandførende lag (lag 5, 7 og 9)

Den anvendte topografi er baseret på Kort & Matrikelstyrelsens digitale 50 m grid. Dette datagrundlag er behæftet med nogen usikkerhed som følge af interpolationsrutiner.

Randbetingelser for Øerne

I havområder udgør modellens øverste lag havet og har derfor en tykkelse som vanddybden. Laget antages at have meget høj hydraulisk ledningsevne, hvilket fører til, at trykniveauet fastholdes på havniveau.

Drænvandsafstrømning, som den er repræsenteret i modellerne, dækker såvel kunstig afdræning som naturlig afdræning. Et detaljeret kendskab til drænsystemer for større dele af Danmark findes ikke på let tilgængelig elektronisk form. Det er derfor nødvendigt at indføre betydelige simplificeringer i beskrivelsen af drænafstrømningen.

Drænafstrømning beskrives i modellerne ved et niveau for drændybden og en tidskonstant for afdræning af vand ud af elementet. Der anvendes for hovedparten af modellen en drændybde på 0.5 meter under terræn. I områder med terræn meget tæt på havniveau er drændybden reduceret til 0.1 meter. Tidskonstanten for dræn er typisk i størrelsesordenen $1e^{-6}$ til $1e^{-8} s^{-1}$ og afhænger bl.a. af modelskalaen.

På grundlag af analyser med DK-modellen for Fyn blev det konkluderet, at beskrivelsen af udvekslingen mellem grundvand og overfladevand forbedres væsentligt ved indførslen af distribuerede lækagekoefficienter under vandløb. I undersøgelserne for Fyn blev distribueringen af lækagekoefficienten baseret på medianminimumafstrømningen, der under danske forhold er et godt mål for grundvandsafstrømningen til vandløb (baseflow).

For Fyn blev vandløbene inddelt i tre klasser på grundlag af median minimum afstrømning per løbende km vandløb. De tre klasser var følgende:

- Vandløbsområder med lille baseflow (< 1 l/s/km), der overlejrer leret till. Disse blev tildelt en lækagekoefficient på $2e^{-10}s^{-1}$
- Vandløbsområder med moderat baseflow (1-7 l/s/km), der overlejrer en blanding af leret till og sand. Disse blev tildelt en lækagekoefficient på $2e^{-8}s^{-1}$
- Vandløbsområder med stor baseflow (> 7 l/s/km). Disse blev tildelt lækagekoefficient på $1e^{-7}s^{-1}$

Sjælland er imidlertid i langt højere grad end Fyn påvirket af grundvandsindvinding og medianminimumafstrømningen er derfor på dele af Sjælland en mindre god indikator for den naturlige mængde baseflow og dermed kontakten mellem grundvandsmagasiner og de enkelte vandløbsstrækninger.

For modellerne for Sjælland er distribueringen af lækagekoefficienten for vandløbsbunden derfor baseret på et andet princip, i hvilket det antages at udstrømningen af grundvand til vandløb afhænger af hvorvidt et regionalt vandførende lag (i de fleste områder lag 3 eller 5, men enkelte steder lag 7 eller 9) står i direkte kontakt med vandløb, hvilket vil sige at tykkelsen af øvrige lavpermeable jordlag er minimal.

Der blev derfor anvendt en anden metode hvor tykkelsen af jordlag over toppen af det øverstbeliggende vandførende lag (lag 3, 5, 7 eller 9) blev vurderet, under forudsætning af at det pågældende vandførende lag havde en tykkelse på mindst 1 meter. Det vil sige, at der først blev foretaget en analyse af hvilket lag (lag 3, 4, 7 eller 9) som skulle regnes at være det primære lag med hensyn til vandudvekslingen mellem grundvand og overflade vand, og at det efterfølgende blev vurderet om dette lag havde direkte kontakt til vandløb. Hvor dette var tilfældet blev der anvendt en lækagekoefficient for vandløbsbunden på $1e^{-7}s^{-1}$, hvorimod der for vandløbsstrækninger med mellemliggende lerlag (evt. tynde sandlag) blev anvendt en lækagekoefficient for vandløbsbunden på $5e^{-10}s^{-1}$.

8.4.2 Jylland

For Jylland er valgt et andet koncept for den hydrologiske tolkningsmodel. Dette skyldes primært, at udbredelsen af de Miocæne aflejringer er for irregulær til opdeling i gennemgående lag gældende for den store del af Jylland, hvor der findes aflejringer fra Miocæn. Det har derfor været nødvendigt at opbygge en anden brugbar metode til tolkningen (se figur 8.1).

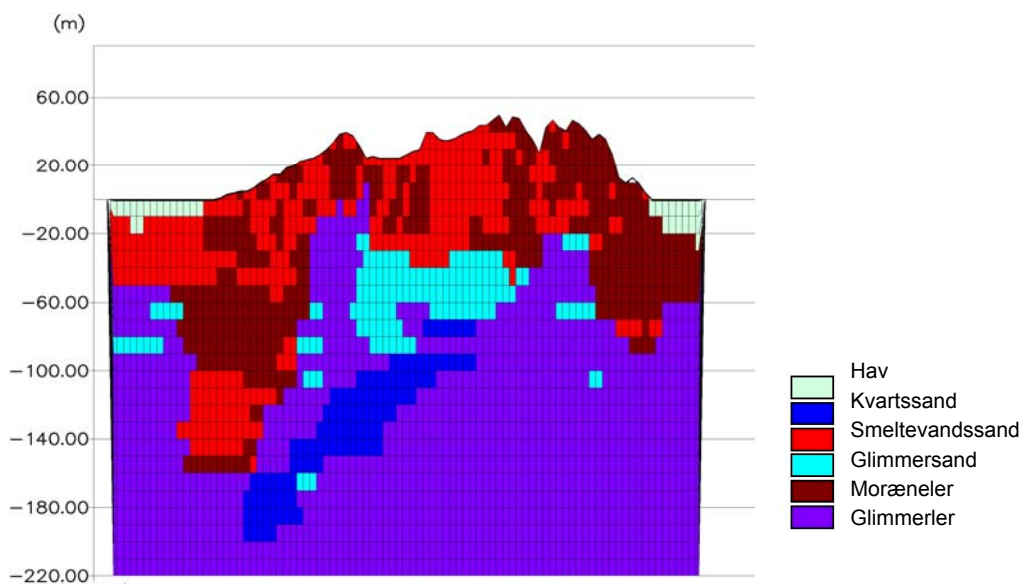
Det er derfor valgt at benytte en metode, hvor geologien bliver tolket i kasser på 1000x1000x10 meter. Som for Øerne opstilles først en hydrogeologisk tolkningsmodel. Derpå trækkes de geologiske laggrænser ud af boringsdatabasen ZEUS/JUPITER. Derpå foretages der en databehandling, hvor hver boring opdeles i 10 meter sektioner ud fra koten, hvor den dominerende geologi (>50%) kodes. Denne datafil indeholder således punktoplysninger om geologien i 10 meter sektioner, hvor sammensætningen af sedimenterne er opdelt i 10 klasser: *Kvartær ler* (primært moræneler, men også smeltevandsler og –silt, interglacialt marint ler og postglacialt ler og silt), *kvartær sand* (primært smeltevandssand og –grus, samt interglacialt sand og postglacialt sand og grus), *Miocæn kvartæssand*, *Miocæn glimmersand*, *prækvartær ler* (primært glimmerler og –silt fra Miocæn og Oligocæn,

samt Eocæn ler og moler og Paleocæn ler) og *kalk* fra Danien og Kridt, *salt* fra Perm samt udefineret *sand*, *ler* eller *andet* (fyld, brønd, ubeskrevet eller ingen dominerende sediment type).

Sønderjylland omtales i det følgende som et eksempel på tolkningen for Jylland. Geologien er tolket i 10 m's lag fra -220 - +90 mDNN med en gridstørrelse på 1x1 km. Tolkningen er baseret på data fra alle de boringer (både vandforsynings- og olieboringer) der ligger i JUPITER (tidligere ZEUS) databasen samt en fortolkning af den geologiske dannelseshistorie i området. Ved tolkningen er anvendt en inddeling af geologien i 5 forskellige jordtyper med hver sin kode (fremgår af skemaet nedenfor); hvis et grid antages at indeholde mere end 50% kvartssand får griddet således betegnelse af kvartssand.

Jordkode	Farve	Jordbetegnelse	Kommentarer
1	rød	smeltevandssand	kvartær og postglacialt sand og grus
2	brun	ler (moræne ler)	glacialt, interglacialt og postglacialt ler og silt
3	blå	kvartssand	miocæn, mellem til grovkornet sand og grus
4	lyseblå	glimmersand	miocæn, fin til mellemkornet sand
5	violet	glimmersilt/ler	inkl. andet prækvartær ler og silt

På figur 8.4 er geologien vist i et snit (vest-øst) gennem Sønderjylland.



Figur 8.4: Geologisk snit (vest-øst) gennem Sønderjylland ($Y_{UTM} = 6120000$ m).

Repræsentationen af geologien i modellen adskiller sig således markant fra de geologiske modeller, der er anvendt for Sjælland og Fyn, idet der i DK-modellen for Jylland ikke anvendes en tolkning af geologien i linser og gennemgående lag. Anvendelse af det geologiske database system for DK-model Jylland giver mulighed for en mere detaljeret beskrivelse af geologien horisontalt.

Efter databehandlingen er data importeret som punkter i ARCVIEW, hvor geologien er tolket interaktivt i 1000x1000 meter polygoner. De enkelte polygoner er tolket ud fra de geologiske koder der er tilskrevet borerne. Til støtte for tolkninger er anvendt geologiske GIS temaer, så som det kvartære overfladekort, kort med de prækvartære højdeforhold samt det prækvartære kort. Desuden er benyttet forskellige topografiske temaer. Hele Jylland er ikke blevet tolket på en gang, men der er foretaget en opdeling i mindre områder af tekniske årsager.

Beregningslag for Jylland

De øverste 3-5 beregningslag for Jyllandsmodellen har varierende tykkelse. Det øverste lag er fastlagt med bund ca. 2 meter under grundvandsspejlet. Herefter er de næste lag nogenlunde ligeligt inddelt indtil en dybde på kote -10 m, hvorefter der anvendes horisontale beregningslag. I de dybere lag kan tykkelsen være større, set tabel 8.1. Inddelingen er afpasset i geologiske forhold i hvert område.

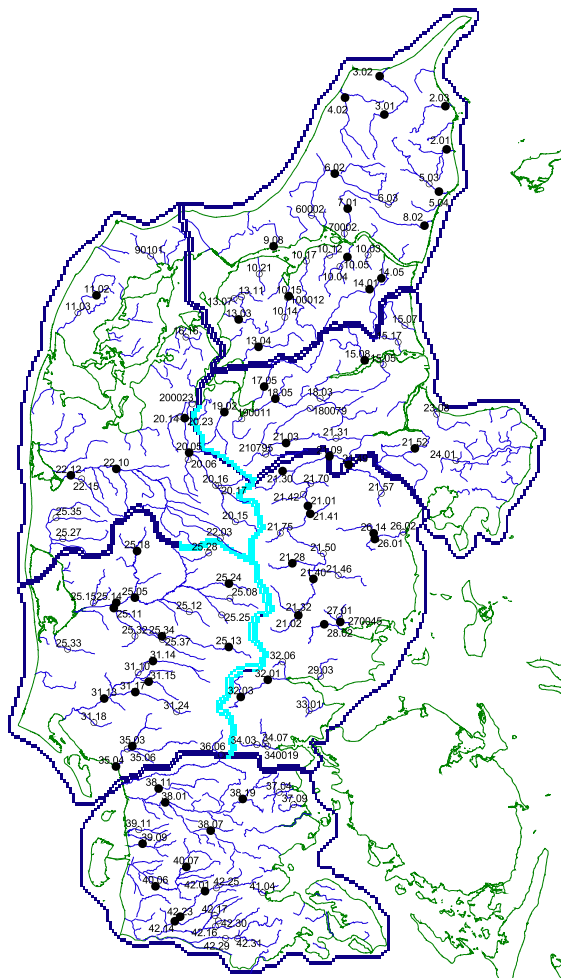
Lag	Sydjylland laggrænser kote	Sydvestjylland laggrænser kote	Sydostjylland laggrænser kote	Vestjylland laggrænser kote	Østjylland laggrænser kote	Nordjylland laggrænser kote
1	topo-Var.	topo-Var.	topo-Var.	topo-Var.	topo-Var.	topo-Var.
2	Variabel	Variabel	Variabel	Variabel	Variabel	Variabel
3	Variabel	Variabel	Variabel	Variabel	Variabel	Variabel
4	Var.- -10	Variabel	Variabel	Variabel	Variabel	Variabel
5	-10 - -20	Var.- -10	Var.- -10	Var.- -10	Var.- -10	Var.- -10
6	-20 - -30	-10 - -20	-10 - -20	-10 - -20	-10 - -20	-10 - -20
7	-30 - -40	-20 - -30	-20 - -30	-20 - -30	-20 - -30	-20 - -30
8	-40 - -50	-30 - -40	-30 - -40	-30 - -40	-30 - -40	-30 - -40
9	-50 - -60	-40 - -50	-40 - -50	-40 - -50	-40 - -50	-40 - -50
10	-60 - -70	-50 - -60	-50 - -60	-50 - -60	-50 - -60	-50 - -60
11	-70 - -80	-60 - -80	-60 - -70	-60 - -80	-60 - -80	-60 - -80
12	-80 - -90	-80 - -100	-70 - -80	-80 - -100	-80 - -100	-80 - -100
13	-90 - -100	-100 - -120	-80 - -100	-100 - -130	-100 - -130	-100 - -130
14	-100 - -120	-120 - -140	-100 - -220	-130 - -190	-130 - -190	-130 - -190
15	-120 - -140	-140 - -190		-190 - -250	-190 - -250	-190 - -250
16	-140 - -180	-190 - -250				
17	-180 - -220					

Tabel 8.1 Definition af beregningslag for Jyllands modeller

Randbetingelser for Jylland

De væsentligste ændringer i randbetingelser for Jylland, udover den nævnte metode til repræsentation af den geologiske model, er følgende:

- Markvanding er medtaget i form af et ekstra tilskud til nedbøren samt oppumpning fra markvandingsboringer (incl. årstidsvariation)
- Vandløbsstrømninger beskrives ved brug af MIKE 11 som kobles til MIKE SHE
- Randbetingelser implementeres som for Øerne, men visse steder langs den jyske højderyg er der indlagt gradientrandbetingelser

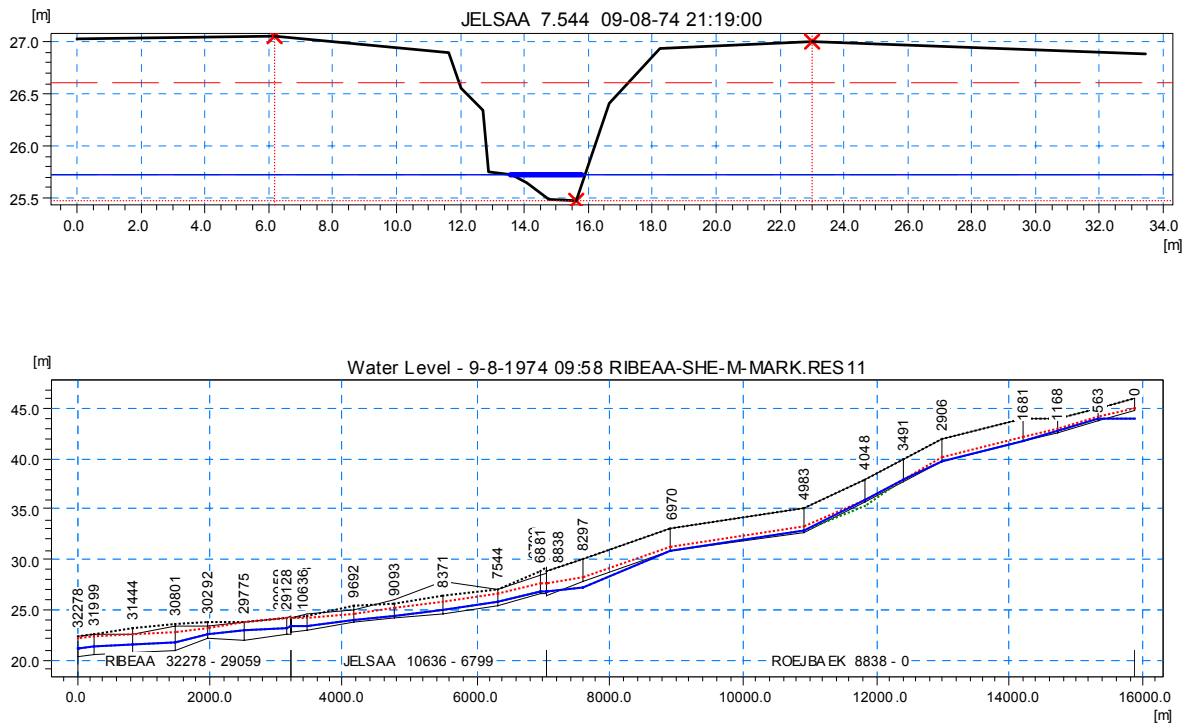


Som allerede bemærket af Lyshede (1955) kan man komme ud for at hvor skråningen fra et vand-skel er meget forskelligt i de to retninger, så vil væsentlige vandmængder søge fra den mindst stejle side under vandskellet til vandløbene på den stejle side. Disse sidste vandløb bliver derved forholdsvis meget vandrigere, et forhold, der kan iagttages adskillige steder ved den jyske højderyg, hvor middelfaststrømningen f.eks. i Funder å med det stejle fald er adskilligt større end normalt i denne egn, medens den i nabovandløbet Storå med det svage fald er betydeligt mindre end normalt. Vandløbet med det stærke fald vil have mulighed for at "stjæle" vand fra nabovandløbet med svagt fald, og vandløbet med stærkt fald vil ofte have stor minimumsvandføring (rigelig tilstrømning fra grundvandet). Lyshede mente i øvrigt, i den samme publikation, at grundvand ikke er andet end de vandmængder, der er opmagasineret i det underjordiske reservoir, og som virker udjævnende på afstrømningsforløbet. Jylland er i alt opdelt i 6 forskellige deloplande (figur 7.5). Ved havet er der anvendt fastholdt trykniveau i øverste lag.

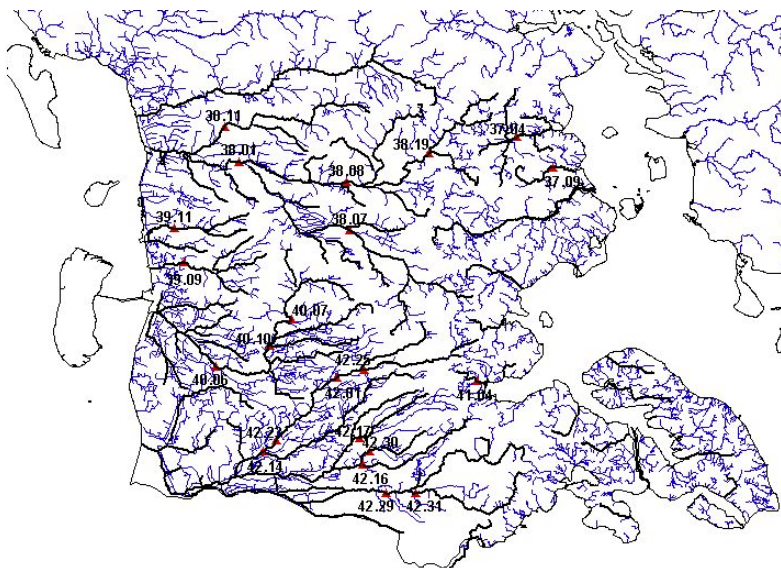
Figur 8.5 Opdeling af DK-model for Jylland og implementerede gradientrandbetingelser (strømningsretning går fra vest mod øst) er angivet med turkis signatur.

Strømning i vandløb styres af vandudvekslingen mellem grundvand og vandløb samt bidrag fra dræn og overfladeafstrømning. Beskrivelsen af vandløbsstrømninger sker med modellen MIKE 11. Modellen er koblet til MIKE SHE, hvorved der kan ske en udveksling af vand mellem de to modelsystemer. For Jylland er lækagekoefficienten distribueret på 1-2 forskellige strækningstyper (hhv. sand- og ler/morænelersområder).

I MIKE 11 modellen medtages alle større vandløb. Der er benyttet "kinematic routing" (Muskingum Cutta) rutine. Vandløbene beskrives ved vandløbstværsnit (med kote angivelse) samt plankoordinater (UTM). For vandløb hvor tværsnitsdata ikke er tilgængelige benyttes standardtværsnit. Der er benyttet amtsdata hvor disse eksisterer, og ellers er tværprofiler implementeret for hver 5 m spring i topografi, på baggrund af data fra nærliggende opmålte vandløbspunkter (korrelation i forhold til oplandsareal). Søer integreres i vandløbssystemet og beskrives på baggrund af tværsnitsoplysninger. Figur 8.6 viser horisontalt længdeprofil med vandstand og et vandløbstværsnit (MIKE 11 model). Detaljeringsgraden i hvilke vandløb der er implementeret i Sydjyllandsmodellen er vist i figur 8.7, mens figur 8.8 viser vandløb indbygget i MIKE SHE, placeret i kanterne mellem beregningskasserne.

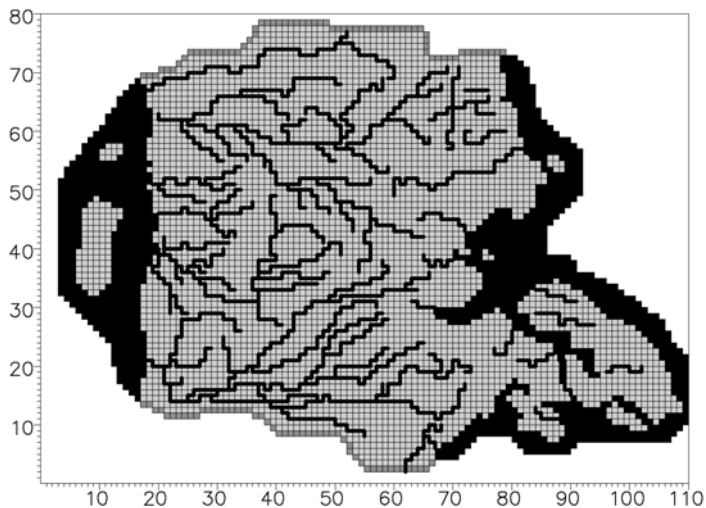


Figur 8.6: Plot fra MIKE 11: Nederst: tværsnit med vandstand, øverst: længdeprofil.



Figur 8.7 Eksempel på repræsentation af vandløb i Jyllandsmode (fra Sønderjylland). De optrukne vandløbsstrækninger er indbygget i MIKE 11 setup.

For hovedparten af modellen anvendes en drændybde på 0.5 m under terræn. I områder med terræn meget tæt på havniveau er drændybden reduceret, således at drændybden ikke ligger under havniveau. Drænvandsafstrømning sker enten til et vandløb eller direkte til modelgrænsen. Drænoplande er defineret i modellen ud fra topografiske vandløbsoplande.



Figur 8.8 Implementering af vandløb i MIKE SHE (eksempel fra Sønderjylland)

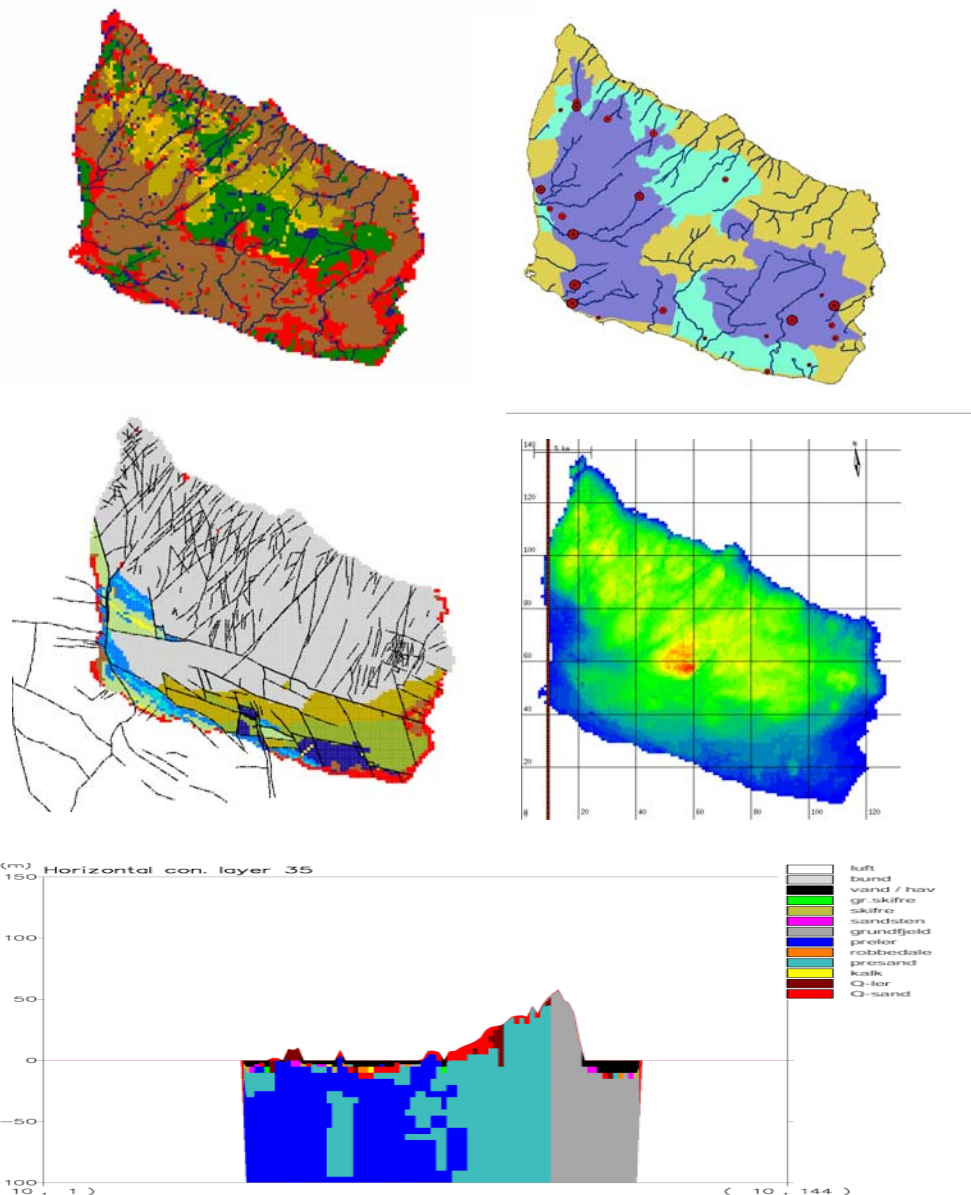
8.4.3 Bornholm

Det er valgt at benytte samme tolknings metode for Bornholm, som er benyttet for Jylland. Der er dog foretaget den ændring, at maskestørrelsen kun er på 250x250 meter og lagtykkelsen på 5 meter. Sedimenterne er opdelt i 13 kodegrupper: *Kvartær ler* (primært moræneler, men også smeltevandsler og –silt, postglacialt ler og silt), *kvartær sand* (primært smeltevandssand og –grus, samt postglacialt sand og grus), *kalk* (primært Komstad kalk og Arnager kalk), *prækvartær sand* (sand fra Mesozikum, undtagen Robbedale sand), *prækvartær ler* (ler fra Mesozoikum samt kaolin), *Robbedale sand*, *Grønne skifre*, *skifre* (primært alun skifer og 'sorte' skifre fra Ordovicium og Silur), *sandsten* (primært Balka sandsten og Neksø sandsten), *grundfjeld* (gnejs og granitter), *sand, ler og andet* (fyld, brønd og ingen oplysninger).

Efter tolkningen af de mange kort (op til 50 sektioner), er data fra ArcView eksporteret som punkter til en database (SAS[®]), hvorfra der slutlig er dannet T2-datafiler til MIKE SHE grundvandsmodellen.

Modellen for Bornholm er opstillet og der er foretaget en enkelt dynamisk kørsel. Der vil blive arbejdet videre med modellen, og resultater vil blive indarbejdet i en senere udgave af temarapporten (2. udgave med publicering i pdf-filer på www.vandmodel.dk), når de foreligger.

Der er nogen numeriske udfordringer med skråtstillede lag og topografiske forhold, der skal findes løsninger på, før modellen vil kunne afvikles med en robust opsætning til brug for stationære kalibreringskørsler, derfor kan det pt. være vanskeligt præcist at sige noget om hvornår modellen forventes endeligt implementeret og rapporteret. I figur 8.9 er vist nogen eksempler fra opsætningen. Modellen forventes opsat i 250 x 250 m horisontal diskretisering.



Figur 8.9 Eksempler på modelsetup for Bornholm. Øverst til venstre: nettonedbørs typer, øverst til højre: drikkevandsområder og vandværker. I midten til venstre: forkastnings- og sprækkezoner. I midten til højre: topografi og placering af snit. Nederst: geologisk tværprofil for Østbornholm (syd-nord).

8.4.4 Diskussion af hvordan forskellige metoder forventes at påvirke slutresultatet i modellering

To forhold er forskellige, i det anvendte koncept for Jylland og Bornholm i forhold til konceptet for Fyn og Sjælland:

- Tolkning af geologiske lag ("kassemodel" contra "lagmodel")
- Vandløbsmodul ("MIKE 11" contra "MIKE SHE flodmodel")

Begrundelsen for den valgte tolkning for Jylland og Bornholm har været et ønske om en mere flexibel tolkning, idet der ikke i samme grad som for Øerne træffes gennemgående

lag med regional udstrækning (fx de øvre, mellemste og dybere regionale sandmagasiner på Sjælland og Fyn). Men det er klart en anden måde at tolke geologien på, når man tolker i faste 10 m intervaller, end når man søger at forbinde sandlag mellem forskellige borer med udgangspunkt i geologiske profiler og evt. filterplaceringer der indikerer vandførende lags beliggenhed.

Der er en klar større flexibilitet i kassemodellen, der betyder, at det er let at udskifte et tolket kasse element (10 m x 1 km x 1 km), når der foreligger ny viden fx fra geofysisk kortlægning, eller en ny boring, end det er at retolke et geologiske lag. Det er således også relativt let at justere en tolkning, fx på baggrund af foreløbige kalibreringsresultater. Dette har været gjort i en række områder, fx i Sydjylland hvor fx pejlinger har vist at der var noget galt i den geologiske tolkning. Kassemodellen tolkes direkte i GIS (ArcView), og ved successivt at tolke lag for lag fx fra bunden og op, opnås en god, struktureret arbejdsgang, med en indbygget "rumlig" tolkning som er attraktiv for geologen.

Men giver det nogen forskelle i beregninger, at lag ikke er gennemgående, men snarere er opbygget som byggeklodser, i forskellig farve? Ret beset er der formentlig ikke nogen stor forskel på at arbejde med det jyske grid, og så et tilsvarende grid for fx Sjælland. For Sjælland og Fyn er der jo også indbygget "sand- og tektonik vinduer", som har meget forskellig hydraulisk ledningsevne, i forhold til fx lerlaget. Så hvis ellers det lykkes at få den numeriske løsning til at blive rimelig robust, så er der ikke den store forskel. Og det er for samtlige jyske delmodeller lykkedes, godt nok visse steder med noget besvær, at få den stationære numeriske løser til at producere pålidelige og brugbare resultater. Erfaringen er her, at det især er problemer med fx vandløb, som ligger i et forkert niveau, der er årsagen til konvergensproblemer, mere end at det har noget at gøre med kassemodellen.

For Svendborg er der i forbindelse med et PhD studie foretaget en sammenligning af de to koncepter, men resultatet foreligger endnu ikke (afsluttes februar 2003). Der er formentlig behov for at teste betydningen lidt nærmere, og det anbefales fx at opbygge en kassemodel for hele Fyn, og teste betydningen her.

Anvendelse af MIKE SHE / MIKE 11 konceptet blev besluttet, idet MIKE SHE's flodmodul blev "udfaset" af DHI, og ikke indgik i de fremtidige udviklingsplaner. Erfaringerne med MIKE SHE's flodmodul har været at modulet har nogen begrænsninger, specielt når der arbejdes med distribuering af lækagekoefficienter (specielt høje værdier $> 0,6 \text{ e}^{-6} \text{ s}^{-1}$), og omkring hvilke koblinger man kan have i forskellige vandløb. Men i øvrigt har erfaringerne for Øerne være ret gode med MIKE SHE's flodmodul. Overgangen til MIKE 11 havde nogen børnesygdomme, bl.a. omkring spidserne af vandløbene (nødvendige randbetingelser / flow ind i modellen så de ikke løb tørre). Det viste sig også, at MIKE SHE / MIKE 11 i starten ikke var "gearet" til det relativt komplekse (og tunge setup), og krævede meget små tidsskridt som gjorde kørslerne langstrakte (i tid). Ved indbygning af bl.a. kinematisk routing (Muskingum Cutta løser), blev det muligt at køre med væsentligt større tidsskridt, og ad den vej opnå acceptable kørselstider for integreret modellering.

MIKE 11 har et stort potentiale som overfladevandsmodel, koblet til MIKE SHE, så satsningen vurderes som en mere flexibel løsning, til håndtering af regulering, søer, vådområder (udveksling med enge) osv. end den løsning som MIKE SHE flodmodulet gav. Selvom den

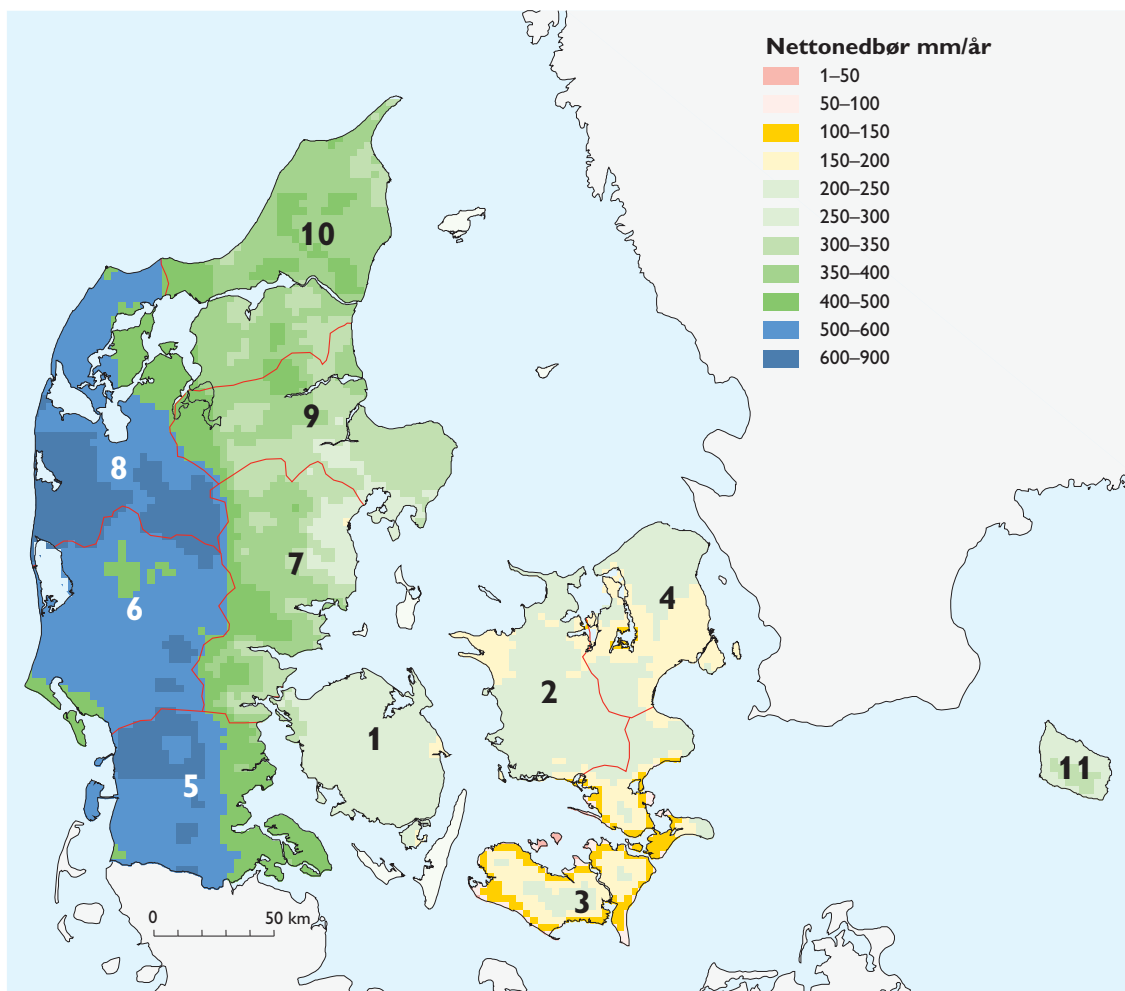
Løsning, der er benyttet til DK-modellen, rummer en række forenklinger, er det således muligt, fx i forbindelse med modellering på mindre skala, at udbygge og tilpasse den opstillede MIKE 11 model, afhængigt af de nærmere formål, og således yderligere fokusere model-setup's i forhold til forskellige modelleringsformål, kompleksitetsniveauer osv.

Anvendelsen af MIKE SHE / MIKE 11 i forbindelse med DK-model for 6 jyske oplande har således udgjort en grundig testning af dette koncept. Der er fundet en række svagheder og mangler i konceptet, som efterfølgende er blevet rettet, så det i dag kører lige så godt som MIKE SHE flodmodellen, som en del af en integreret hydrologisk model. Det er dog fortsat lidt tungere at køre med, men giver så samtidig langt meget mere fleksibilitet og fremtidssikring.

Anvendelse af MIKE SHE / MIKE 11 vurderes samlet at give en bedre, og mere fremtids-sikret løsning for områder med god kontakt mellem grundvand og vandløb som fx store dele af Jylland, i forhold til MIKE SHE flodmodellen. Hertil kommer at DK-modellen giver mulighed for at indgå som randbetingelse til fx modeller for grundvand og vådområder baseret på MIKE SHE/MIKE 11 i mindre skala, hvilket vurderes en styrke, idet det er et særligt ønske med DK-modellen, at denne kan fungere som referenceramme for modellering på mindre skala (OSD, Vandrammedirektiv osv.), udover det potentiale, den allerede har dokumenteret, som et modelværktøj til integreret hydrologiske modellering på overordnet Vandrammedirektiv skala (WFD-niveau).

8.5 Sammenfatning vedr. konceptuel model for hele landet

Danmark er i den hydrologiske modellering opdelt i 11 delområder (se figur 8.10).



Figur 8.10 Opdeling af DK-model på 11 delmodeller

Opdelingen på de 11 deloplande er dels begrundet af ønsket om at have afviklingstider af passende størrelse men også baseret på hensynet til randbetingelser. På Sjælland er afgrænsningen valgt så den falder sammen med overordnede grundvandskel. Modellen for Sjælland er dog samlet i en database, så det er relativt nemt at opstille en tværgående model. Eksempelvis er der opstillet en model for et område svarende til Suså modellen, som går på tværs af Nord, Vest og Syd modellen. For Jylland har det som nævnt ikke været muligt helt at undgå implementering af gradientrandbetingelser, idet der er store forskelle mellem grundvandsoplande og topografiske oplande. Hvor dette er tilfældet, har det været nødvendigt at "estimere" en fornuftig gradientrandbetingelse, hvilket til dels har været en iterativ proces, i takt med færdiggørelsen af de enkelte modeller.

Til simulering af grundvandsprocesserne på stor skala, blev det besluttet at inkludere følgende hydrologiske processer i modellen:

- Sne akkumulering og –smeltning for at medtage forsinkelsen i daglig nedbør som følge af sne
- Overfladisk afstrømning
- Umættet zone processer inkluderer evapotranspiration. Det vigtigste krav til denne beskrivelse er at nettonedbøren (nedbør minus evapotranspiration) opgøres korrekt på sæsonmæssig og årlig basis
- Grundvandstrømningsprocesser inklusiv grundvandets trykniveau, strømning mellem forskellige lag og udveksling mellem grundvand og vandløb. Da en væsentlig del af landet er drænet er der inkluderet en drænkompontet for det øvre frie magasin
- Vandløbsafstrømning og vandstand. Vandløbssystemer blev fastlagt ud fra digitaliserede vandløbspunkter. Et antal typeprofiler blev benyttet baseret på målt medianminimumsafstrømning og oplandsarealer. Det var ikke muligt at repræsentere samtlige mindre tilløb i modellen. Disse arealer drænes i stedet af drænvandskomponentet.

8.6 Modelkode

Til simulering af grundvandssystemet incl. grundvands/overfladevands interaktion er MIKE SHE systemet valg (Abbott et al., 1986a,b; Refsgaard og Storm, 1995). MIKE SHE er en deterministisk, fuldt distribueret og integreret hydrologisk model, som kan beskrive de vigtigste strømningsprocesser for landfasen af det hydrologiske kredsløb. I flere modelreviews er det på det seneste vurderet, at MIKE SHE er det bedste værktøj til beskrivelse af grundvands/overfladevands relaterede problemstillinger (se f.eks. Kaiser-Hill Compagny, 2001).

Som en aktivitet i forbindelse med konstruktionen af DK-modellen blev der udviklet en fuld stationær løser, baseret på en PCG algoritme, hvilket har givet mulighed for anvendelse af en standardiseret automatisk kalibreringsprocedurer, baseret på UCODE.

For at spare beregningstid og reducere datakrav, blev det besluttet at se bort fra den komplekse umættede zone komponent af MIKE SHE, som er baseret på Richard's ligning. I stedet blev der udviklet et simpelt rodzonemodul til beregning af daglige værdier af snesmeltning og nettonedbør.

<i>DK-Delmodel område:</i>	<i>Afviklingstider (MIKE SHE/MIKE 11) på 2,4 GHz Pentium IV PC (20 års dynamisk simulering, daglig basis) timer</i>
Nordjylland	12
Sydjylland	7
Sydøstjylland	8
Sydvestjylland	11
Vestjylland	18
Østjylland	17
Sjælland og Fyn	4-6

Tabel 8.2 Kørselsafviklingstider for MIKE SHE / MIKE 11 (Jylland) og MIKE SHE (Øerne)

Såfremt MIKE SHE's umættet zone modul (UZ) havde været valgt i stedet for DK-modellens simple rodzonemodul, føler vi os overbeviste om, at projektet ikke kunne have været afviklet indenfor de ressourcer, der var afsat til projektet. Hertil kommer, at kobling af MIKE SHE (incl. UZ) og MIKE 11 formentlig ville indebære kørselstider af en sådan længde, at mange af de kalibrerings- og valideringskørsler, der er lavet i projektet, ikke kunnet gennemføres indenfor den afsatte tidsramme. Der har været så meget kompleksitet i modellen med de relativt mange lag, vandløb, vandindvindinger osv. Hertil kommer, at det nuværende formål, ikke automatisk taler for alt for mange eksperimenter med et meget tungt og komplekst UZ/SZ/MIKE11 system med fuld feed back mellem de forskellige kredsløbskomponenter, samt dertil hørende muligheder for numeriske problemer.

Vi mener derfor, at valget af det simple rodzonemodul har vist sig at være særdeles fornuftigt i forhold til det opstillede formål (vurdering af udnyttelig ressource, dybere grundvandsdannelse og påvirkning af afstrømning), og har været af afgørende betydning for projektets gennemførelse.

Dette er imidlertid ikke ensbetydende med, at der ikke er behov for en bedre løsning end det simple DK-rodzonemodul til andre modelleringsformål. Mulighed for håndtering af feedback fra fx grundvandspejl, bedre håndtering af sædskifter (vegetation) og simulering af kvælstofudvaskning vil kræve et forbedret rodzonemodul.

Vi mener derfor, at konklusionen må være, at der er behov for at teste, om en mere fysisk baseret beskrivelse kan tilvejebringes ved en kobling af Daisy til DK-modellen (MIKE SHE/MIKE 11). Dette koncept vil samtidigt åbne op for muligheder for beskrivelse af kvælstofudvaskning og transport på stor skala, hvilket der er afgørende behov for. Men det vil frem for alt kræve ny viden og en mere detaljeret modellering af de øvre lag, herunder omsætning af kvælstof i grundvand og vådområder.

Det netop igangsatte PhD studie indenfor disse temaer kan forhåbentlig bidrage positivt og pege på nye og bedre måder at håndtere rodzonen på. En "løs kobling" af Daisy og DK-modellen (MIKE SHE/MIKE 11), med en slags feedback i form af skiftende kørsler med Daisy (simuleret vand- og stofudvaskning fra rodzonen), og DK-model (beliggenhed af grundvandsspejl, der er randbetingelse for Daisy), indtil begge modeller "svinger i takt", er muligvis en farbar vej frem, som kan forene hensynet til operationalitet med den påkrævede fysiske basis, herunder behov for feed back mellem forskellige kredsløbskomponenter.

Det er en særlig udfordring at bevæge sig i en balance mellem den fuldstændig korrekte, fysisk baserede løsning og den for forenkede "empirisk baserede model". DK-modellen har balanceret fornuftigt, synes vi, mellem hensynet til så meget fysisk basis som muligt, som det overordnede formål har krævet. Hvis man skal begribe kvælstoffets transport på stor skala, er der imidlertid et tilsvarende behov for balance mellem empirisk forenkling, hvor det er acceptabelt / fordelagtigt, og fysisk basering, hvor det er muligt / påkrævet.

MIKE SHE udviklingen i forbindelse med DK-modellen er nærmere beskrevet på DK-modellens hjemmeside på www.vandmodel.dk (se under MIKE SHE udvikling). Den helt nye version af MIKE SHE, med det nye Windows brugerinterface, har ikke været anvendt i

forbindelse med DK-modellen (endnu). En foreløbig afprøvning har vist, at det er noget besværligt at konvertere de eksisterende setup's til de nye MIKE formater (kræver en pæn del tålmodighed, pga. de mange beregningslag og geologiske lag i DK-modellen). Der er behov for at overføre de 11 delmodeller til den nye version, samt at teste om modellerne kører fornuftigt med den nye version.

8.6.1 DK-modellens rodzonemodul

DK-modellens rodzonemodul opstiller en simpel vandbalance for rodzonen ud fra en empirisk relation mellem aktuel og potentiel fordampning som funktion af vandindholdet i rodzonen. Modulet fordeler nedbøren mellem nedsivning og aktuel fordampning. Den styrende parameter i beregningen udgøres af markkapaciteten som afhænger af vegetationstype samt jordart. I DK-modellen anvendes 3 forskellige værdier for markkapaciteten: 150 mm for skovarealer, 70 mm for sandjorde og 140 mm for lerjorde.

Der antages en nedbørsdistribuering, hvor højtliggende områder modtager mere nedbør end lavtliggende områder. Skovområder antages at have en større potentiel fordampning end landbrugsområder, og i vådområder antages at ske en potentiel fordampning året rundt uanset nedbør.

Afhængig af arealanvendelse, jordart og terrænkote opnås der således forskellige netto-nedbørsserier. Der skelnes mellem skov, vådbundsområde, højt- og lavtliggende åbent land med enten sand- eller lerjord. I Jylland hvor der i forbindelse med landbrugsjorde er et stort vandingsbehov medregnes markvanding som et ekstra tilskud til nedbøren.

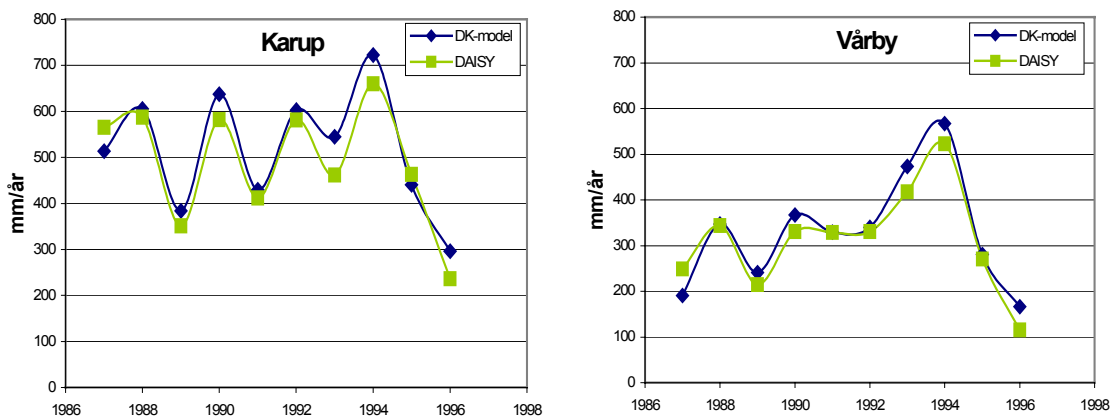
Ved nedsivning fra overfladen til den mættede zone ses der i DK-modellen bort fra forsinkelse og magasinering i den umættede zone.

DK-modellens rodzonemodul er meget simpel, og det ville have været muligt at lave en bedre koblet beregning af nedsivning med MIKE SHE's UZ modul, der ville tage interaktioner mellem grundvand og den umættede zone i betragtning. Det ville også være muligt at anvende Daisy-løsningen i "afkoblet" form. I forbindelse med DK-modellen blev det imidlertid valgt at benytte rodzonemodulet, fordi dette modul ikke krævede så mange parameterværdier og fordi det var en fornuftig operationel løsning med henblik på formålet med modellen, som var at beskrive grundvandssystemet og specielt grundvandsdannelsen til de dybere magasiner og påvirkning af vandløbsafstrømninger som følge af vandindvinding, med henblik på en vurdering af den udnyttelige ressource.

Test af rodzonemodul i forhold til Daisy og Als model

På figur 8.11 ses den beregnede nedsivning for henholdsvis rodzonemodulet og Daisy modellen for årene 1987-96. Gennemsnitligt for perioden 1987-1996 opnås en uoverensstemmelse på 5,6 % for Karup sandjorden og 5,7 % for Vårby sandjorden. I begge tilfælde genererer rodzonemodulet gennemsnitligt lidt mere nedsivning end Daisy. Den styrende parameter i rodzonemodulet er som sagt markkapaciteten, og sammenlignes med markka

paciteten anvendt i Daisy ses rodzonemodulets markkapacitet at være sat en anelse lavt. Antages en roddybde på 0.5 m fås markkapaciteter af størrelsesordenen 50-150 mm i Daisy. En større markkapacitet i rodzonemodulet vil resultere i mindre nedsivning. Anvendes en markkapacitet på 100 mm i stedet for de nuværende 70 mm for sandjorde i rodzonemodulet reduceres den gennemsnitlige forskel for perioden 1987-1996 således til 1.0 % for Karup sandjorden og 1.9 % for Vårby sandjorden.



Figur 8.11: Nedsivning (mm/år) for de to sandjorde beregnet med henholdsvis DK-modellen og Daisy. (DK-model: Markkapacitet = 70 mm). Kilde: Christensen et al. (2000)

Dataene fra Daisy på figur 8.10 stammer fra et scenarie med fastholdt grundvandspotentiale i 3 m under terræn, hvor nedsivningen er udtrukket i 1.5 m under terræn.

Variationer i grundvandsstanden har ingen indflydelse på beregningen af nedsivningen med DK-modellens rodzonemodul, idet den fungerer som en simpel boksmodel uden hensyntagen til beliggenheden af grundvandspejlet. I vådområder antages potentiel fordampning året rundt, og på den måde beskrives på noget forenklet vis, effekten heraf på vandbalancen (i sommerperioder simuleres herved en opsvining i vådområder som svarer til en "oppumpning" fra grundvandet).

En del af forklaringen til forskellene mellem tallene fra de to modeller skal findes i rodzonemodulets mangel på hensyntagen til forskellige afgrødetyper ved beregning af den aktuelle fordampning. Beregningen af den aktuelle fordampning i rodzonemodulet skelner ikke mellem forskellige afgrøder og tager heller ikke hensyn til planternes sæsonafhængige vækst, men er baseret på en erfaringsmæssig sammenhæng mellem aktuel og potentiel fordampning afhængende af det aktuelle vandindhold og markkapaciteten. Rodzonemodulet vil derfor i perioder med stor plantevækst og plantedække undervurdere den aktuelle fordampning, mens det i andre perioder overvurderer fordampningen.

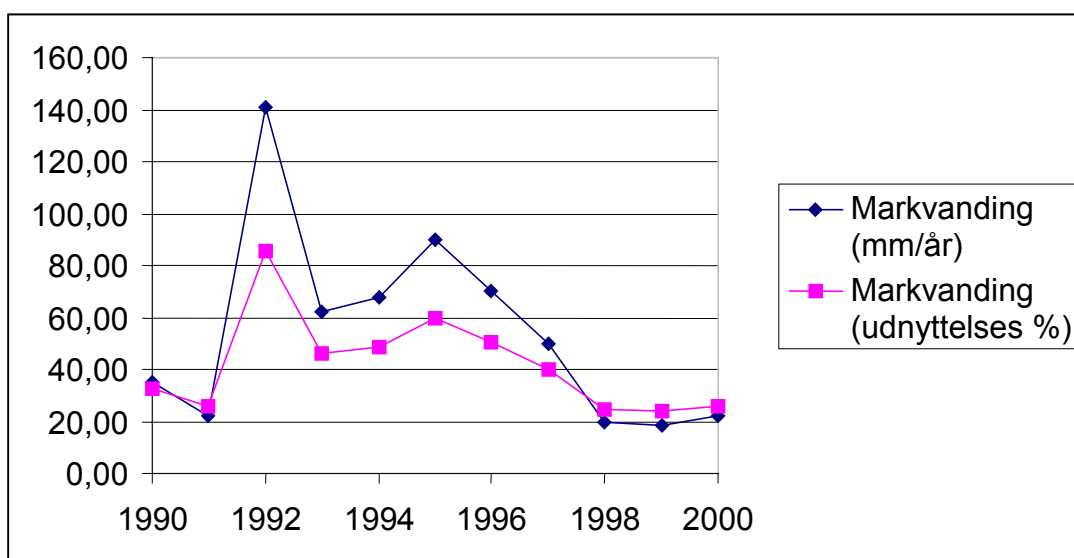
Rodzonemodulet har ligeledes været testet for lerjord i forhold til Als modellen, ARMv3 (Jeppesen, 2001), som er en "boksmodel", der har en del lighedspunkter med DK-modellens rodzonemodul. Her viste en sammenligning, at de to modeller gav stort set den

tiske nedsvivninger for lerjord (< 1 %'s afvigelse på årsbasis). I den samme undersøgelse blev ARMv3 sammenlignet med Evacrop. Denne sammenligning viste at Evacrop på årsbasis simulerede ca. 3 % mere nedsvivning end ARMv3. DK-modellen giver dermed lidt mindre nedsvivning i forhold til Evacrop for Als lerjorden. En lidt nærmere beskrivelse af rodzonemodulet findes i Plauborg et al. (2002).

Markvanding

Da store arealer i Jylland anvendes til landbrug på jorde med et stort vandingsbehov, har det været vigtigt i DK-model Jylland at kunne medtage markvanding i modellen. Dette er gjort ved at forøge nedbøren i områder med markvanding, når vandindholdet i rodzonen er mindre end halvdelen af markkapaciteten. Når markvandingen medtages opnås yderligere 4 kombinationer, idet der er mulighed for markvanding for alle kombinationer af åbent land (se ovenfor). Strategien er at justere markvandingsrutinen, så de simulerede vandingsmængder samlet set er i rimelig overensstemmelse med de årlige indberettede oppumpninger til markvanding.

Ud fra oplysninger fra Sønderjyllands Amt samt indberetninger til GEUS's Vandressource-register er alle større oppumpninger til vandværker og industri medtaget i modellen. Oppumpninger er inkluderet med årlige værdier. Alle større indvindinger til markvanding er ligeledes medtaget. De simulerede værdier for oppumpninger til markvanding er fordelt jævnt over sommermånederne, således at de simulerede værdier stemmer overens med de indberettede indvindinger til markvanding (eksempel på simuleret vandingsmængde, se figur 8.12).



Figur 8.12 Simulerede markvandingsmængder og udnyttelsesgrader for Sydjylland. Kun 1992 havde en afgrødevanding tæt på tilladelsen (ca. 85 % af tilladelsen). De seneste 3 år har haft en vanding med ca. ¼ af tilladelsen.

8.7 Modelopstilling og parameterfastsættelse

Valget af en maskevidde på 1 km var baseret på et slags kompromis. Brugen af et 1 km net er en grov approximation men må betragtes som rimelig i relation til formålet med modellen. Den valgte gridstørrelse på 1 km gør det imidlertid nødvendigt at simplificere en række forhold som er vigtige for grundvandsdannelsen og genereringen af afstrømning såsom topografi og geologisk heterogenitet, drænsystem og vandløb (Henriksen et al., 1998; Dahl et al., 1998).

I princippet kan rumligt distribuerede modeller regne på parameterværdier for hvert grid element eller beregningsknudepunkt. I praksis, på grund af heterogenitet i parameterværdier, forskelle mellem observationsskala og model grid skala, og eksperimentelle begrænsninger, så er specifikationen af parameterværdier vanskelig (Rosso, 1994). Derfor blev det som et vejledende princip besluttet at konstruere en model som bestod af så få frie parametre som muligt. Dvs., der blev så vidt muligt antaget ensformige parameterværdier over hele modelområdet for de geologiske lag bestående af moræneler og sand så vel som for de fleste overfladekomponent parametre.

De hydrauliske parametre kan underinddeles i 3 grupper:

- parametre der styrer fordelingen af nedbør mellem evapotranspiration, grundvandsdannelse og overfladisk afstrømning fra bl.a. befæstede arealer (rodzone modul)
- parametre der styrer grundvandsstrømning, drænastrømning og udveksling mellem grundvand og vandløb (mættet zone model), og
- parametre der styrer overfladisk afstrømning og kanalstrømning (overland og kanalstrømningsmodel)

Startværdier og bedste estimater på hydrauliske parameterværdier og range er baseret på tidligere feltarbejde og modellering (Refsgaard og Stang, 1981; Christensen, 1994; Henriksen et al., 1997) og litteratur (Morris og Johnson, 1967; Carlsson og Gustafson, 1984; Domenico og Schwartz, 1998). For kalkmagasinet under de kvartære aflejringer blev prøvpumpningsdata (fx renpumpning) omregnet til T-værdier udtrukket fra GEUS's Jupiter database, anvendt a-priori til at interpolere en rumlig fordeling af den hydrauliske ledningsevne.

8.8 Fastlæggelse af nøjagtighedskriterier

Performance kriterier blev udvalgt så de afspejler formålene med modelleringen, som er simulering af udnyttelig ressource, der afhænger af påvirkninger af trykniveau og vandløbsafstrømning ved et antal lokaliteter. De fire kalibreringskriterier var (Henriksen et al., 2003):

(1) Et mål for afvigelse mellem simuleret og observeret trykniveau:

$$R M S = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_j^N \left((H_{s,j} - H_{o,j})^2 \right)} \quad , \quad \in [0; \infty[$$

(2) Et mål for modellens evne til at simulere gennemsnitlig afstrømning for en bestemt vandføringsstation:

$$F_{Bal} = 100 \frac{\overline{Q_o} - \overline{Q_s}}{\overline{Q_o}}, \quad (\%)$$

(3) Et mål for evnen til at simulere variation i afstrømningshydrografen for en bestemt vandføringsstation (Nash and Sutcliffe, 1970):

$$R^2 = \frac{\sum_i (Q_{o,i} - \overline{Q_o})^2 - \sum_i (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_i (Q_{o,i} - \overline{Q_o})^2} = 1 - \frac{\sum_i (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_i (Q_{o,i} - \overline{Q_o})^2}, \quad \in]-\infty; 1]$$

(4) Et mål for evnen til at simulere minimumsafstrømningsforhold ved en bestemt vandføringsstation (Wood, 1974):

$$FL = \sum_i \left[\frac{(Q_{o,i} - Q_{s,i}) \overline{Q_o}}{Q_{o,i}^2} \right]^2,$$

hvor

$H_{s,j}$: simuleret trykniveau for boring j (m)

$H_{o,j}$: observeret trykniveau for boring j (m)

$Q_{s,i}$: simuleret daglig vandføring for dag i (l/s)

$Q_{o,i}$: observeret daglig vandføring for dag i (l/s)

$\overline{Q_o}$: gennemsnitlig observeret afstrømning i test perioden (l/s)

$\overline{Q_s}$: gennemsnitlig simuleret afstrømning i test perioden (l/s)

Minimumsafstrømnings indikatoren FL er meget følsom overfor observeret afstrømning tæt på nul og forudsætter omhyggelig udvælgelse af vandføringsstationer til kalibrering og validering. For at minimere støj bliver FL normaliseret i forhold til en valgt referencekørsel:

$$FL_{normalised} = \frac{FL}{FL_{reference-run}}$$

Modellens nøjagtighed i kalibrerings- og valideringskørsler blev vurderet svarende til det angivne nøjagtighedskriterium i tabel 8.3. Det skal bemærkes, at kriteriet ikke er af typen ja/nej, men at performance vurderes i fem kategorier fra udmærket (excellent) til meget dårlig (very poor). Rationalet bag de specificerede tal i tabel 8.3 er som følger:

RMS værdien for trykniveau skal sammenlignes med usikkerheden på observeret trykniveau. Kilderne til usikkerhed og den opgjorte værdi er fastlagt som følger (Sonnenborg, 2001):

- målefejl: 0.1 m
- fejl på målepunktskoten: for mange boringer er kotefastsættelsen sket på basis af topografiske kort: 1.5 m
- skalafejl idet boringen er tilfældigt placeret indenfor et 1 km² modelgrid. Denne fejl kan vurderes som en typisk hydraulisk gradient multipliceret med halvdelen af gridstørrelsen: 1.5 m
- skalafejl som svarer til heterogenitet indenfor et modelgrid. Ifølge Gelhar (1996) kan denne fejl vurderes som autokorrelationslængden skalaen for log K (logaritmen for hydraulisk ledningsevne) multipliceret med standardafvigelsen af log K og den gennemsnitlige hydrauliske gradient: 2.1 m
- fejl som skyldes ikke-stationaritet. Observationer stammer fra forskellige årstider. Fejlen kan estimeres som halvdelen af den typiske årlige fluktuation: 0.5 m
- andre effekter som følge af vertikal skalafejl og variationer i topografi: 0.5 m

Dette kan opgøres til en samlet fejl på 3.1 m, og svarer dermed til en RMS værdi på 6.2 m ved en 95 %'s konfidensgrænse. Sammenlignet med tabel 8.3 svarer dette til den midterste performance kategori (god).

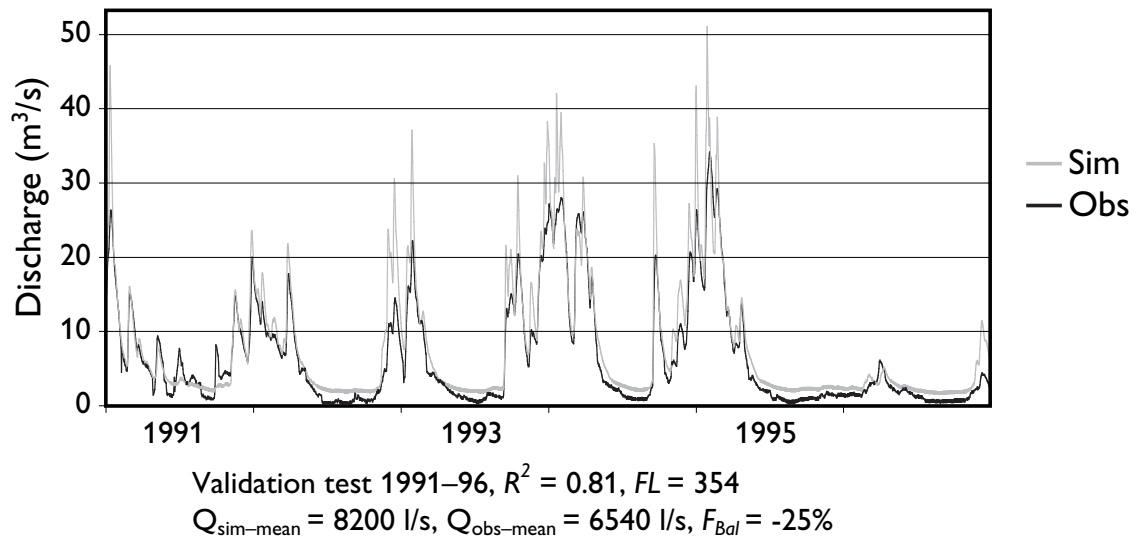
Performance indikator	Fremragende (5 points)	Meget god (4 points)	God (3 points)	Ringe (2 points)	Meget ringe (1 point)
RMS (m)	< 4	4–6	6–8	8–10	> 10
R ²	> 0.85	0.65–0.85	0.50–0.65	0.20–0.50	< 0.20
F _{bal}	< 5%	5–10%	10–20%	20–40%	> 40%
Aggregeret score	☆☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆	☆

Tabel 8.3 Opstillede performance kriterium for DK modellen

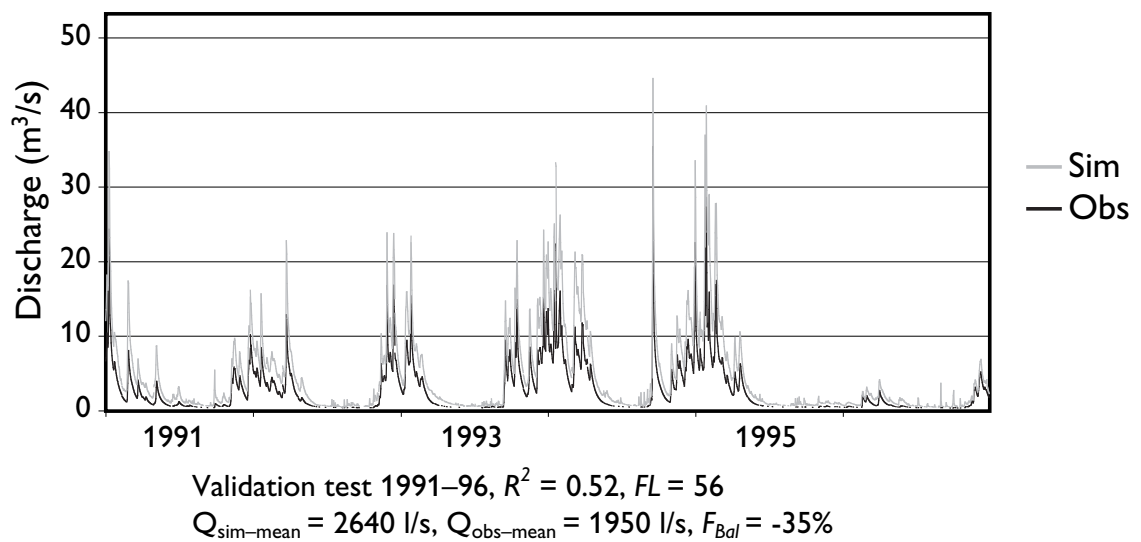
Erfaringer med R² værdier for nedbør-afstrømningsmodeller (Nielsen og Hansen, 1973; Refsgaard, 1997) og for internationale vandløb (Harlen, 1991; Lidén, 2000 og Andersen et al., 2001) foreslår R² værdier mellem 0.50 og 0.95. Se figur 8.13.

F_{bal} for vandbalancen skal være så tæt på nul som muligt. Performance klasserne i tabel 8.3 er identiske med dem i Andersen et al. (2001).

57.12 Suså, Holløse mølle



56.11 Tude Å, Valbygård



Figur 8.13 Eksempel på beregning af performance indikatorer for Tude å og Suså. Eksempel på problem med vandbalancen fra version 2001a (valideringstest)

Der findes ikke nogen specifikke værdier for FL-værdien for minimumsafstrømning, men denne værdi skal være så lille som mulig.

RMS værdier beregnes for hvert beregningslag, hvorimod R^2 værdien og F_{bal} beregnes for de udvalgte vandføringsstationer.

8.9 Kalibrerings- og valideringsmetodik for Sjælland og Fyn

Estimerede startværdier og forventet "range" for parametre for Sjælland og Fyn er vist i tabel 8.4. Det valgte kalibreringsmål for trykniveau og afstrømning er vist i tabel 8.5 og fig. 8.14. Observeret trykniveau fra GEUS's boringsdatabase fra 1970-96 blev anvendt. Dvs. der blev anvendt trykniveaudata fra 4439 boringer (en observation pr. boring), med filtre fordelt over 9 beregningslag, som blev anvendt som et mål for den observerede "stationære" trykniveau. Daglig afstrømning fra 28 vandføringsstationer for perioden 1988-96 blev anvendt til kalibrerings- og valideringstests.

Parametre i mættet zone (SZ)	Startgæt (Range)	
Tidskonstant, dræn	$2 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} (1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-8})$	
Hydraulisk ledningsevne	Horisontal	Vertikal
Lag 1 (sprækket moræneler)	$1 \times 10^{-5} \text{ m/s} (1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-4})$	$1 \times 10^{-7} \text{ m/s} (1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-6})$
Lag 2, 4, 6, 8 and 10 (moræneler og ler)	$1 \times 10^{-7} \text{ m/s} (1 \times 10^{-10} - 1 \times 10^{-6})$	$1 \times 10^{-9} \text{ m/s} (1 \times 10^{-11} - 1 \times 10^{-7})$
Lag 3, 5, 7 and 9 smeltevandssand og grus	$1 \times 10^{-4} \text{ m/s} (1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-2})$	$1 \times 10^{-5} \text{ m/s} (1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3})$
Lag 11 (kalk og limsten)	distribueret ($1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$)	distribueret ($\times 0.1$) ($1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-4}$)
Impermeabel bund	$1 \times 10^{-20} \text{ m/s}$	$1 \times 10^{-20} \text{ m/s}$
Sandlinser i ler	$1 \times 10^{-4} \text{ m/s} (1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3})$	$1 \times 10^{-5} \text{ m/s} (1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-4})$
Glacialtektoniske linser i ler	$2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	$1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$
Glacialtektoniske linser i sand	$1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	$1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
Magasintal	Frit magasintal	Artesisk magasinkoefficient
Lag 1 (sprækket moræneler)	0.25 m/m (0.05–0.20)	$0.0001 \text{ m}^{-1} (1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-2})$
Lag 2, 4, 6, 8 and 10 (moræneler and ler)	0.25 m/m (0.01–0.18)	$0.0001 \text{ m}^{-1} (1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-2})$
Lag 3, 5, 7 and 9 smeltevandssand og grus	0.25 m/m (0.10–0.35)	$0.0001 \text{ m}^{-1} (1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3})$
Lag 11 (kalk)	0.25 m/m (0.01–0.35)	$0.0001 \text{ m}^{-1} (1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-3})$
Udveksling mellem grundvand og vandløb		
Lækagekoefficient, vandløbsbund	$1 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} (1 \times 10^{-10} - 1 \times 10^{-6})$	
Interaktionstype	type 3 (kun vertikalt tryktab)	
Overlandflow (OC)		
Overfladeruhed, Manning (M)	$3 \text{ m}^{-1/3}/\text{s} (1-5)$	
Overflademagasiner	0.01 m (0–0.05)	
Vandløbsruhed, Manning (M)	$20 \text{ m}^{-1/3}/\text{s} (10-35)$	

Tabel 8.4 Startværdier og estimeret range for Sjælland

Beregningslag	Hydrostratigrafisk enhed	Antal observationer	Udvalgte observationer	Procentvis fordeling (%)
1 (geolag 1+2+3)	Sprækket moræner og lokale sandlag	163	106	2.4
2 (geolag 4)	Moræner	113	113	2.5
3 (geolag 5)	Øvre regionale sandmagasin	379	376	8.5
4 (geolag 6)	Moræner	317	304	6.8
5 (geolag 7)	Mellemste regionale sandmagasin	319	318	7.2
6 (geolag 8)	Moræner	171	170	3.8
7 (geolag 9)	Nedre regionale sandmagasin	147	142	3.2
8 (geolag 10)	Moræner	89	89	2.0
9 (geolag 11)	Kalk	6898	2821	63.6
Total antal trykniveauobservationer		8596	4439	100.0

Tabel 8.5 Kalibreringsmål for trykniveau for Sjælland

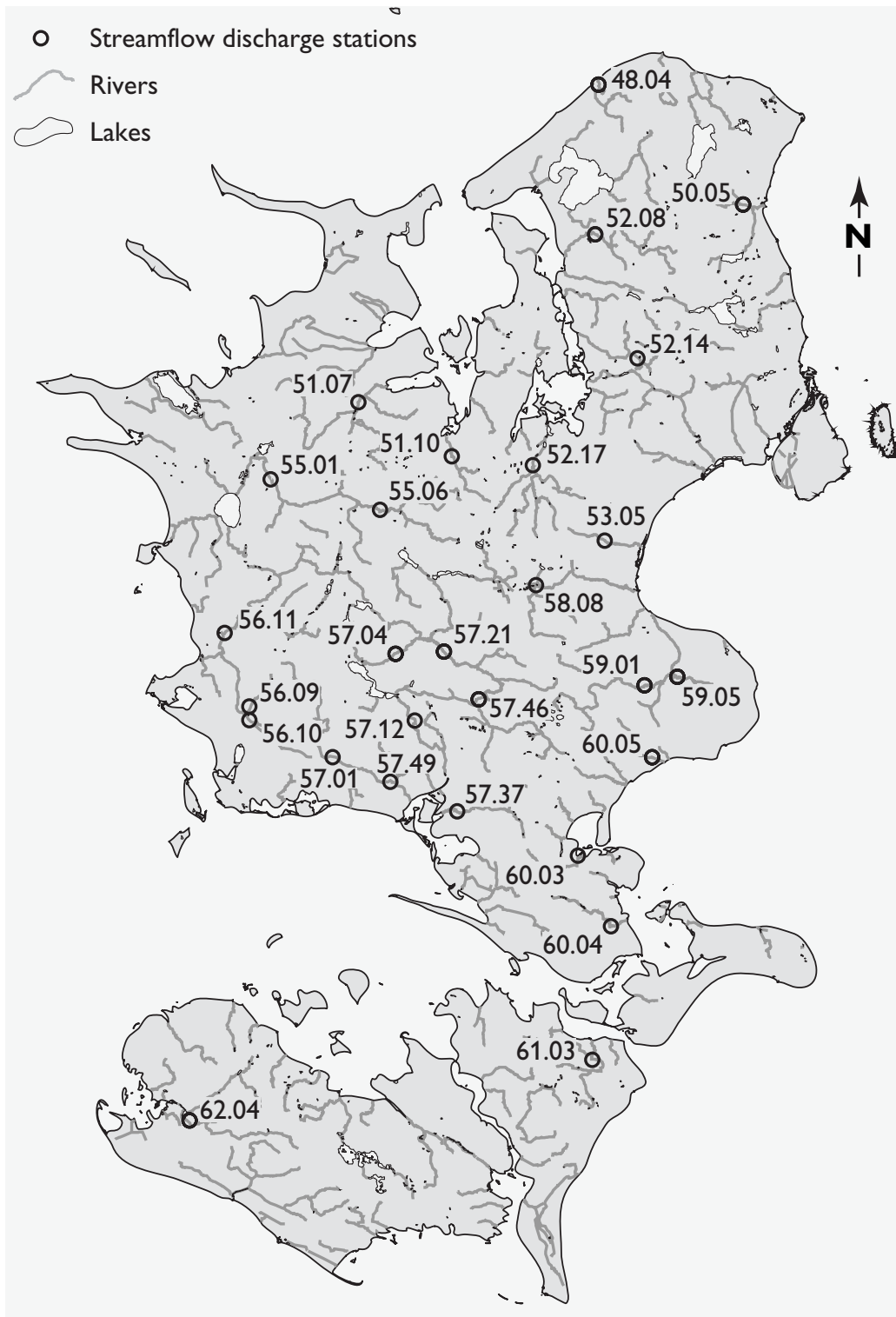
Der blev som en start foretaget en sensitivitetanalyse som viste hvilke parametre modellen var mest følsom overfor (Henriksen et al., 1997 og 1998):

- hydraulisk ledningsevne for kalk magasinet
- horisontal ledningsevne for sand
- vertikal ledningsevne for moræner
- specifik magasintal
- dræntidskonstant, og
- lækagefaktor for udveksling mellem grundvand og vandløb

Kalibreringen blev for Sjælland indledningsvist baseret på en "trial-and-error" procedure baseret på dynamiske kørsler for at fastlægge de frie parametre. Kalibreringsperioden blev valgt som 1988-90.

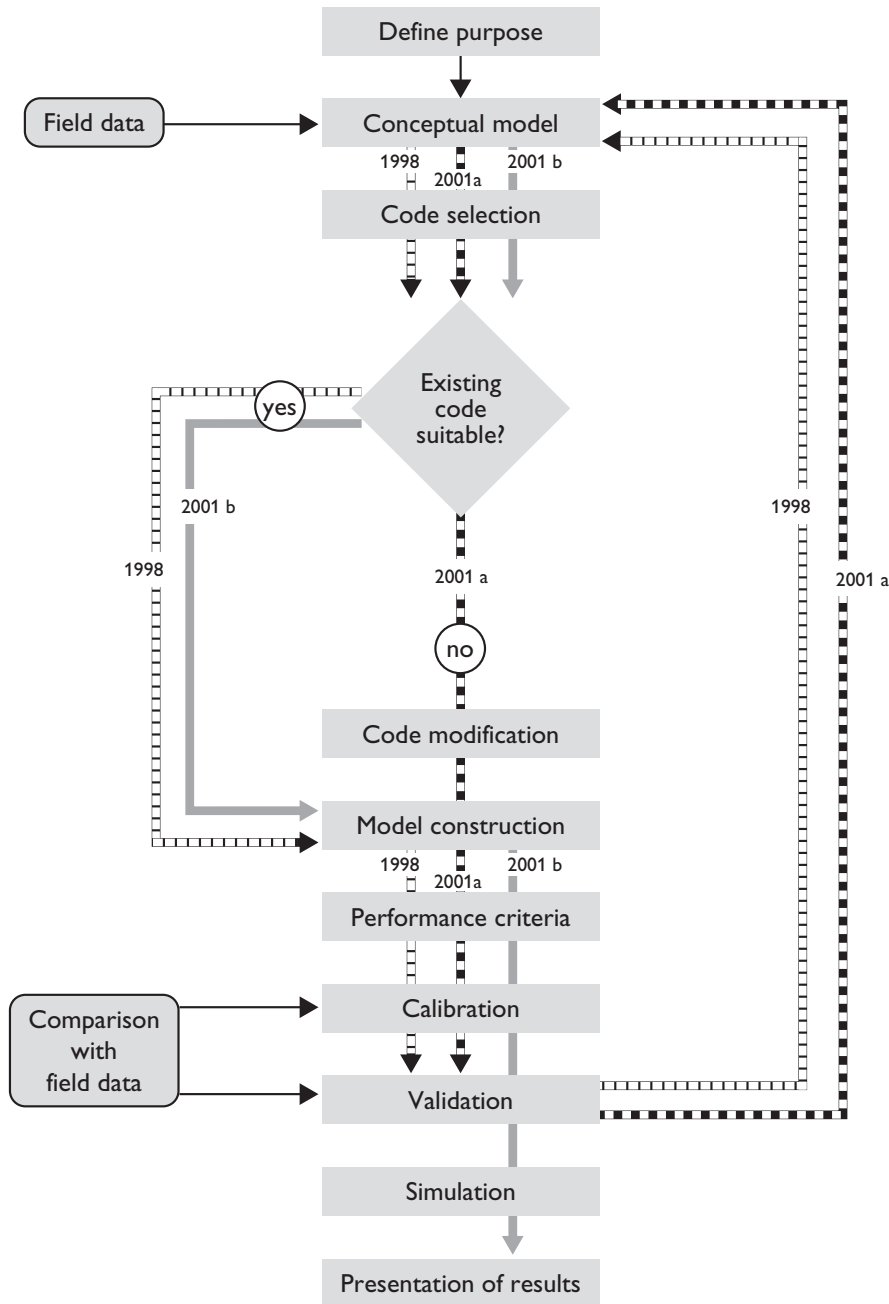
Kalibreringen blev udført parallelt for to af de 3 delmodeller for Sjælland (nr. 2 og 3). I første omgang blev modellen for Nordsjælland (nr. 4) ikke kalibreret. De optimale parametre afveg kun i begrænset grad mellem to kalibrerede modeller for Vest- og Sydsjælland (Henriksen et al., 1998). Der blev derfor valgt et sæt parametre som dækkede alle tre delmodeller for Sjælland (Model 1998), se figur 8.13.

Slutteligt blev de hydrauliske parametre for Sjælland overført til Fyn og testet her med nye klimainputdata fra DMI, til brug for den endelige version.



Figur 8.14 Udvalgte 28 vandføringstationer på Sjælland

Kalibreringen af Sjælland og Fyn er foretaget ved i princippet at gennemføre en modelprotokol i alt 3 gange. Princippet er skitseret i figur 8.15.



Figur 8.15 Sjællands- og Fynsmodel blev kalibreret og valideret i alt 3 gange

Den første kalibrering blev foretaget i 1997-98 (version 1998 i figur 8.15), og endte med rapportering af resultatet i rapporter for Fyn og Sjælland (Henriksen et al., 1997 og Henriksen et al., 1998). Til denne model blev anvendt data fra DJF's daværende 40x40 km klimagrid, baseret på gamle nedbørskorrekationer (1931-60) og modificeret Penman (men uden kyststationer): "Model version 1998".

I 2001 blev der gennemført en invers modellering med en stationær model for Nordsjælland og samtidig introduceret nye klimadata fra DMI. Forud var gået udvikling af en stationær løser til MIKE SHE, som gav mulighed for automatisk kalibrering (invers modellering). Der

blev anvendt trykniveau observationer som kalibreringsmål (RMS). Dette blev gennemført ved at koble MIKE SHE "i stationær mode" og UCODE. Tre parametre blev optimeret ved den inverse modellering, nemlig hydraulisk ledningsevne for opsprækket moræneler, moræneler og sand. Endelig blev parameterværdier for frit magasintal, overflademagasiner og dræntidskonstanten fastlagt ved hjælp af dynamisk simulering ("trial-and-error") for perioden 1988-90, med daglige afstrømningsdata som kalibreringsmål. De optimerede parameterværdier blev efterfølgende overført til modellerne for Vest- og Sydjælland: "Model version 2001a".

Det viste sig imidlertid, at der med de nye tal var en alvorlig vandbalancefejl i Model 2001a, som var baseret på nye klimadata fra DMI's 40x40 km net (baseret på nye nedbørskorrekationer baseret på håndtal for 1961-90 og modificeret Penman fordampning. Derfor blev der foretaget en korrektion af nettonedbøren fra rodzonemodellen med en faktor 0.71 (Nordsjælland), 0.77 (Vestsjælland), 0.75 (Sydsjælland) og 0.75 (Fyn) i inputtet til det øverste lag i grundvandsmodellen, baseret på sammenligning af resultater fra de større oplande på Sjælland og Fyn. Herefter blev der gennemført en invers modellering af de 3 parametre der også blev optimeret i Model 2001a, med det reducerede nettonedbørsinput, hvorefter modellen blev kørt dynamisk for de 3 delområder: "Model version 2001b".

Model valideringen for Model 1998 bestod af følgende metodik:

- en ordinær split-sample test på anden periode (1991-96) end anvendt til kalibrering (1988-90)
- simulering for Nordsjælland for perioden 1991-96 med samme parametre som bestemt for de to andre delmodeller. Denne valideringstest kan klassificeres som en proxy-basin test (Klemes, 1986), og angiver modellens evne til simulering for andre dele af landet uden egentlig kalibrering

For Model 2001a, hvor simuleringerne blev gentaget med et modificeret nettonedbørs input (nye data fra DMI), blev en noget tilsvarende metodik taget i anvendelse:

- en ordinær split-sample test på en anden periode (1991-96) for Nordsjælland
- en proxy-basin test for Vest- og Sydsjælland for 1991-96 med de samme parametre, som blev fastlagt ved kalibreringen for Nordsjælland

For model 2001b blev der anvendt samme testmetodik som for Model 2001a. I tabel 8.6 er resultaterne af valideringstest i forhold til målt afstrømning sammenfattet for Sjælland og Fyn. Det fremgår at resultatet med korrektion af nettonedbøren generelt har været "forbløffende" godt, i betragtning af de opnåede valideringsresultater for bl.a. R^2 , se også figurer 8.16.

Den aggregerede score vist i tabel 8.7 giver et letforståeligt overblik af modellens performance, i forhold til de 3 forskellige modelversion og de 3 benyttede kriterier. Model 2001b har på alle måder en performance som er bedre eller lige så god som de to andre modelversioner.

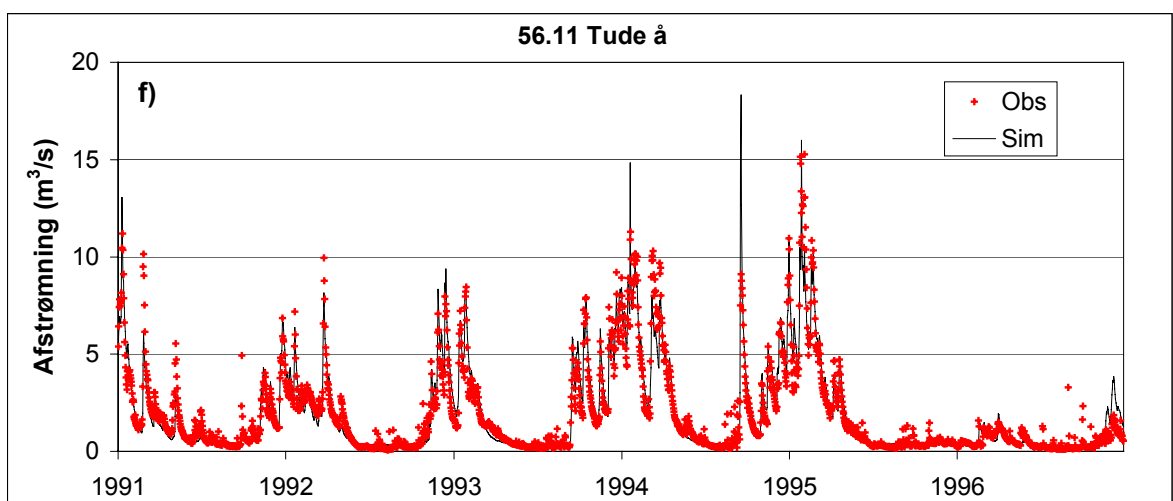
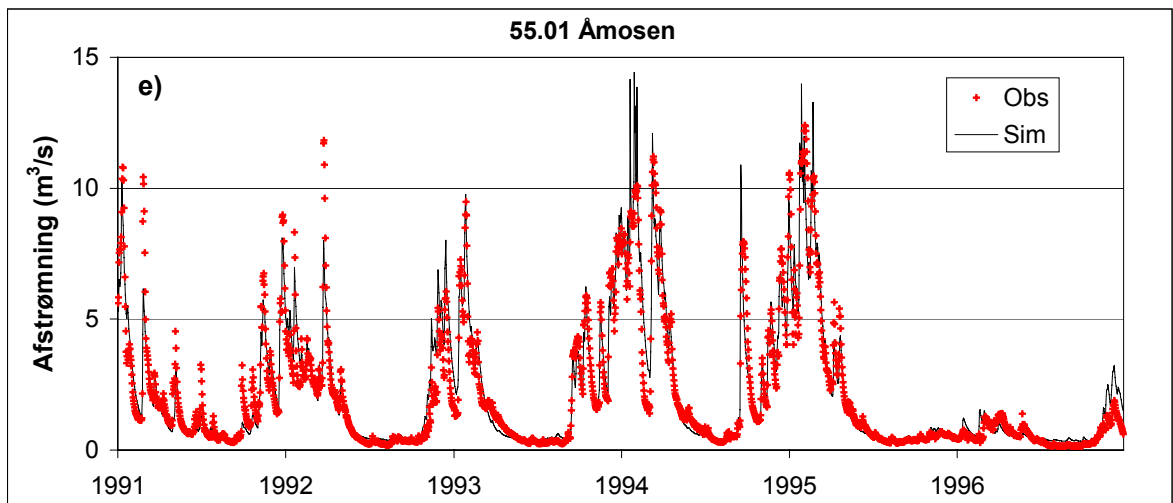
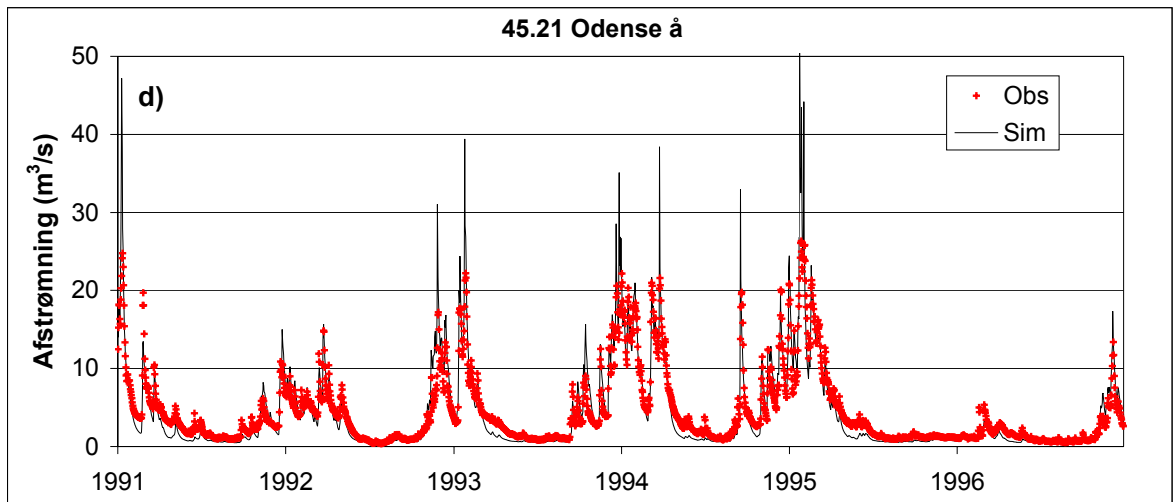
Valideringstest Øerne	Vandføringsstation Navn (opland, km ²)	Vandførings- Stationsnr.	R ²	F _{Bal} (%)	
Fyn (DK delmodel 1)	Storå (137 km ²)	43.04	0.38	-14	
	Vindinge å (128 km ²)	44.08	0.77	-8	
	Odense å (486 km ²)	45.21	0.81	4	
	Stavids å (78 km ²)	45.22	0.62	-18	
	Lunde å (36 km ²)	45.23	0.81	10	
	Vejrup å (42 km ²)	45.25	-0.15	-25	
	Brende å (102 km ²)	46.02	0.89	1	
	Hårby å (79 km ²)	46.04	0.55	-7	
	Stokkebæk (53 km ²)	47.10	0.83	23	
	Kongshøj å (54 km ²)	47.12	0.69	34	
	Hundstrup å (58 km ²)	47.15	0.88	19	
	Vestsjælland (DK delmodel 2)	Tuse å (107 km ²)	51.07	0.91	6
		Åmose å (289 km ²)	55.01	0.91	-4
		Åmose å (112 km ²)	55.06	0.90	-9
Seerdrup å (68 km ²)		56.09	0.89	-7	
Bjerge å (57 km ²)		56.10	0.66	-43	
Tude å (259 km ²)		56.11	0.90	-2	
Saltø å (64 km ²)		57.01	0.77	-26	
Suså (601 km ²)		57.04	0.94	9	
Suså (754 km ²)		57.12	0.93	4	
Suså (258 km ²)		57.21	0.91	3	
Suså (112 km ²)		57.46	0.86	-11	
Saltø å (151 km ²)		57.49	0.86	-4	
Sydsjælland (DK delmodel 3)		Flads å (68 km ²)	57.37	0.80	11
		Tryggevælde å (129 km ²)	59.01	0.78	17
	Krogbæk (44 km ²)	59.05	-0.04	-55	
	Mern å (43 km ²)	60.04	0.87	-8	
	Tubæk å (54 km ²)	60.03	0.69	34	
	Vivede mølleå (27 km ²)	60.05	0.56	-44	
	Fribrødre å (55 km ²)	61.03	0.73	-19	
Ryde å (87 km ²)	62.04	0.74	4		
Nordsjælland (DK delmodel 4)	Højbro å (36 km ²)	48.04	0.80	-9	
	Nivå (50 km ²)	50.05	0.80	3	
	Elverdam å (35 km ²)	51.10	0.68	0	
	Havelse å (103 km ²)	52.08	0.81	14	
	Værebros å (108 km ²)	52.14	0.56	-19	
	Lavring å (66 km ²)	52.17	0.87	6	
	Skensved å (25 km ²)	53.05	0.83	3	
	Slimminge å (55 km ²), ¹	58.08	0.82	-13	

¹) Opland skåret midt over, udtræk fra DK-Suså 500 submodel hvor hele oplandet er med, Henriksen (2002)

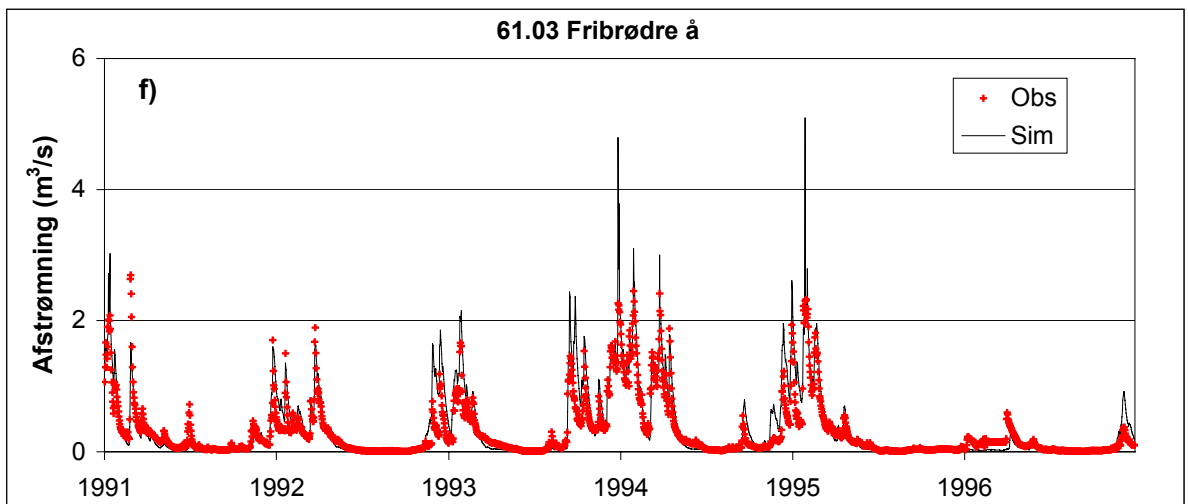
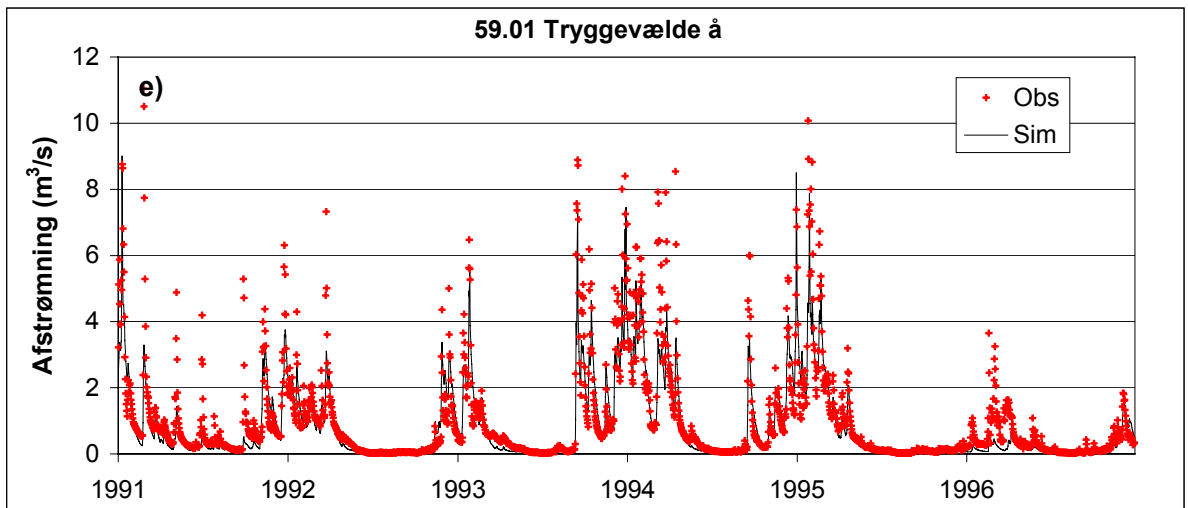
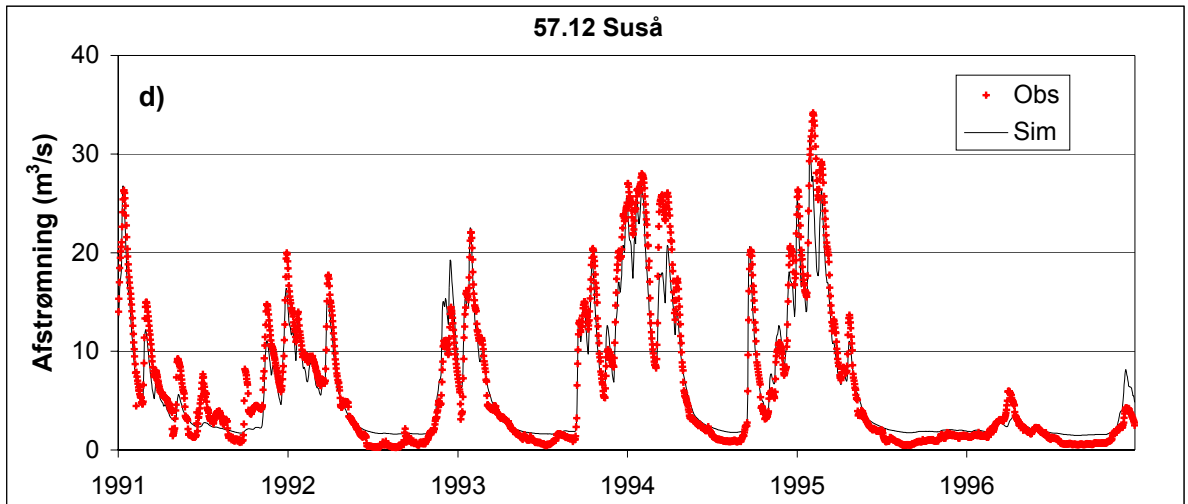
Tabel 8.6 Valideringstests for Sjælland

Delmodel	RMS	R ²	Fbal
Fyn	★★★★	★★★★	★★★
Vestsjælland	★★★	★★★★★	★★★★
Sydsjælland	★★	★★★★	★★★
Nordsjælland	★★★★	★★★★	★★★★

Tabel 8.7 Valideringstest resultat for Fyn og Sjælland



Figur 8.16 Valideringstest resultat for Model version 2001b for vandføringsstationer på Øerne



Figur 8.16 (fortsat)

I tabel 8.8 er vist de kalibrerede parameterværdier for de tre modeller for Sjælland.

Governing parameters for groundwater flow									
Geological layer	Horizontal hydraulic conductivity [m/s]			Vertical hydraulic conductivity [m/s]			Specific yield [m/m]		Storage coefficient [m ⁻¹]
	1998	2001a	2001b	1998	2001a	2001b	1998	2001a,b	1998/2001a,b
Layer 1 (Fractured clayey till)	1×10^{-5}	2×10^{-5}	1.45×10^{-5}	1×10^{-7}	2×10^{-7}	1.45×10^{-7}	0.25	0.06	0.0001
Layers 2, 4, 6, 8 and 10 (Clayey till)	1×10^{-7}	1.8×10^{-8}	1.9×10^{-8}	1×10^{-9}	1.8×10^{-9}	1.9×10^{-9}	0.25	0.06	0.0001
Layers 3, 5, 7 and 9 (Sand)	1×10^{-4}	1.9×10^{-4}	1.35×10^{-4}	1×10^{-5}	1.9×10^{-5}	1.35×10^{-5}	0.25	0.26	0.0001
Layer 11 (Chalk and limestone)	Distrib.	Distrib.	Distrib.	Distrib.	Distrib.	Distrib.	0.25	0.25	0.0001

Governing parameters for surface water flow			
	1998	2001a	2001b
Surface Manning (M) roughness [m ^{1/3} /s]	2	2	2
Surface detention storage [m]	0.02	0.01	0.01
Drainage time constant [s ⁻¹]	8×10^{-7}	7×10^{-8}	7×10^{-8}
Channel flow Manning (M) coefficient [m ^{1/3} /s]	20	20	20
Aquifer river leakage coefficient (distributed) [s ⁻¹]	1×10^{-7} and 5×10^{-10}	1×10^{-7} and 5×10^{-10}	1×10^{-7} and 5×10^{-10}

Tabel 8.8 Kalibrerede parametre for Model 1998 og Model 2001b

For Fyn er anvendt lidt ændrede parametre i forhold til Sjælland. Hydraulisk ledningsevne for lag 1 opsprækket moræneler: $K_{x,1}$ er for Fyn 1.5×10^{-5} m/s mod 1.45×10^{-5} m/s for Sjælland. Hydraulisk ledningsevne for moræneler i lag 2, 4, 6 og 8: $K_{x,2,4,6,8}$ er for Fyn 2.0×10^{-8} m/s mod 1.8×10^{-8} m/s for Sjælland. Vertikal hydraulisk ledningsevne for moræneler i lag 2, 4, 6, og 8: $K_{z,2,4,6,8}$ er for Fyn 5.0×10^{-9} m/s mod 1.9×10^{-9} m/s for Sjælland. Hydraulisk ledningsevne for sandlag 3, 5, 7: $K_{x,3,5,7}$ er for Fyn 1.5×10^{-4} m/s mod 1.35×10^{-4} m/s for Sjælland.

For Fyn er den specifikke ydelse i kalken (frit magasin) sat til 0.15 mod 0.25 for Sjælland. Endelig er lækagekoefficient for vandløbsbunden distribueret i 3 klasser, hhv. 2×10^{-6} , 2×10^{-8} og 2×10^{-10} s⁻¹.

8.10 Kalibrerings- og valideringsmetodik for Jylland

8.10.1 Observationsdata og kalibreringsmetodik for Jylland

Delmodellerne for Jylland blev kalibreret inverst baseret på en stationær model. Som kalibreringstargets blev der anvendt observationer af hydraulisk trykniveau samt afstrømningsdata.

De observerede trykniveaudata stammer fra Jupiter databasen, hvorfra observationer foretaget efter 1970 er anvendt. I de terrænnære beregningslag er der relativt mange data til rådighed, og det har været nødvendigt at foretage en reduktion, hvilket er sket efter følgende retningslinier: (1) i modeller repræsenteres hver grid celle ved ét simuleret trykniveau, i tilfælde hvor der er flere observationsboringer indenfor én grid celle er der anvendt en midlet værdi, (2) i boringer med mere end én observation er der foretaget en aritmetrisk midling af data, og (3) observationsværdier, der afviger markant fra det generelle trykniveaubillede i området, er elimineret. Efter reduktionen af trykniveau observationerne var der ca. 15.000 observationer til rådighed for kalibrering og validering. Fordelingen af trykniveau observationerne fremgår af tabel 8.9

Tabel 8.9 Trykniveau observationer anvendt til kalibrering og validering for de seks delmodeller i Jylland fordelt på beregningslag.

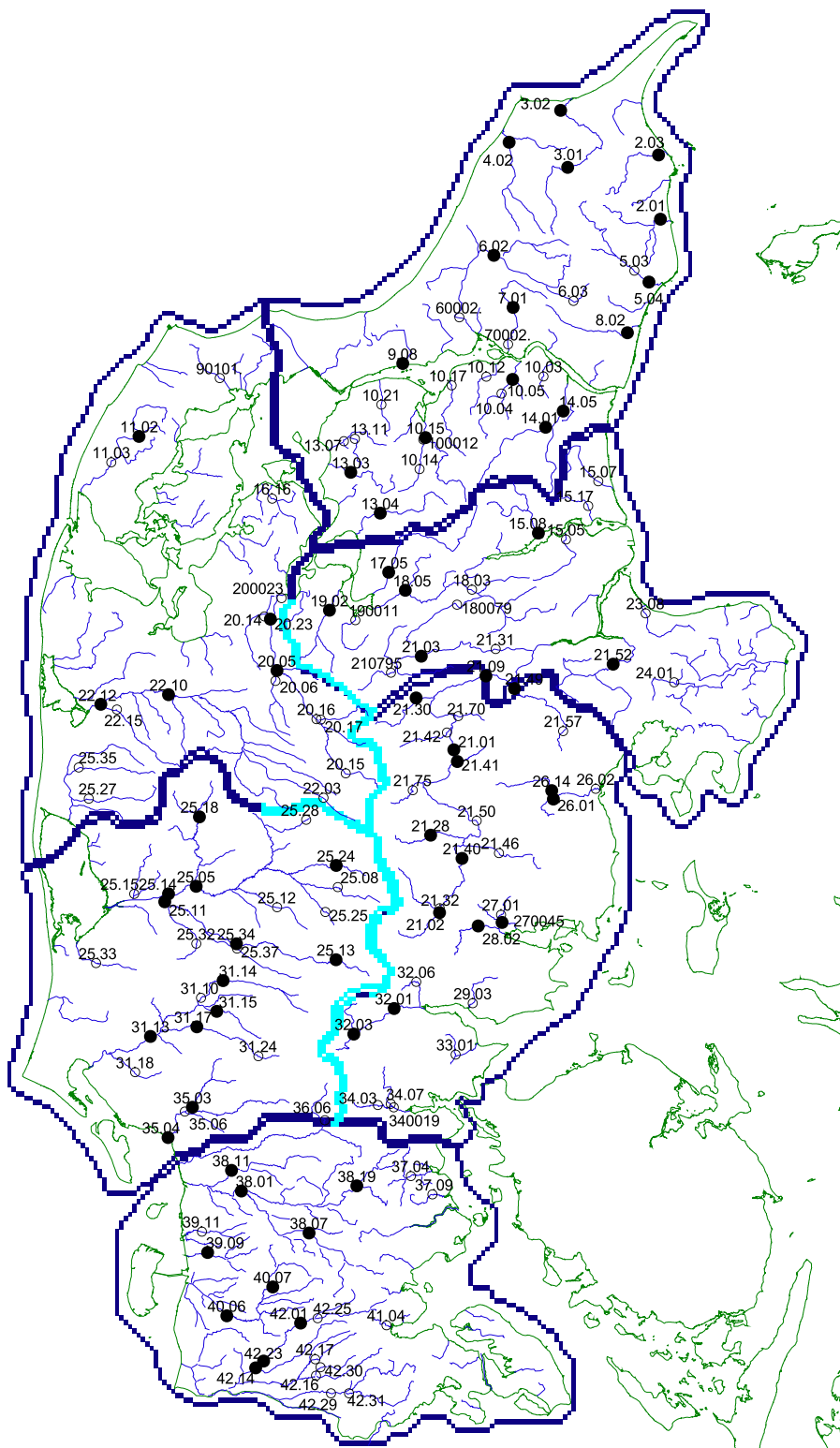
Lag	Syddjylland		Sydvestjylland		Sydostjylland		Vestjylland		Østjylland		Nordjylland	
	laggrænser kote	antal obs.	laggrænser kote	antal obs.	laggrænser kote	antal obs.	laggrænser kote	antal obs.	laggrænser kote	antal obs.	laggrænser kote	antal obs.
1	topo-Var.	221	topo-Var.	169	topo-Var.	156	topo-Var.	170	topo-Var.	60	topo-Var.	234
2	Variabel		Variabel	321	Variabel	721	Variabel	610	Variabel	243	Variabel	383
3	Variabel	191	Variabel	292	Variabel	932	Variabel	520	Variabel	519	Variabel	487
4	Var.- -10	177	Variabel	177	Variabel	583	Variabel	396	Variabel	488	Variabel	520
5	-10 - -20	207	Var.- -10	139	Var.- -10	252	Var.- -10	354	Var.- -10	341	Var.- -10	490
6	-20 - -30	156	-10 - -20	123	-10 - -20	122	-10 - -20	392	-10 - -20	295	-10 - -20	569
7	-30 - -40	94	-20 - -30	102	-20 - -30	92	-20 - -30	234	-20 - -30	193	-20 - -30	374
8	-40 - -50	44	-30 - -40	69	-30 - -40	47	-30 - -40	140	-30 - -40	149	-30 - -40	215
9	-50 - -60	20	-40 - -50	94	-40 - -50	29	-40 - -50	88	-40 - -50	87	-40 - -50	103
10	-60 - -70	13	-50 - -60	66	-50 - -60	11	-50 - -60	66	-50 - -60	59	-50 - -60	59
11	-70 - -80	13	-60 - -80	67	-60 - -70	12	-60 - -80	51	-60 - -80	51	-60 - -80	43
12	-80 - -90	10	-80 - -100	53	-70 - -80	9	-80 - -100	22	-80 - -100	10	-80 - -100	7
13	-90 - -100	12	-100 - -120	30	-80 - -100	4	-100 - -130	17	-100 - -130	5	-100 - -130	3
14	-100 - -120	19	-120 - -140	9	-100 - -220	1	-130 - -190	9	-130 - -190	0	-130 - -190	1
15	-120 - -140	16	-140 - -190	4			-190 - -250	0	-190 - -250	0	-190 - -250	0
16	-140 - -180	18	-190 - -250	0								
17	-180 - -220	6										
Sum		1217		1715		2971		3069		2500		3488

Der er ikke foretaget nogen vurdering af de observerede trykniveaudata mht., hvornår på året de er målt. Det antages imidlertid, at målingerne er gennemført jævnt fordelt over året (for alle boringerne under ét) og at observationerne i middel repræsenterer en gennemsnitstilstand i reservoiret.

Da der anvendes en stationær model vil usikkerheden på trykniveaudata pga. ikke-stationære effekter være signifikant. Desuden vil der optræde måle- og modelfejl (samlet benævnt observationsfejl) som skyldes måleusikkerhed, ikke beskrevet variation i topografi, interpolation af beregnet trykniveau, usikkerhed mht. den vertikale placering af filtersætning samt den numeriske repræsentation af denne, og ikke modelleret geologisk heterogenitet. Tilsammen vurderes usikkerheden på trykniveaudata at variere fra 3 til 5 m (udtrykt ved standardafvigelsen). Den største usikkerhed er tillagt observationer fra de øverste beregningslag, dels pga. en markant effekt fra den grove beskrivelse af topografien (1 x 1 km grid), dels pga. usikkerhed på placering og indvindingsgrad fra terrænnære markvandsboringer.

I hver submodel blev der udvalgt afstrømningsstationer ud fra følgende betingelser: (1) stationen skal være en fast vandføringsstation, (2) kun vandløbsstationer med et opland større end 50 km² medtages, (3) vandføringen må ikke i nævneværdig grad være påvirket af reguleringer eller store opstrøms reservoirer (f.eks. søer). På baggrund af disse kriterier blev der udvalgt 114 vandføringsstationer for hele Jylland, fordelt som angivet på figur 8.17. Da der anvendes midlede input værdier (nettonedbør og oppumpning) i den stationære kalibrering, er det ligeledes en midlet vandføring der er anvendt som kalibreringstarget (Sonnenborg et al., 2003). Det er vurderet at usikkerheden på en middelvandføring er i størrelsen af 5 – 10%.

For alle delmodeller blev den ydre rand defineret sammenfaldende med de topografiske oplande for vandløbene. Indledningsvis blev det antaget at afgrænsningen mellem delmodeller var sammenfaldende med et grundvandsopland, hvorfor der blev anvendt en no-flow randbetingelse langs den del af modelranden der er beliggende på land. Validiteten af en no-flow rand blev analyseret ud fra tilgængelige potentiale kort, erfaringer fra tidligere projekter samt sammenholdelse af simuleret og observeret afstrømning i vandløb med oplande grænsende op til modelranden. På denne vis blev der konstateret et behov for en østgående strømning mellem delmodellerne 6 (sydvest) og 7 (sydøst), 8 (vest) og 7 samt 8 og 9 (øst). Endvidere blev der anvendt en sydgående strømning fra model 8 til 6 i den østlige del ved Karup Å opland, figur 8.17. Alle randbetingelser blev indlagt som en gradient randbetingelse, hvor der blev anvendt komplementære gradienter for de tilstødende delmodeller. Gradient-randen blev anvendt langs hele den vertikale udstrækning, med undtagelse af det øverste beregningslag, hvor der blev anvendt en no-flow betingelse begrundet i en antagelse af at grundvandets strømningsretning er dikteret af topografien. Mod hav blev der anvendt fastholdt tryk ($H = 0$ m) for beregningsceller beliggende i havet. Under havbund blev der anvendt en no-flow rand som ydre randbetingelse.



Figur 8.17: Placering af vandløbsstationer anvendt under kalibrering (alle cirkler) og validering (udfyldte cirkler), samt angivelse af gradientrande (lys blå) for delmodellerne i Jylland. Ved alle nord-syd gående gradientrande er der indlagt strømning fra vest mod øst, ved den øst-vest gående rand er strømmingen fra nord mod syd.

Som for Sjællandsmodellen blev der ligeledes antaget en ensformig fordeling af de hydrauliske parameterværdier over hele modelområdet, med undtagelse af K-værdierne for kalken, hvor der blev anvendt distribuerede værdier baseret på prøvepumpningsdata. Under hele kalibreringsfasen blev forholdet mellem den horisontale og den vertikale hydrauliske ledningsevne fastholdt på 10 ($K_x = 10 K_z$). De horisontale hydrauliske ledningsevner for hver geologisk enhed blev kalibreret inverst baseret på en stationær model. For kalken blev der optimeret en faktor der blev multipliceret med den beregnede K fordeling i kalken, herved var det muligt at justere størrelsen af K-værdierne uden at ændre den relative rumlige fordeling. Endvidere blev det forsøgt at inddrage såvel dræntidskonstanten samt vandløbslækage koefficienten i de inverse optimering. Ikke overraskende var det ikke givtigt at anvende en stationær model til kalibrering af drænkonsstanten, idet denne parameter primært beskriver dynamiske forhold. I enkelte tilfælde blev der opnået rimelige estimater på vandløbslækage koefficienten, men idet denne parameter ligeledes er af dynamisk karakter, har det været nødvendigt med en dynamisk finkalibrering af denne parameter. Magasintallene blev fundet ved dynamiske kalibrering af delmodellerne Syd- og Sydvestjylland. Modelresultaterne udviste kun begrænset følsomhed overfor magasintallene, og ud fra princippet om anvendelse af så få frie parametre som muligt, blev det besluttet ikke at medtage magasintallene i kalibrering af de øvrige modeller. Modelresultaternes begrænsede følsomhed overfor magasintallene skal ses i lyset af, at der er kalibreret og valideret mod et gennemsnitligt hydraulisk trykniveau samt afstrømningsdata.

Til kalibrering er der anvendt input data og observationer for perioden 1991-1995 (1990-94) for Sydjylland. Som kalibreringstargets i den inverse optimering er der anvendt et middel grundvandspotentiale fra 1970 til i dag. Potentialeobservationerne blev vægtet i forhold til den estimerede standardafvigelse, dvs. varierende fra 5 m i de øvre beregningslag til 3 m i de dybere lag. Middelfafstrømningen blev anvendt for alle vandløbsstationer og vægtet svarende til en standardafvigelse på 10 % af middelfafstrømningen. Indledningsvist blev der forsøgt med forskellige vægtninger af potentiale målingerne i forhold til afstrømningsdataene, hvor det blev fundet at ovenstående vægtning gav en robust invers kalibrering.

Som beskrevet tidligere blev der identificeret en vandbalancefejl for Sjællands modellerne. På tilsvarende vis var det ikke muligt at lukke vandbalancen for Jylland uden introduktion af en korrektionsfaktor for nettonedbøren (se kapitel 7).

Kalibreringen blev foretaget iterativt, efter følgende metodik

1. Stationær invers kalibrering.
2. Dynamisk kørsel for kalibreringsperioden.
3. Analyse af randbetingelser, dynamisk fit til afstrømningsobservationer samt vandbalance, var disse acceptabel stoppede kalibreringen, ellers blev der foretaget justeringer og loop tilbage til 1.

Idet der blev opereret med komplementære randbetingelser for tilstødende delmodeller, var det nødvendigt at kalibrere delmodellerne 6, 7, 8 og 9 parallelt.

Nordjylland (delmodel 10) udskiller sig fra de øvrige delmodeller idet denne ikke blev kalibreret. Her blev der anvendt en proxy basin test, hvor de kalibrerede værdier fra delmodel 9 (Østjylland) blev anvendt. Eneste ændring der blev foretaget for delmodel 10 var en korrektion af nettonedbøren.

Delmodellerne blev valideret vha. dynamiske simuleringer for perioden 1996 – 1999 (1990-98 for Syddjylland). Idet der ikke var tilstrækkelige data til en dynamisk validering af trykni-veauet, blev der anvendt et middel potentiale for valideringsperioden til beregning af RMS-værdien. Vandbalancen (F_{Bal}) og fittet til afstrømningsdataene (R^2) blev beregnet på baggrund af daglige observationer af afstrømningen for vandføringsstationer med et oplandsareal på $\geq 100\text{km}^2$, figur 8.17.

8.10.2 Kalibrerings- og valideringsresultat for Jylland

De kalibrerede parameterværdier for delmodellerne for Jylland er præsenteret i tabel 8.10. Den inverse kalibrering viste sig at være robust for alle fem kalibrerede delmodeller, og der blev opnået realistiske parameterværdier for de geologiske enheder. For de enkelte geologiske enheder gav kalibreringen en relativ lille variation mellem de forskellige delmodeller, kun enheden "glimmersilt/ler" ses at variere over to dekader.

Tabel 8.10 Kalibrerede parametre for delmodellerne for Jylland.

Parameter	Geol. enhed	Syd	Sydvest	Sydpst	Vest	Øst [†]
K _x : Horizontal hydraulisk ledningsevne [m/s] (K _z =1/10K _x)	smeltevands- sand	1.40E-03	2.19E-04	5.00E-04	6.80E-04	3.95E-04
	ler	1.76E-07	6.21E-08	2.28E-07	1.23E-07	7.97E-08
	kvartssand	6.19E-04	2.78E-04	4.57E-04	9.89E-04	2.18E-04
	glimmersand	2.09E-04	9.79E-05	1.05E-04	2.94E-05	3.54E-05
	glimmersilt/ler	3.04E-08	1.63E-06	2.62E-07	1.50E-06	1.07E-07
	kalk			7.40E-05*	7.40E-05*	distribueret
	salt				1.00E-10 [†]	1.00E-10 [†]
S _s : Spændt magasintal	smeltevands- sand	1.00E-04	5.00E-05	5.00E-05	5.00E-05	5.00E-05
	ler	1.00E-03	5.00E-05	5.00E-05	5.00E-05	5.00E-05
	kvartssand	1.00E-04	5.00E-05	5.00E-05	5.00E-05	5.00E-05
	glimmersand	1.00E-04	5.00E-05	5.00E-05	5.00E-05	5.00E-05
	glimmersilt/ler	1.00E-03	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-04
	Kalk			1.00E-04	1.00E-04	1.00E-04
	Salt				1.00E-04	1.00E-04
S _y : Frit magasintal	Smeltevands- sand	0.2	0.25	0.25	0.25	0.25
	Ler	0.07	0.06	0.05	0.05	0.05
	Kvartssand	0.3	0.2	0.25	0.25	0.25
	Glimmersand	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	glimmersilt/ler	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05
	Kalk			0.1	0.05	0.05
	Salt				0.01	0.01

*) For Sydpst- og Vestjylland er udbredelse af kalk begrænset, her er der anvendt en middelværdi af den optimerede K-værdi for kalk i Sjællandsmodellen.

†) De kalibrerede værdierne for Østjylland blev også anvendt for delmodel 10 (Nordjylland)..

†) Ej kalibreret

Tabel 8.11 viser den aggregerede score for delmodellerne for Jylland. Som det fremgår af tabellen opnår alle modellerne en score på tre stjerner (god) eller derover på nær Østjylland og Nordjylland, der kun får en score på 2 stjerner for R^2 værdien. Den lave score på R^2 værdien for de to modeller skyldes et dårligt fit til de vandløb der har udspring ved randen

mellem de to modeller, som det ses for stationerne 15.08 og 14.01 i tabel 8.12 (se også figur 8.16 for placering).

Tabel 8.11 Resultat af validering for Jylland.

Delmodel	RMS	R ²	F _{bal}
Sydjylland	★★★★	★★★	★★★
Sydvestjylland	★★★★★	★★★	★★★★★
Sydøstjylland	★★★	★★★	★★★
Vestjylland	★★★★★	★★★	★★★
Østjylland	★★★★	★★	★★★★
Nordjylland	★★★★	★★	★★★★

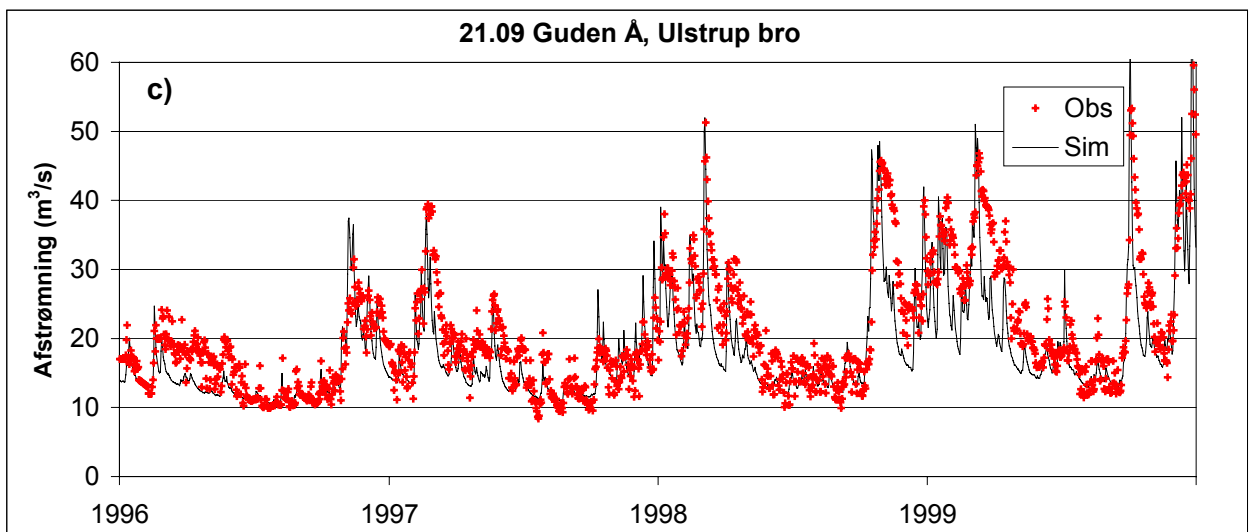
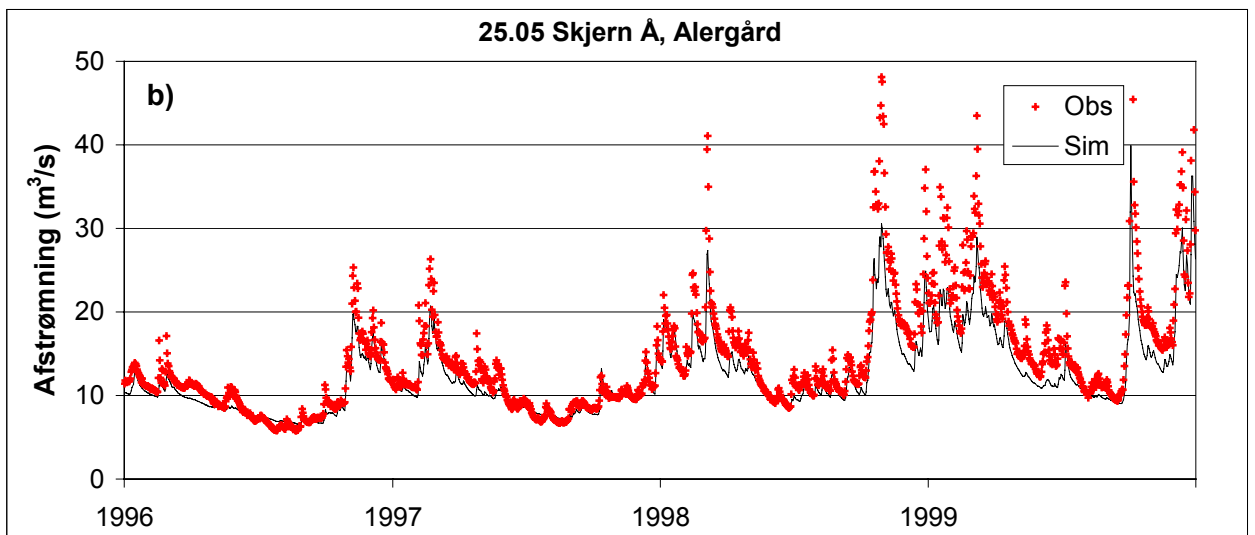
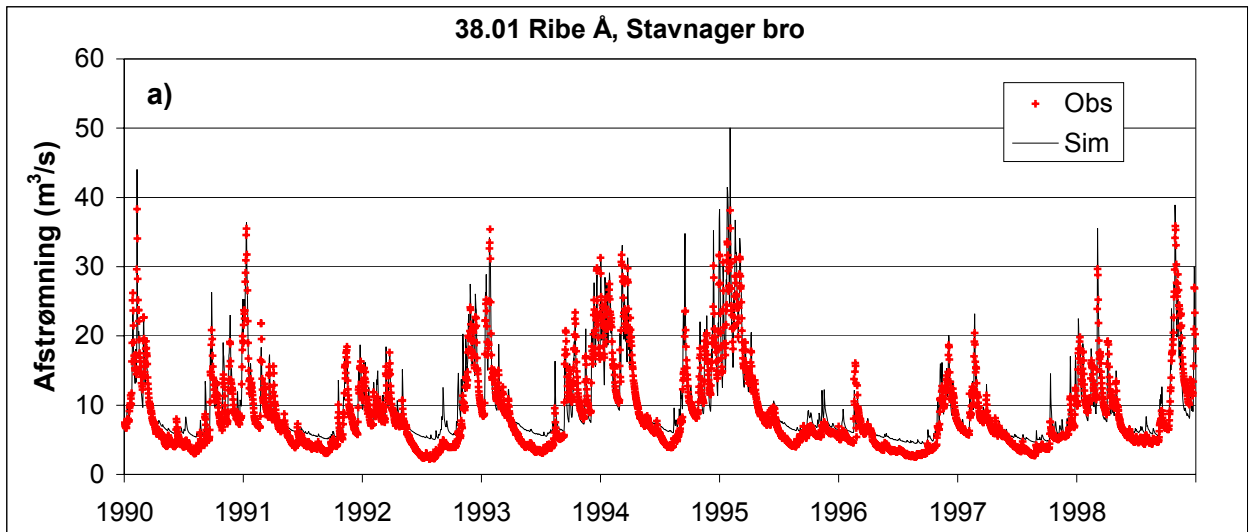
For hver delmodel blev der anvendt én nedbørskorrektionsfaktor, der blev fundet ved en midling af vandbalancerne ved vandføringsstationerne vægtet efter oplandsarealet. Herved opnås at den globale vandbalancen for delmodeller er acceptabel, men for de enkelte vandføringsstationer vil der imidlertid være nogle hvor der simuleres for meget vand hhv. for lidt vand, som det fremgår af kolonnen F_{bal} i tabel 8.12. I delmodellerne Sydjylland, Sydvestjylland og Sydøstjylland blev der ikke lokaliseret områder hvor F_{bal} var systematisk negativ eller positiv. For Østjylland er der størst problemer med vandbalancen for vandløb i den nordlige del af området mod Nordjylland, hvor der simuleres en for stor afstrømning (negativ F_{bal}). Nedbørsreduktionen for Nordjylland er primært et resultat af negative F_{bal} for vandløbene i den sydlige del, hvorimod vandbalancen for de nordlige vandløb peger på en mindre reduktion af nettonedbøren. Vestjylland udskiller sig fra de øvrige modeller, idet der her er anvendt en opjustering af nettonedbøren. Dette er hovedsagelig en konsekvens af positive F_{bal} i den vestlige del af området.

Som det fremgår af ovenstående, er der behov for en mere detaljeret undersøgelse af den beregnede nettonedbør samt den stedlige fordeling (se også kapitel 6). En yderligere reduktion af nettonedbøren alene vil imidlertid næppe være tilstrækkelig til at opnå en R² score på tre stjerne for vandløbene ved modelranden mellem Øst- og Nordjylland. For disse vandløb gælder det generelt, at den simulerede afstrømning ved peak-flow er signifikant større end observeret, figur 8.18. De høje simulerede afstrømninger ved peak-flow skyldes primært et væsentligt bidrag fra overfladeafstrømning samt drænstrømning. En reduktion af nettonedbøren vil give en væsentlig reduktion af overfladisk afstrømning samt drænafstrømningen, men vil samtidigt påvirke base-flowet så dette bliver mindre end det observerede. For at opnå en markant reduktion af peak-flowet, uden væsentlig påvirkning af base-flowet, skal der i modellen tillades en større nedadrettet strømning, eller en større fordampning. Det er derfor sandsynligt, at der foruden en mere detaljeret undersøgelse af den stedlige fordeling af nettonedbøren, er behov for en gentolkning af den hydrogeologiske model i området mellem Øst- og Nordjylland, evt. suppleret med nye nettonedbørsberegninger vha. rodzone modulet.

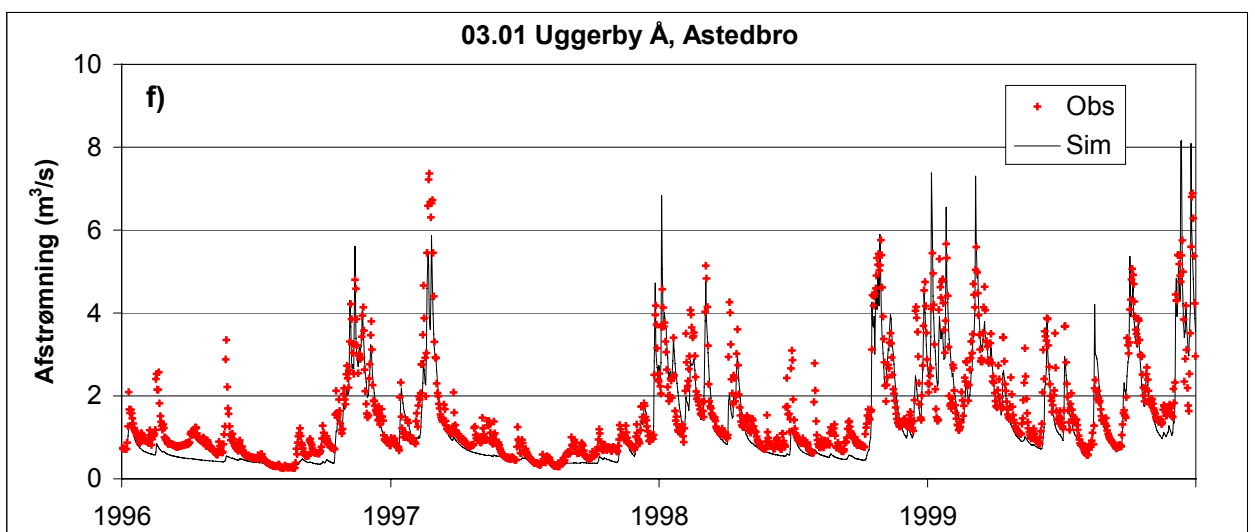
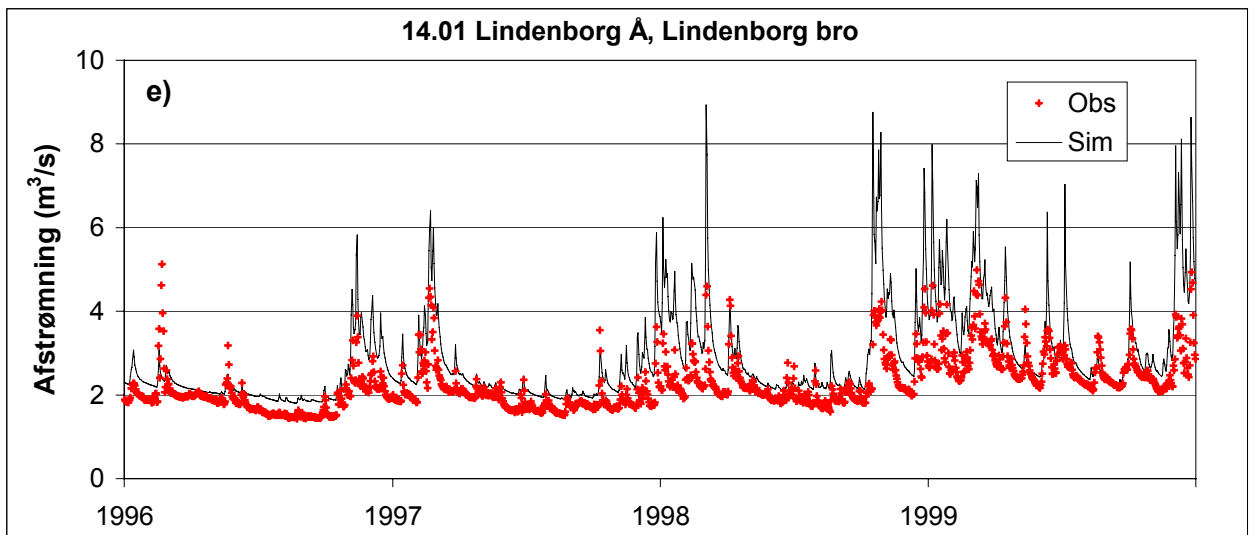
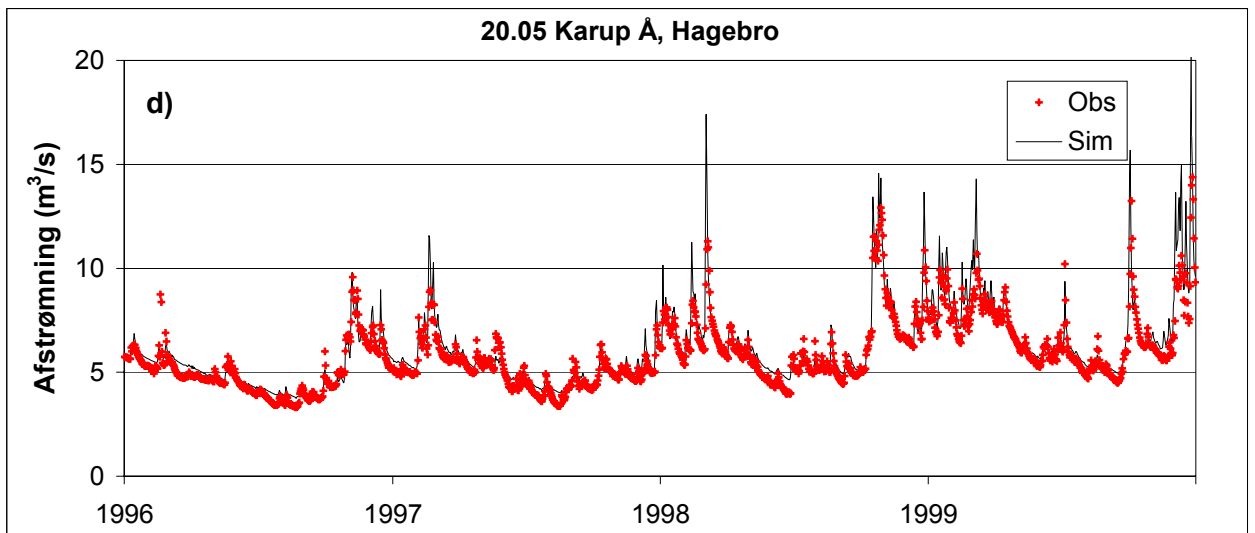
Tabel 8.12 Sammenfatning af valideringsresultater for udvalgte vandføringsstationer i Jylland.

Valideringstest Jylland	Vandføringsstation Navn (opland, km ²)	Vandførings- Stationsnr.	R ²	F _{Bal} (%)
Sydjylland delmodel 5	Ribe å (675 km ²)	38.01	0.89	-8
	Gram å (277 km ²)	38.08	0.73	-22
	Brede å (290 km ²)	40.06	0.85	+4
	Vidå (248 km ²)	42.14	0.67	+26
Sydvestjylland delmodel 6	Skjern å (1055 km ²)	25.05	0.80	+11
	Omme å (612 km ²)	25.11	0.78	-0.8
	Varde å (814 km ²)	31.13	0.85	+2
	Sneum å (223 km ²)	35.03	0.76	+8
Sydøstjylland delmodel 7	Guden å (377 km ²)	21.40	0.78	-6
	Guden å (1790 km ²)	21.09	0.62	+13
	Århus å (119 km ²)	26.01	0.70	+14
	Bygholm å (154 km ²)	28.02	0.88	-5
	Vejle å (198 km ²)	32.01	0.74	+7
Vestjylland delmodel 8	Årup å (105 km ²)	11.02	0.73	+7
	Karup å (522 km ²)	20.05	0.75	-6
	Storå (825 km ²)	22.10	0.77	+13
Østjylland delmodel 9	Villestrup å (126 km ²)	15.08	-1.74	-8
	Skals å (556 km ²)	18.05	0.68	+0.1
	Alling å (238 km ²)	21.52	0.63	+0.2
	Ryom å (76 km ²)	24.01	0.67	-5
Nordjylland delmodel 10	Herreds å (105 km ²)	10.15	0.56	-0.8
	Trend å (116 km ²)	13.03	0.79	-1
	Lindborg å (214 km ²)	14.01	-1.14	-27
	Uggerby å (153 km ²)	03.01	0.78	+14
	Lindholm å (106 km ²)	07.01	0.79	-16

Observeret og simuleret afstrømning for valideringsperioden er vist på figur 8.17 for udvalgte stationer.



Figur 8.18 Observeret og simuleret afstrømning ved udvalgte stationer

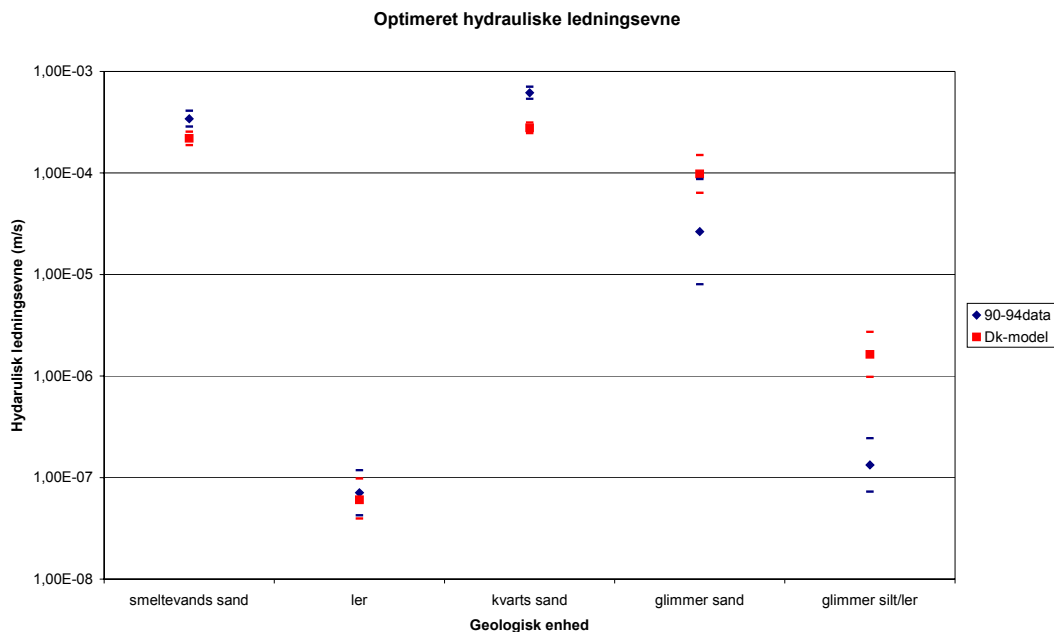


Figur 8.18 (fortsat) Observeret og simuleret afstrømning ved udvalgte stationer

Test af betydning af kalibreringsdatasæt for Sydvestjylland

For Sydvestjylland er der foretaget en analyse af betydning af kalibreringsdata for den inverse optimering af parameterværdier, herunder robusthed og betydning for grundvandsdannelse.

I figur 8.19 er vist resultatet af en optimering med modellen for Sydvestjylland ud fra pejledata fra 1971-2000, som anvendt for DK-model, sammenlignet med et udvalg fra 1990-94.



Figur 8.19 Optimering af frie parametre for to forskellige sæt pejledata: 1990-94 og DK-model (1971-2000). På figuren er vist optimerede værdier og 95 % konfidensgrænser.

Det fremgår af figur 8.19 at der optimeres relativt forskellige værdier, afhængigt af de to datasæt. Valg af kalibreringsgrundlag (i dette tilfælde pejlinger) bidrager derfor til den samlede usikkerhed for simuleringresultater. Specielt set stor forskel, ca. 0,5-1 dekade for estimer af miocænt kvartssand, glimmersand og glimmersilt.

Betydningen for grundvandsdannelsen til beregningslag 5 er ved de to parametersæt afgrænset til max 6 %. Det vil sige at usikkerhedsestimateret for DK-model deloplande på +/- 20 % fortsat holder. En anden interessant konklusion ud fra ovenstående er, at 95 %'s konfidensintervaller "underestimerer" den samlede usikkerhed. Man bør derfor ikke ukritisk benytte disse intervaller til fx usikkerhedsvurderinger på partikelbanesimuleringer, fordi den faktiske usikkerhed som vist i figur 8.19 er meget større, end det interval en enkelt invers modellering når frem til.

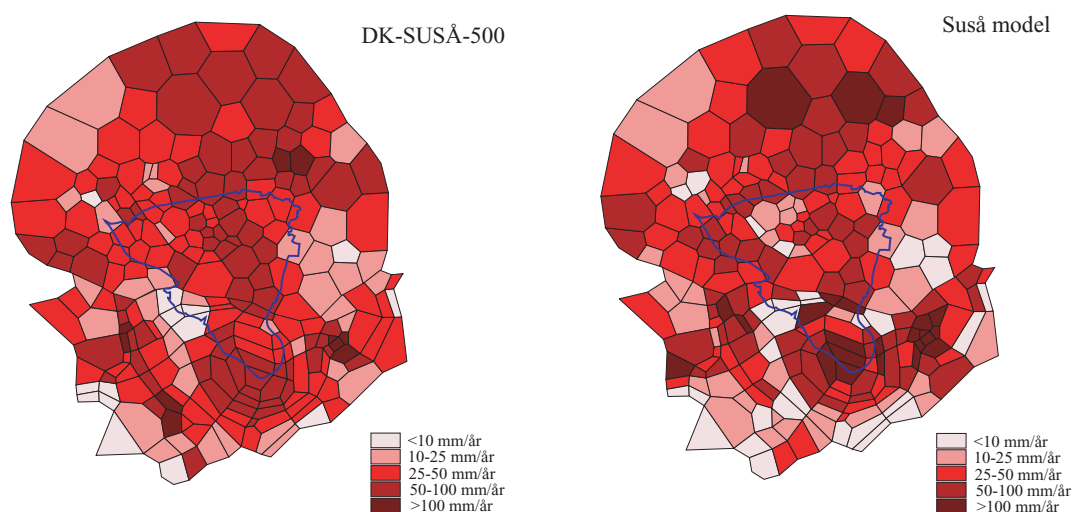
8.11 Sammenligning af DK-model med Suså model

DK-modellen for Sjælland er desuden søgt valideret ved sammenligning med Suså model.

Principperne bag Suså model er nærmere beskrevet i Refsgaard og Stang (1981). Der henvises i øvrigt til notatet om sammenligningen af DK-model og Suså model (www.vandmodel.dk).

Suså modellen er en distribueret dynamisk hydrologisk model som for grundvandsdelens vedkommende er horisontalt diskretiseret i et polygonnet med 112 polygoner (Nord) med varierende "maskevidde", og som vertikalt er opdelt på et øvre sekundært (frit) magasin, over et nedre primært magasin (i kalken, artesiske). De to magasiner er adskilte af et lav-permeabelt morænelerslag. Det totale modelområde for Suså Nord er ca. 1100 km².

Kun for det primære magasin er der mulighed for simulering af horisontal strømning mellem polygonerne. Det øvre sekundære magasin har vandspejl et par meter under terræn, og styrer vandudvekslingen mod vandløb, dræn mv. Det øvre sekundære magasin er yderligere distribueret indenfor hver polygon ud fra topografi og består i alt af 448 elementer (altså en underinddeling med 4 elementer indenfor hver polygon. Udvekslingen mellem det øvre sekundære magasin og det nedre primære magasin er bestemt af trykniveauforskelle og lækagekoefficienter på subpolygonniveau (448 elementer / "Hypsografisk kurve"), dvs. baseret på det frie vandspejlsniveau (fastlagt ud fra en "lumped beskrivelse" på subpolygonniveau) og "middelvandspejlet" fra det primære magasin (defineret ud fra de 112 polygoner).

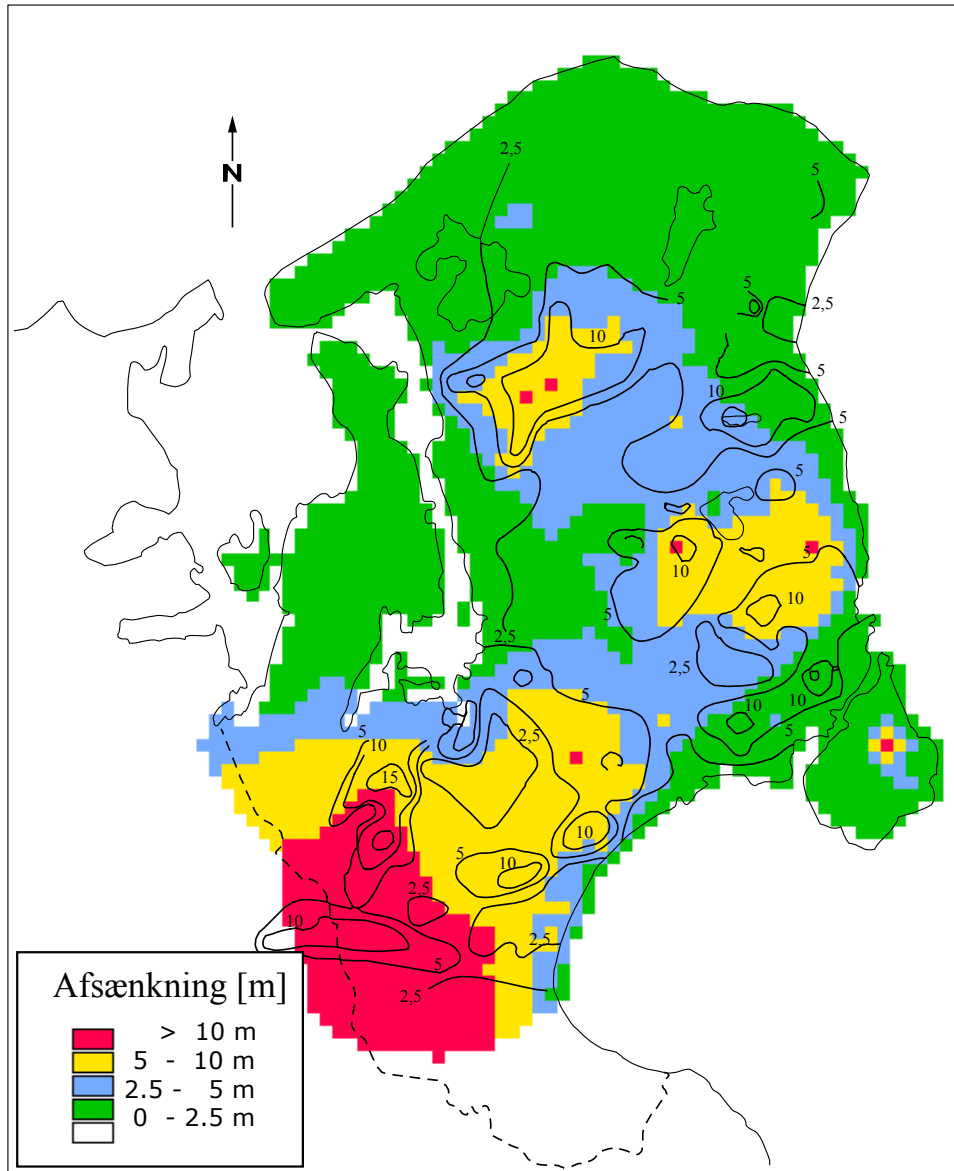


Figur 8.20 Simuleret grundvandsdannelse til primært magasin for Suså området. DK-model giver en grundvandsdannelse =46 mm/år til beregningslag 3, Suså model = 51 mm/år til det primære magasin (Henriksen, 2002).

Sammenligningen har vist, at de to modeller, som begge er grundigt kalibrerede og validerede, giver en simuleret grundvandsdannelse til det "primære magasin" (beregningsslag 3 i DK-model er anvendt), som kun afviger 10 % for oplandet som helhed. Ca. 1/3 af polygonerne har i begge modeller "stor grundvandsdannelse", 1/3 har i begge modeller "lille grundvandsdannelse" og for den sidste 1/3 af polygonerne er de to modeller "uenige om grundvandsdannelsen". Det er meget forskellige modelkoncepter, men langt hen ad vejen giver modellerne samme svar, dog ikke for 1/3 af området.

8.12 Validering i forhold til ældre data for Hovedstadsregionen

Endelig er modellen søgt valideret ved en kørsel uden oppumpning og sammenligning af simuleret afsenkning i nuværende situation, baseret på pejledata fra før indvindingen for alvor slog igennem i Nordsjælland (se nedenstående figur 8.21). Der blev simuleret afsenkninger som ud fra en visuel bedømmelse var i god overensstemmelse med "observationer" (Krüger, 1981-figur 3.8 p. 21).



Figur 8.21 Simuleret afsenkning med DK-model vist med farveskala i forhold til målt afsenkning i fra situationen før vandindvindning til ca. 1980 situationen (Krüger, 1981-figur 3.8 p. 21).

Der er desuden foretaget en sammenligning af simuleret minimumsvandføring i Havelse å uden oppumpning og sammenligning med afstrømningstal fra før Havelse, Attemose og Strø's etablering i midten af 50'erne. Såvel den %-vise påvirkning af baseflow og den ab

solutte simulering af minimumsafstrømning i Havelse år "ramte" indenfor max. ca. 10 % afvigelse mellem DK-model og observationsdata (Hedeselskabet, 1982; Hedeselskabet, 1978) fra Havelse å. Vandføringen i Havelse å er reduceret fra ca. 1 l/skm² til 0.6 l/skm² altså med ca. 40 % som følge af etablering af kildepladser i oplandet i 50'erne. Der er simuleret en reduceret minimumsvandføring som følge af indvinding på 45 %. For Græse å er der simuleret en reduktion af minimumsvandføringen med 75 % mod en målt reduktion på ca. 55 %.

Disse afvigelser er små i forhold til usikkerheden på minimumsafstrømningen bedømt ud fra ca. 10 årige afstrømningsmålinger, men der er generelt behov for nærmere vurderinger af usikkerheder på simuleret minimumsvandføring, fra andre oplande hvor der foreligger gode registreringer af ændringer som følge af vandindvinding.

8.13 Betydning af konceptuel model for indvindingsoplande og opholdstider

Der er foretaget en sammenligning af DK-model og Esbjerg modellen (Harrar et al., 2003), hvor forskellige geologiske modeller, herunder DK-modellen er sammenlignet mht. indvindingsoplande, opholdstider osv. Resultatet viste at den konceptuelle model og den geologiske tolkning har stor betydning for opholdstider, men lille betydning for indvindingsoplande og grundvandsdannelser for lidt større områder, for oplandet til Sneum å.

Blot der foreligger et rimeligt datagrundlag til kalibrering af trykniveau, så betyder den valgte konceptuelle model mindre. Det er en områdeintegrerede parameterfastsættelse, som er styrende for indvindingsoplandets beliggenhed, i område som fx Vestjylland.

Man kan ikke herudfra konkludere, at dette også er tilfældet i Østdanmark. Her kunne man formode, at beliggenheden af dybe dale, har stor betydning for indvindingsoplandene. Men såfremt der er dybe dale, om forskellige konceptuelle modeller har beskriver disse på lidt forskellig vis, så er hypotesen altså, ud fra undersøgelsen for Sneum å (Harrar et al., 2003), at indvindingsoplandet og grundvandsdannelsen til dybere magasiner ikke vil afvige særligt meget, selv om den konceptuelle model afviger noget.

Der er behov for mere viden om opholdstider i grundvand, herunder fastsættelse af porøsitet. Denne viden bør opbygges med fundering på bl.a. aldersdatering, hvor behovet især er at finde egnede metodikker til at datere grundvand med aldre på 50-500 år. Denne viden er vigtig, såfremt vi skal kunne sige noget om udviklingstakter i fx forurening fra øvre magasiner, mod dybere magasiner. Der kræves mere detaljerede modeller end DK-modellen til sådanne studier, og OSD modeller vil evt. kunne bidrage med estimer af opholdstider og strømningsveje.

8.14 Referencer

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J. (1986a) An Introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and Philosophy of a Physical-Based, Distributed Modeling System. *Journal of Hydrology*, 87, 45-59.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J. (1986b) An Introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a Physically-Based, Distributed Modeling System. *Journal of Hydrology*, 87, 61-77.
- d'Agnese, F.A. C.C., Hill, M.C. and Turner, A.K. (1999) Death Valley regional ground-water flow model calibration using optimal parameter estimation methods and geoscientific information systems. *Advances in Water Resources*, 22(8), 777-790.
- Andersen, J.A., Refsgaard, J.C. and Jensen, K.H. (2001) Distributed hydrological modelling of the Senegal River Basin – model construction and validation. *Journal of Hydrology*, 247, 200-214.
- Andersen, L.J. (1973) Cyclogram technique for geological mapping of borehole data. *Geological Survey of Denmark, III rk.*, 41, 25 pp.
- Carlsson, L. and Gustafson, G. (1984) Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik (Test pumping as geohydrological investigation method). Byggeforskningsradet, Chalmers Tekniska Högskole, Göteborg. R41. (In Swedish)
- Christensen, S. (1994) Hydrological model for the Tude Å catchment. *Nordic Hydrology*, 25, 145-166.
- Christensen, B.C., Henriksen, H.J. and Nyegaard, P. (2000) Test af DK-modellens rodzonemodul (Test of the root zone module of the DK model). GEUS, Copenhagen. <http://www.vandmodel.dk/rodzonetest.pdf>. (In Danish).
- Dahl, M., Harrar, W.G., Henriksen, H.J. and Knudby, C.J. (1998) Intergrated hydrological modelling of freshwater resources in Denmark – Distribution of aquifer –river exchange parameters. *Gambling with Groundwater – Physical, Chemical, and Biological Aspects of Aquifer-Stream Relations*. Brahana et al. (eds.), 607-616.
- DHI (2000) MIKE SHE Water Movement User Manual. DHI Water & Environment, Hørsholm, Denmark.
- Fredericia, J. (1990) Saturated hydraulic conductivity of clayey till and role of fractures. *Nordic Hydrology*, 21, 119-132.
- Fredericia, J. (1991) Fractures in clayey till. Occurrence, genesis and hydrological significance. PhD-thesis. Institute for Geology and Soil Mechanics, Technical University of Denmark, Lyngby.
- Gelhar, L.W. (1986) Stochastic subsurface hydrology. From theory to applications. *Water Resources Research*, 22(9), 135S-145S.
- Gupta, H.V., Sorooshian, S. and Yapo, P.O. (1998) Toward improved calibration of hydrological models: multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resources Research* 34(4), 751-763.
- Hansen, S., Jensen, H.E., Nielsen, N.E. and Svendsen, H. (1991) Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the Danish simulation model Daisy, *Fertilizer Research*, 27, 245-259.
- Harlin, J. (1991) Development of a process oriented calibration scheme for the HBV hydrological model. *Nordic Hydrology*, 22, 15-36.

- Harrar, W.G. (1998) Personal communication.
- Harrar, B., Sonnenborg, T.S.O. and Henriksen, H.J. (2003) Capture zone, travel time and solute transport predictions using inverse modeling and different geological models. *Hydrogeology Journal* (in press).
- Henriksen, H.J. (1998) Climate change and available groundwater resources – the National Water Resources Model for Denmark. Proceedings of The Second International Conference on Climate and Water. Edited by Risto Lemmelä and Nea Helenius. Espoo, Finland, 17-20 August 1998. Vol. 3, 1459-1470.
- Henriksen, H.J. (2001) National Vandressourcemodel. Slutrapport for projektkontrakt 1996-2000 (National Water Resources Model, Final Report). GEUS Report 2001/29, Copenhagen (in Danish). http://vandmodel.dk/slutrapport_2001-29.pdf .
- Henriksen, H.J. (2001b) Fra PC-Jupiter til DK-modellen. *Geologi Nyt*, Nr. 3. 2001
- Henriksen, H.J., Knudby, C., Rasmussen, P. and Nyegaard, P. (1997) National vandressourcemodel. Modelopstilling og kalibrering for Fyn. GEUS rapport 1997/139. (In Danish)
- Henriksen, H.J., Trolborg, L., Knudby, C.J., Dahl, M., Nyegaard, P., Jakobsen, P.R. and Rasmussen, P. (1998) National Vandressource Model. Sjælland, Lolland, Falster and Møn. GEUS report 1998/109 (in Danish). <http://www.vandmodel.dk> .
- Henriksen H.J. and Stockmarr, J. 1999: Groundwater Resources in Denmark. Modelling and Monitoring. - IWSA World Water Congress. Technical Paper, Buenos Aires, Argentina, 20 - 26 September 1999. Special Subject No. 9 – Part 1 – Protection of Drinking Water Resources for Quality and Quantity – Groundwater and Surface Water, SS9-4 - SS9-11.
- Henriksen, H.J., Trolborg, L., Nyegaard, P., Sonnenborg, T.O., Refsgaard, J.C. and Madsen, B. (2003) Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark. *Journal of Hydrology* (in press 6886), 2003.
- Hill, M.C. (1998) Methods and guidelines for effective model calibration. U.S. Geological Survey, Water Resources Investigation Report 98-4005, Denver, Colorado, USA.
- Kaiser-Hill Company (2001) Model Code and Scenario Selection Report. Site-Wide Water Balance Rocky Flats Environmental Technology Site. Report 01-RF-00337. Febr. 2001. http://www.dhisoftware.com/mikeshe/download/rfets_2-20-01.pdf
- Klemes, V. (1986) Operational Testing of Hydrological Simulation. *Hydr. Sci. J.* 31(1), 13-24.
- Liden, R. (2000) Conceptual runoff model for material transport estimations. PhD dissertation. Report No. 1028, Lund Institute of Technology Sweden.
- Krüger, I. (1981) Grundvandsmodel for Hovedstadsregionen. Modelopstilling og kalibrering. København, Maj 1981. Hovedstadsrådet.
- de Lange, W.J. (1996) Groundwater modeling of large domains with analytic elements.
- Madsen, H. (2000) Automated calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology* 235(3-4), 276-288.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970) Riverflow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles. *J.Hydrol.*, 10, 282-290.
- Nielsen, S.A. and Hansen, E. (1973) Numerical simulation of the rainfall-runoff process on a daily basis. *Nordic Hydrology*, 4, 171-190.
- Nilsson, B., R.C. Sidle, K.E. Klint, C.E. Bøgild and K. Broholm (1997) Mass transport and scale-dependent hydraulic test in a heterogenous till and sand aquifer system.
- Pedersen, S.A.S. (1989) Jordartskort over Danmark, 1:200.000. Sjælland, Øer og Bornholm, map 4. Geological survey of Denmark, Copenhagen (Map of surface soil types, with English and German legend).
- Pedersen, S.A.S. (2000) Superimposed deformation in glaciotectonics. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 46, 125-144.

- Poeter, E. and Hill, M.C. (1999) UCODE, A computer code for universal inverse modeling. *Computer in Geosciences*, 25(4), 457-462.
- Refsgaard, J.C. (1997) Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 198, 69-97.
- Refsgaard, J.C. (2001) Discussion of model validation in relation to the regional and global scale. In: Anderson, M.G. and P.D. Bates (Eds.) *Model Validation: Perspectives in Hydrological Science*. John Wiley and Sons, 461-483.
- Refsgaard, J.C. and Stang, O. (1981) An Integrated groundwater/surface water hydrological model. *Suså Investigation*. Danish Committee for Hydrology, Report H13, 122 pp.
- Refsgaard, J.C. and Storm, B. (1995) MIKE SHE. In: V.P. Singh (Ed) *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publication, 809-846.
- Refsgaard, J.C., Sørensen, H.R., Mucha, I., Rodak, R., Hlavaty, Z., Bansky, L., Klucovska, J., Topolska, J., Takac, J., Kosc, V., Enggrob, H.G., Engesgaard, P., Jensen, J.K., Fiselier, J., Griffioen, J., and Hansen, S. (1998) An integrated model for the Danubian Lowland – Methodology and applications. *Water Resources Management*, 12, 433-465.
- Refsgaard, J.C., Thorsen, M., Jensen, J.B., Kleeschulte, S. and Hansen, S. (1999) Large scale modelling of groundwater contamination from nitrate leaching. *Journal of Hydrology*, 221, 117-140.
- Rosso, R. (1994) An introduction to spatially distributed modelling of basin response. In Rosso, R., Peano, A., Becchi, I., Bemporad, G.A. (Eds.), *Advances in Distributed Hydrology*. Water Resources Publications, 3-30.
- Sjørring, S. (1983) The glacial history of Denmark. In: Ehlers, J. (ed.) *Glacial deposits in north-west Europe*. A.A. Balkema, Rotterdam, 163-179.
- Sonnenborg, T.O. (2001) Calibration of flow model. In: Henriksen, H.J. (Ed) *Handbook in Hydrological Modelling*. Chapter 10, GEUS Report 2001/56, Copenhagen (In Danish).
- South Florida Management District (1997) Draft Documentation for the South Florida Water Management Model. Hydrological Systems Modeling Departement. Water Supply Division, SFWMD, West Palm Beach, Florida: http://glacier.sfwmd.gov/org/pld/hsm/models/sfwmm/fact_sht.htm .
- Surlyk, F. (1980) Denmark. In: Lorenz, C. and Aubouin, J. (eds.) *Geology of the European countries 1-4*, 1: Denmark, Finland, Iceland, Norway, Sweden. International Geological Congress, 26. Paris, July 1980.
- Wood, S.R. (1974) A catchment simulation model developed for urbanizing catchments with particular reference to the use of automatic optimization techniques. In: Proc. Of IFPF Conference on Computer Simulation of Water Resources Systems, Ghent, Belgium, 209-217.