

# God praksis i hydrologisk modellering

Jens Christian Refsgaard, Lars Troldborg, Hans Jørgen Henriksen,  
Anker Lajer Højberg, Rasmus Rønde Møller, Anne Mette Nielsen

G E O - V E J L E D N I N G 7

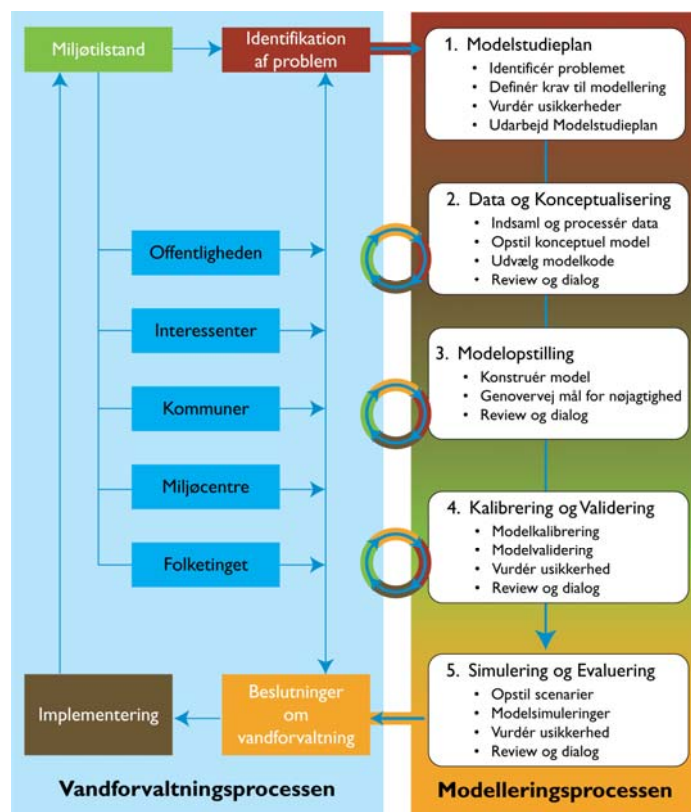




# God praksis i hydrologisk modellering

Jens Christian Refsgaard, Lars Troldborg,  
Hans Jørgen Henriksen, Anker Lajer Højberg,  
Rasmus Rønde Møller, Anne Mette Nielsen

GEO-VEJLEDNING 7



## **God praksis i hydrologisk modellering**

Geo-vejledning 7

Særudgivelse

Omslag: Henrik Klinge

Forsidefoto: Anne Mette Nielsen

Repro: GEUS

Oplag: 100

2010

ISBN tryk: 978-87-7871-280-6

ISBN web: 978-87-7871-281-3

Vejledningen kan hentes på nettet: [www.geus.dk](http://www.geus.dk)

Pris (indbundet): 200 kr.

© De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS  
Øster Voldgade 10  
DK-1350 København K  
Telefon: 38142000  
E-post: [geus@geus.dk](mailto:geus@geus.dk)

Udarbejdet i samarbejde med By- og Landskabsstyrelsen, Miljøministeriet.

## Indholdsfortegnelse

<b>Forord</b>	<b>5</b>
<b>1. Baggrund og formål</b>	<b>6</b>
<b>2. Indhold og anvendelse af denne Geo-vejledning</b>	<b>7</b>
2.1 Indhold.....	7
2.2 Anvendelse i grundvandskortlægningen.....	8
<b>3. God modelleringspraksis – videnstatus</b>	<b>9</b>
3.1 Danske og internationale vejledninger.....	9
3.2 Hvorfor benyttes hydrologisk modellering.....	9
3.3 Hvordan sikres god kvalitet i hydrologisk modellering .....	10
<b>4. God modelleringspraksis - vejledning</b>	<b>12</b>
4.1 Aktørerne og de fem trin i modelleringsprocessen .....	12
4.2 Trin 1 – Modelstudieplan .....	15
4.3 Trin 2 – Data og konceptualisering .....	16
4.4 Trin 3 – Modelopstilling.....	17
4.5 Trin 4 – Kalibrering og validering .....	18
4.6 Trin 5 – Simulering og evaluering .....	19
4.7 Vejledning i udvalgte opgaver.....	20
4.7.1 Valg af forskellige modeltyper til forskellige formål .....	20
4.7.2 Opstilling af konceptuel model.....	23
4.7.3 Behov for alternativ konceptuel model?.....	26
4.7.4 Review.....	28
4.7.5 Valg af kalibrerings- og valideringskriterier og mål for nøjagtighed .....	31
4.7.6 Modelkalibrering .....	35
4.7.7 Usikkerhedsanalyser .....	37
4.7.8 Modelvalidering .....	42
4.7.9 Modellens dokumenterede anvendelsesområde .....	45
4.7.10 Dokumentation af model.....	46
4.8 Nødvendige rammebetingelser.....	50
<b>5. Sammenfatning og konklusion</b>	<b>52</b>
<b>6. Referencer</b>	<b>54</b>
<b>Appendices</b>	
A: The MoST Knowledge Base – Tasks and Activities	
B: The MoST Knowledge Base – Methods	
C: The MoST Knowledge Base – Glossary	
D: Fastlæggelse af krav til RMS med konkret vurdering af usikkerhed på observationsdata, $S_{obs}$	
E: Korttemaer, figurer og tabeller fra modelarbejdet	
F: Templates	



## Forord

I december 2009 vedtog Styregruppen for den Nationale Grundvandskortlægning at nedsætte en projektgruppe, der skulle udarbejde en Geo-vejledning i hydrologisk modellering til grundvandskortlægning.

Projektgruppen bestod af:

- Jens Christian Refsgaard, GEUS (projektleder)
- Anker Lajer Højberg, GEUS
- Hans Jørgen Henriksen, GEUS
- Lars Troldborg, GEUS
- Rasmus Rønde Møller, GEUS
- Claus Holst Iversen, GEUS
- Flemming Jørgensen, GEUS
- Anne Mette Nielsen, GEUS
- Thomas Nyholm, Miljøcenter Aarhus
- Stefán Meulengracht Sørensen, Miljøcenter Ringkøbing

I forbindelse med projektet blev der nedsat en faglig følgegruppe bestående af repræsentanter fra miljøcentrene:

- Jens Asger Andersen, Miljøcenter Roskilde
- Dirk-Ingmar Müller-Wohlfeil, Miljøcenter Odense
- Clea Schneider, Miljøcenter Ribe
- Martin Skjøtt Linneberg, Miljøcenter Aalborg
- Claus Hakon Krabbesmark, Miljøcenter Nykøbing

Projektgruppen mødtes til et opstartsmøde 22. januar 2010 og til en workshop den 24. og 25. marts 2010. På workshoppen blev Geo-vejledningen diskuteret på baggrund af et rapportudkast fra GEUS og reviewkommentarer fra repræsentanter fra miljøcentrene (de to miljøcentermedarbejdere i projektgruppen) og fra to inviterede repræsentanter fra rådgiverne (Thomas Wernberg, ALECTIA og Jacob Birk Jensen, NIRAS).

Følgegruppen deltog i opstartsmødet og i workshoppen. I den afsluttende fase blev Geo-vejledningen sendt i høring hos følgegruppen, der fik mulighed for at kommentere på Geo-vejledningen. Styregruppen for den Nationale Grundvandskortlægning har godkendt den endelige Geo-vejledning.

# 1. Baggrund og formål

I Administrationsgrundlag for Miljøministeriets afgiftsfinansierede grundvandskortlægning er det angivet, at kortlægningen "... ofte kræver opstilling af en numerisk grundvandsmodel". Anvendelse af numeriske grundvandsmodeller beskrives her som en velegnet kortlægningsmetode til at "...beregne indvindings- og grundvandsdannende oplande, indvindings- og klimascenarier, grundvandsdannelse, grundvandets alder og grundvandets strømningsretning". I Administrationsgrundlaget er det endvidere anført, at "GEUS udarbejder Geo-vejledninger, der har til formål at sikre, at kortlægningen gennemføres på et tilstrækkeligt højt fagligt niveau, og at kortlægningen sker på en ensartet måde i hele landet."

Formålet med projektet er at udarbejde en Geo-vejledning i hydrologisk modellering til grundvandskortlægningen, der netop kan bidrage til en sikring af, at opstilling og anvendelse af hydrologiske modeller sker på en metodisk ensartet måde i hele landet samt på et tilstrækkeligt højt fagligt niveau.

Geo-vejledningen kan på den måde inddrages i de miniudbud, som miljøcentrene udarbejder til opstilling af hydrologiske modeller under By- og Landskabsstyrelsens rammeudbud for grundvandskortlægning (gældende fra 1. marts 2010).

## 2. Indhold og anvendelse af denne Geo-vejledning

### 2.1 Indhold

Der findes meget skriftligt materiale med vejledninger til god modelleringspraksis for grundvandsmodellering. Vidensbasen i Kvalitetssikringsværktøjet MoST, som blev udviklet under EU projektet HarmoniQuA ([www.harmoniqua.org](http://www.harmoniqua.org)), fylder fx mere end 500 sider på print med detaljerede anvisninger til, hvilke aktiviteter der med fordel kan gennemføres, og hvilke værktøjer og metodikker der er til rådighed til at understøtte forskellige aktiviteter. Ligeledes indeholder lærebogen "Håndbog i Grundvandsmodellering" (Sonnenborg og Henriksen, 2005) mere end 300 sider med konkrete anbefalinger og eksempler på, hvorledes forskellige delopgaver med fordel kan gennemføres. Endelig findes der detaljerede specifikationer af dataformater og leverancer til databaser, som fx hvilke modeldata, der skal lægges ind i GEUS' modeldatabase.

Hensigten med denne Geo-vejledning er ikke at vejlede om specifikke administrative overvejelser, såsom fastsættelse af usikkerhedsmarginer på statistiske oplandsafgrænsninger, idet de kan findes i ovenstående litteratur.

Geo-vejledningen fokuserer på, hvordan en modelleringsproces styres, således at der til opnåelse af et givet modelleringsmål, kan benyttes en ensartet metodik og sikres et tilstrækkeligt højt fagligt niveau. Selve Geo-vejledningen indeholder ikke detaljerede beskrivelser af alle de aktiviteter, der skal gennemføres. Her henvises der i stedet til eksisterende beskrivelser i andre dokumenter.

I kapitel 3 præsenteres et kort resume af den internationale videnstatus med hensyn til god modelleringspraksis med fokus på de generelle konklusioner om hvilke principper, der bør følges for at sikre en god kvalitet i hydrologisk modellering.

Kapitel 4 indeholder selve vejledningen. Her er modelleringsprocessen opdelt i fem trin. For hvert trin opridses de tilhørende modelleringsopgaver med konkrete henvisninger til, hvor mere detaljeret vejledning findes. De to gennemgående referencer er Håndbogen i Grundvandsmodellering (Sonnenborg og Henriksen, 2005) og MoST vejledningen i god modelleringspraksis. Den sidste er tilgængelig via kvalitetssikringsværktøjet MoST, som frit kan downloades fra [www.harmoniqua.org](http://www.harmoniqua.org). En forkortet og lidt mere læsevenlig udgave, velegnet til opslagsværk, er udarbejdet som pdf-filer og vedlagt i Appendices A-C. Herudover er der udarbejdet nyt vejledningsmateriale i afsnittene 4.7.1 - 4.7.10 om de emner og problemstillinger, der erfaringsmæssigt er vigtigst, og i nogle tilfælde vanskelige at gennemføre, og hvor det eksisterende vejledningsmateriale trænger til forbedringer ud fra opnåede erfaringer. Endelig indeholder kapitel 4 en diskussion af forudsætninger for anvendelse af Geo-vejledningen.

Kapitel 5 indeholder en konklusion med et sammendrag af de væsentligste elementer i Geo-vejledningen.

## 2.2 Anvendelse i grundvandskortlægningen

Denne Geo-vejledning omfatter hele modelleringsprocessen. I grundvandskortlægningen er den proces typisk opdelt i flere faser, og nogle gange med forskellige organisationer, som udfører af de forskellige faser. Der kan derfor være brug for at plukke og anvende større eller mindre klumper af Geo-vejledningen.

- *Miniudbud.* Forberedelsesfasen med beslutninger om betingelser i udbuddet, er beskrevet i denne Geo-vejlednings Trin 1 (Kapitel 4). En del af disse aktiviteter og beslutninger er allerede beskrevet i Administrationsgrundlaget for Miljøministeriets afgiftsfinansierede grundvandskortlægning. Den resterende del af denne Geo-vejlednings Trin 1 beskriver udarbejdelse af udbud samt udvælgelse af rådgiver til modelleringsopgaven. Beskrivelserne af de forskellige delopgaver i denne Geo-vejlednings Trin 1, specielt specifikationerne til modelleringen i det konkrete opland (Tabel 1, opgave 1.4 og Tabel 6) er relevante her.
- *Geologisk model.* Et væsentligt element i denne Geo-vejlednings Trin 2 (Kapitel 4, Tabel 2) er opstillingen af den konceptuelle model, hvor den geologiske model udgør kernen. Set fra et modelleringssynspunkt vil det være ideelt, at den geologiske modellering udbydes i sammenhæng med den hydrologiske modellering. Hermed vil det være muligt at sikre det meget vigtige samspil mellem de to aktiviteter, med feedback fra den numeriske modellering til den geologiske modellering. Såfremt de to aktiviteter udbydes samlet vil vejledningen i Tabel 2 med tilhørende henvisninger til bl.a. Geo-vejledning 3 (Jørgensen et al., 2008) være gældende.
- *Hydrologisk model.* Denne Geo-vejlednings Trin 2-5 kan benyttes hertil. Såfremt hydrologisk modellering udbydes adskilt fra geologisk modellering, vil væsentlige dele af opgaverne 2.4 – 2.8 (Kapitel 4, Tabel 2) udgå.

## 3. God modelleringspraksis – videnstatus

### 3.1 Danske og internationale vejledninger

Der eksisterer en mangfoldighed af vejledninger i god modelleringspraksis. Lærebøger som fx Håndbog i grundvandsmodellering (Sonnenborg og Henriksen, 2005) indeholder væsentlige elementer herom. Derudover er der inden for specielt de sidste 15 år udarbejdet en række egentlige vejledninger om procedurer til kvalitetssikring i grundvandsmodellering. De første retningslinier til en dansk vejledning fremkom i 2001 i en rapport fra Miljøstyrelsen (Henriksen et al., 2001). I samme periode blev der publiceret en række kvalitetssikringsvejledninger, som bl.a. hollandske vejledninger i hydrologiske modellering (Van Waveren et al., 1999; Scholten and Groot, 2002), en australsk vejledning i grundvandsmodellering (Middlemis, 2000), et udkast til vejledning fra US EPA om brug af modeller til forvaltningsmæssige formål (US EPA, 2003), som blev opdateret i 2009 (US EPA, 2009). Erfaringerne herfra blev fundamentet for udarbejdelsen af en omfattende vejledning til kvalitetssikring af modelleringsprocessen inden for rammerne af EU forskningsprojektet HarmoniQuA (2002-2005). HarmoniQuA havde deltagelse af erfarne modellører fra 10 EU lande og resulterede i softwareværktøjet MoST med en indbygget kvalitetssikringsmanual/vejledning (Knowledge Base) som kan downloades fra [www.harmoniqua.org](http://www.harmoniqua.org) (Scholten et al., 2007).

Indholdet i kvalitetssikringsvejledningerne har gennem årene gradvis ændret sig. Mens de tidligere vejledninger havde karakter af primært tekniske anvisninger om, hvordan modelløren bedst håndterer en konkret modellering (ASTM, 1992; 1994; 1996), fokuserer det seneste årtis vejledninger i stigende grad på hele modelleringsprocessen med inddragelse af dialogen mellem modellør, vandressourceforvalter og interessenter samt en prioritering af usikkerhedsaspekter og peer reviews (Refsgaard et al., 2005; Henriksen et al., 2009; Scholten and Refsgaard, 2010).

Efter afslutningen af HarmoniQuA projektet blev MoST afprøvet i Danmark i et tværgående NOVANA udviklingsprojekt (Højberg og Refsgaard, 2009). Hovedkonklusion herfra var, at vejledningsdelen i MoST kan være særdeles nyttig, mens de øvrige softwarefunktionaliteter i MoST forekom for besværlige at anvende i praksis.

### 3.2 Hvorfor benyttes hydrologisk modellering

Behovet for hydrologisk modellering opstår i forbindelse med vandressourceforvaltningen. Her identificeres målsætningerne for de konkrete modelleringsopgaver. Formålene med en opgave bliver ofte formuleret konkret som fx (a) at beregne indvindings- og grundvandsdannende oplande til kildepladserne i et område; (b) at vurdere den tilgængelige ressource for vandindvinding og dermed vandbalancens elementer såsom nedbør, fordampning, grundvandsdannelse, grundvandstilskud og drænafstrømning til vandløb; (c) at vurdere effekten af alternative indvindingsscenarier på grundvandsmagasiner, vandløb og vådområder; (d) at vurdere grundvandets alder og strømningsretninger; eller (e) at vurdere klimændringers effekter på vandressourcen.

Selvom de overordnede formål for nogle opgaver kan være de samme, som fx at fastlægge et opland til en vandindvinding, ender alle modelleringsopgaver med at være forskellige. Det skyldes både, at de forskellige oplande er forskellige med hensyn til naturgivne forhold bl.a. geologi, klima samt data tilgængelighed, og at problemstillingerne med vandressourceforvaltningen varierer fra sted til sted afhængig af fx forureningstrusler, interesser, konkrete handlingsmuligheder og handlingsomkostninger. Det betyder, at hver modelleringsopgave vil være unik, og at der altid opstår uforudsete problemstillinger, som skal håndteres undervejs. Eftersom overraskelser kan være ganske lærerige og er af stor betydning for vores viden om grundvandsforholdene i et givet område, er det vigtigt at være åben over for, at modelleringen ikke nødvendigvis giver det forventede resultat. Det uventede resultat er en vigtig brik i accepten af nødvendigheden for opstilling af grundvandsmodeller for at forstå vandets kredsløb og dermed grundvandsressourcen og mulighederne for grundvandsindvinding. Dette læringselement skal betragtes som en underliggende generel målsætning i al hydrologisk modellering – i tillæg til de konkrete målsætninger.

### 3.3 Hvordan sikres god kvalitet i hydrologisk modellering

Kvalitetssikring (KS) kan defineres som "den proceduremæssige og operationelle ramme som benyttes af en organisation, der har ansvaret for et modelleringsstudie, med sigte på (a) at opnå konsensus mellem de involverede parter om modelleringens gennemførelse; (b) at sikre et passende højt teknisk videnskabeligt niveau af alle delopgaver; og (c) at sikre at alle modelbaserede analyser er velbegrundede og reproducerbare" (Scholten et al., 2007).

Vigtige principper til at sikre god kvalitet i modelleringsprocessen er:

1. Der skal skabes optimale betingelser for en *aktiv dialog* mellem alle aktører (vandressourceforvalter, modellør og interesser) med henblik på at opnå en fælles forståelse samt skabe konsensus om den udførte modellering. Dette vil øge mulighederne for anvendelse af modellen.
2. Der skal gennemføres *peer reviews* af selve modelleringsarbejdet. Peer review skal gennemføres af fagfolk, som har lige så stor modelleringsmæssig erfaring og indsigt som den rådgiver, der gennemfører selve modelleringsopgaven, og som desuden er eksterne i forhold til opgavens parter.
3. Modelleringen skal udføres i henhold til en *vejledning for god modelleringspraksis*, der er generelt accepteret og videnskabeligt funderet. Vejledningen skal dels bidrage til en videnskabeligt funderet teknisk løsning af opgaven og dels sikre en fælles forståelsesramme blandt alle involverede aktører og minimere risikoen for konflikter opstået pga. uklarhed om procedurer og metoder.
4. *Usikkerhedsvurderinger* skal foretages med inddragelse af alle væsentlige aspekter, som fx usikkerheder på data, modelparametre, den geologiske tolkning og den konceptuelle model, uanset om usikkerhederne kan kvantificeres eller "kun" kan behandles kvalitativt. Usikkerhedsvurderinger skal gennemføres lige fra begyndelsen af et projekt og inddrages i dialogen mellem alle projektets partnere. Tilsvarende skal kravene til en models nøjagtighed løbende vurderes i samspil mellem modellør, vandressourceforvalter og interesser.

5. Der skal i videst muligt omfang gennemføres *valideringstest* mod uafhængige data for de typer situationer, hvortil modellen påtænkes anvendt. Modellens valideringsstatus skal beskrives med angivelse af dokumenterede anvendelsesmuligheder og begrænsninger.
6. Modellering skal betragtes som en *læringsproces*, hvor der skal frembringes ny viden og erkendelse. Bl.a. derfor skal der være mulighed for at vende tilbage til tidligere delopgaver i modelleringsprocessen (*feed-back loops*), hvis der opstår ny erkendelse undervejs i modelleringsprocessen.
7. Dokumentationen af modelleringsarbejdet skal sikre *gennemskuelighed* for alle interesserede parter mht. de anvendte metoder og de grundlæggende antagelser. Endvidere skal de dominerende usikkerhedskilder angives, og deres betydning for modelresultaterne skal fremgå klart.
8. Der skal ske en dokumentation, så modellen i videst mulig omfang er *reproducerbar*. Dette er nødvendigt for, at tredjemand på et senere tidspunkt kan foretage en gennemgang af modellen for vurdering af dennes kvalitet, eller udføre nye scenariosimuleringer samt ved opdatering af modellen eller af modeller for tilgrænsende områder.

## 4. God modelleringspraksis - vejledning

### 4.1 Aktørerne og de fem trin i modelleringsprocessen

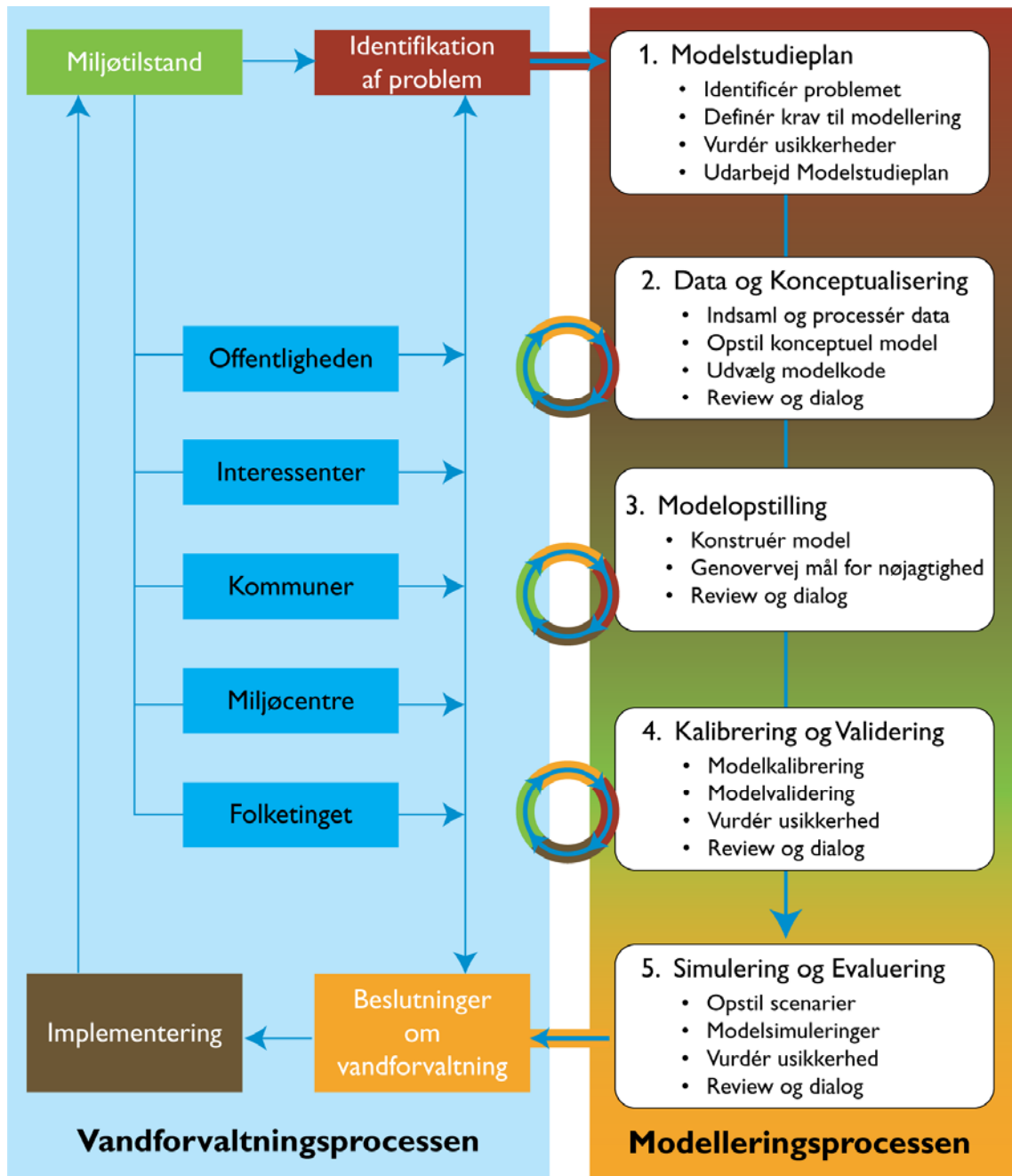
Et modelleringsstudie vil typisk involvere fire forskellige grupper af aktører med hver deres ansvarsområde i modelleringsprocessen:

- *Vandressourceforvalter*, som er ansvarlig for forvaltningen af vandressourcen og således ansvarlig for, at modelstudiet udformes, så det bidrager til at løse deres opgaver. I forbindelse med grundvandsbeskyttelsen deles denne rolle mellem miljøcentre, som er ansvarlige for grundvandskortlægningen, og kommunerne, som er ansvarlige for den efterfølgende indsats.
- *Modellør*, som er ansvarlig for den tekniske gennemførelse af den givne modelleringsopgave. Modelløren er som regel et rådgivende firma.
- *Reviewer* er en person, som gennemfører et eksternt review af modelleringsstudiet. Revieweren skal have omfattende modelleringserfaring, der som et minimum matcher modellørens. Revieweren udpeges af og refererer til vandressourceforvalteren, men vil i praksis ofte også give råd, som er nyttige for modelløren.
- *Interessenter* er organisationer, der kan have interesser på spil i forbindelse med opgaven. I grundvandskortlægningen er det dels kommuner, som skal arbejde videre med indsatsplaner, og dels personer/organisationer, som kan blive påvirket af indsatsplanerne, som fx vandselskaber, landbrug og miljøorganisationer. En interessent kan vælge at lade sig bistå af en rådgiver.

Modelleringsproces kan opdeles i følgende fem trin (Figur 1):

- *TRIN 1: Modelstudieplan*. I dette trin formuleres de samfundsmæssige og institutionelle rammer, målsætningen og kravspecifikationerne for modelstudiet. En vigtig opgave i dette trin er at analysere og fastsætte kravene til nøjagtighed af modelresultaterne, som vil variere fra opgave til opgave, afhængig af hvor store økonomiske og politiske interesser, der står på spil. Derfor er involvering af interessenter væsentlig her. Endvidere udvælges modellør og reviewer. Dette trin afsluttes med en aftale mellem vandressourceforvalteren og modelløren om arbejdets gennemførelse, og med revieweren om omfanget af det eksterne review. Opgaverne og aktiviteterne er listet i Tabel 1.
- *TRIN 2: Data og konceptualisering*. I dette trin indsamler modelløren al relevant viden og data og opstiller en konceptuel model, som skal danne grundlag for den efterfølgende numeriske modellering. Det væsentligste element i den konceptuelle model er opstillingen af en hydrostratigrafisk model, men der skal også tages andre beslutninger for den numeriske model, som fx valg af initial- og randbetingelser, hvilke procesligninger skal benyttes (hvilken strømningsligning i umættet zone; opsprækkede medier eller ej, mv.), tidslig og rumlig diskretisering og hvilke inputdata skal drive modellen, ligesom størrelsesordnerne i områdets vandbalance skal vurderes. Det skal her bemærkes, at der kan være forskellige rande, hvis den geologiske model er opstillet i en anden arbejdsgang, og at disse forskellige rande kan have betydning for den hydrostratigrafiske models detaljeringsgrad i nogle områder. Under dette trin vælges også den software (model kode), som skal benyttes i den numeriske modellering. Opgaverne og aktiviteterne er listet i Tabel 2.

- **TRIN 3: Modelopstilling.** Det indebærer at transformere den konceptuelle model til en numerisk model ved hjælp af den valgte modelkode. Det kræver ofte omfattende datahåndtering. Når den første modelkørsel er gennemført, revurderes de nøjagtighedskrav, der er opstillet under Trin 1, og der opstilles en kalibrerings- og valideringsplan med tilhørende nøjagtighedskriterier. Opgaverne og aktiviteterne er listet i Tabel 3.



Figur 1: De fem trin i modelleringsprocessen (Refsgaard, 2007).

- **TRIN 4: Kalibrering og validering.** Kalibrerings- og valideringsopgaverne er teknisk krævende discipliner. Når de er gennemført, vurderes usikkerhederne i modelleringen, og modellens troværdighed og anvendelighed til de forskellige formål beskrives. I den sammenhæng fremhæves både de anvendelsesområder, hvor modellen er dokumente-

ret via tests at kunne opnå en given nøjagtighed, og de anvendelsesområder, hvor modeltest enten fejlede på grund af for stor unøjagtighed eller ikke har kunnet gennemføres på grund af manglende data. Opgaverne og aktiviteterne er listet i Tabel 4.

- *TRIN 5: Simulering og evaluering.* I dette trin anvendes modellen til de ønskede formål. Der gennemføres usikkerhedsvurderinger af modelsimuleringerne med inddragelse af de væsentligste usikkerhedskilder (fx inputdata, modelparametre, geologi, øvrig modelstruktur). Opgaverne og aktiviteterne er listet i Tabel 5.

De sidste fire trin afsluttes med en rapportering og et eksternt review samt en dialog (møde) mellem vandressourceforvalteren, modelløren, revieweren og, i relevante tilfælde, interessenter. Her godkendes arbejdet i det pågældende trin samt en detaljeret arbejdsplan for det kommende trin, som kan være opdateret på grundlag af resultaterne fra de hidtidige trin.

Yderligere detaljer om de fem trin fremgår af tabellerne 1-5. Her er de forskellige opgaver og de tilhørende aktiviteter listet i henhold til MoST vejledningen (Appendix A). Endvidere er angivet hvilke aktører, der er hovedansvarlige for de forskellige opgaver. Endelig er der konkrete henvisninger til yderligere vejledning, enten i MoST vejledningen i Appendix A, i Håndbog for Grundvandsmodellering (Sonnenborg og Henriksen, 2005), i afsnittene 4.7.1 - 4.7.10, eller i anden litteratur. Opgaverne og aktiviteterne i tabellerne 1-5 skal betragtes som vejledende og er nyttige at have som checklister. Afhængig af den konkrete modelleringsopgave vil nogle af opgaverne og aktiviteterne måske ikke være relevante. Dette bør aktørerne forholde sig aktivt til og i givet fald kunne retfærdiggøre.

Et væsentligt element i MoST vejledningen er, at aktørerne regelmæssigt skal tage stilling til, om det er nødvendigt at vende tilbage til tidligere delopgaver i modelleringsprocessen. Det kan eksempelvis være relevant, hvis kalibreringsresultaterne viser, at der ikke er konsistens mellem den geologiske tolkning og øvrige data som fx trykniveauer og stofkoncentrationer i grundvandsmagasinerne eller vandføringer. I sådanne tilfælde aktiveres feed-back loops, som er vist i figuren på side 6, Appendix A. Disse feedback loops er for overskuelighedens skyld ikke medtaget i tabellerne 1-5, der derfor umiddelbart kan signalere at modelleringsprocessen er lineært fremadskridende, hvilket ofte ikke vil være tilfældet. Feed-back loops kan ikke forudsiges på forhånd og kan derfor være vanskelige at tage hensyn til i formuleringen af en opgave. I den forbindelse kan det være en god ide at indbygge en mulighed for rettelser og ændringer undervejs i samråd med modelløren.

## 4.2 Trin 1 – Modelstudieplan

Tabel 1 Opgaver under Trin 1. Numrene refererer til Tasknumre i MoST (Appendix A). Håndbog refererer til Sonnenborg og Henriksen (2005). Vejledningsmateriale angivet med *fed/kursiv skrifttype* referer til afsnit senere i denne Geo-vejledning.

Opgave	Typiske aktiviteter	Ansvarlige	Vejledningsmateriale
1.1 Beskriv problemstilling 1.2 Definer formål 1.3 Identificer data tilgængelighed	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hvad er de samfundsmæssige betingelser?</li> <li>• Hvor kompliceret er geologien – kan der forventes problemer?</li> <li>• Hvor store interesser står der på spil?</li> <li>• Er modelanvendelse en god ide i den konkrete sag? Hvorfor?</li> <li>• Ønsker til tidlig og rumlig diskretisering</li> <li>• Beskrivelse af området</li> <li>• Udarbejd interessentinvolveringsplan, foretag interessentanalyse</li> <li>• Udarbejd kommunikationsstrategi</li> <li>• Beskriv opgavens formål - Hvilke spørgsmål skal modelstudiet svare på?</li> <li>• Hvilke anvendelser (scenarier) skal modellen bruges til?</li> <li>• Opstil et foreløbigt budget</li> <li>• Lav en oversigt over de nødvendige data (systemdata, procesparametre, initial- og randbetingelser, tids-serier, scenariedata, data til kalibrering af statisk eller dynamisk model)</li> </ul>	Vandressourceforvalter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 1.1-1.3</li> <li>• Håndbog Kapitel 2</li> <li>• <b>Afsnit 4.7.1</b></li> </ul>
1.4 Specifikationer til modelleringen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hvad er kravene til modellens usikkerheder? Hvor nøjagtige skal resultaterne være?</li> <li>• Indledende specifikation af nøjagtighedskriterier</li> <li>• Vurder interessenternes ekspertise og ønsker</li> <li>• Revurder budgettet</li> <li>• Krav til kommunikation, rapportering og dokumentation</li> <li>• Krav til modelanvendelser</li> <li>• Interessenternes synspunkter om modelspecifikationerne</li> <li>• Vurder de væsentligste usikkerhedskilder og deres betydning</li> </ul>	Vandressourceforvalter + interessenter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 1.4</li> </ul>
1.5 Udarbejd udbudsbetingelser	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lav dokumenterne til miniudbud</li> </ul>	Vandressourceforvalter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 1.5</li> </ul>
1.6 Tilbudsgivning 1.7 Kontraktforhandlinger	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Indhente tilbud fra rådgivere (vandressourceforvalter)</li> <li>• Lav tilbud (rådgiver)</li> <li>• Udvælg det bedste tilbud og identificer nødvendige ændringer til kontraktforhandlinger</li> <li>• Bliv enige om teknisk indhold og budget</li> <li>• Kvalitetssikringsplan</li> </ul>	Vandressourceforvalter + modellør + reviewer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 1.6–1.7</li> </ul>

## 4.3 Trin 2 – Data og konceptualisering

Tabel 2 Opgaver under Trin 2. Numrene refererer til Tasknumre i MoST (Appendix A). Håndbog referer til Sonnenborg og Henriksen (2005). Vejledningsmateriale angivet med **fed/kursiv skrifttype** referer til afsnit senere i denne Geo-vejledning.

Opgave	Typiske aktiviteter	Ansvarlige	Vejledningsmateriale
2.1 Beskriv system og data tilgængelighed 2.2 Indsaml og processer rådata 2.3 Er der tilstrækkelige data?	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hvilke processer skal med i modellen og hvilke datakrav har de?</li> <li>Hvilke data kræves for at vurdere modeloutputs?</li> <li>Vurder datatilgængelighed</li> <li>Indsaml, processer og evaluer de nødvendige rådata</li> <li>Vurder om der er tilstrækkelige data til at gennemføre modelstudiet med de specificerede formål (både input data og data til kalibrering og validering)</li> </ul>	Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>Appendix A, 2.1-2.3</li> </ul>
2.4 Model struktur og processer 2.5 Modelparametre 2.6 Resumer konceptuel model og forudsætninger 2.7 Behov for alternative konceptuelle modeller	<ul style="list-style-type: none"> <li>Analyser systemet (fysisk udstrækning, vandbalance, rumlig og tidlig diskretisering, systemets dynamik, randbetingelser, mv.)</li> <li>Opstil geologisk forståelsesmodel</li> <li>Opstil rumlig geologisk model</li> <li>Vurder hvilke parametre der med fordel kan fastsættes ved kalibrering hhv. ved brug af standard- eller litteraturværdier</li> <li>Hvordan skal parametrene tilknyttes strukturelle elementer (zoning, mv.)</li> <li>Beskriv den konceptuelle model med tekst og figurer</li> <li>Vurder om der er så stor usikkerhed på den konceptuelle model, at der er behov for at opstille alternative konceptuelle elementer</li> </ul>	Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>Appendix A, 2.4-2.7</li> <li>Jørgensen et al. (2008)</li> <li>Håndbog Kapitel 4, 7, 8, 10</li> <li><b>Afsnit 4.7.2</b></li> <li><b>Afsnit 4.7.3</b></li> </ul>
2.8 Processer model struktur data	<ul style="list-style-type: none"> <li>Opstil hydrostratigrafisk model</li> <li>Processer øvrige data</li> </ul>	Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>Appendix A, 2.8</li> <li>Jørgensen et al. (2008)</li> </ul>
2.9 Vurder troværdighed af konceptualiseringen (intern KS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Giver den konceptuelle model mening? Er den konsistent med alle data?</li> <li>Kan formålene med modelstudiet forventes opnået med den konceptuelle model?</li> <li>Indeholder den konceptuelle model spekulative elementer</li> </ul>	Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>Appendix A, 2.9</li> </ul>
2.10 Vælg model kode (software)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vurder hvilke mulige koder (softwareprogrammer) der er velegnede til denne opgave</li> <li>Check hvorvidt koden er verificeret (testet og dokumenteret) til den type opgaver, den skal bruges til her</li> <li>Vurder hvilken support kodeudvikleren/leverandøren kan give</li> <li>Vælg den kode der skal benyttes</li> </ul>	Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>Appendix A, 2.10</li> </ul>
2.11 Rapportering	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rapportering af Trin 2 aktiviteter</li> <li>Reviderede planer for Trin 3 aktiviteter</li> </ul>	Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>Appendix A, 2.11</li> <li><b>Afsnit 4.7.8</b></li> </ul>
2.12 Review	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eksternt review</li> <li>Beslutninger af på hvilke betingelser Trin 2 kan godkendes</li> <li>Revurdering af opgave plan for Trin 3</li> </ul>	Reviewer + vandressourceforvalter + modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>Appendix A, 2.12</li> <li>Håndbog Kapitel 23</li> <li><b>Afsnit 4.7.4</b></li> </ul>

## 4.4 Trin 3 – Modelopstilling

Tabel 3 Opgaver under Trin 3. Numrene refererer til Tasknumre i MoST (Appendix A). Håndbog referer til Sonnenborg og Henriksen (2005). Vejledningsmateriale angivet med *fed/kursiv* skrifttype referer til afsnit senere i denne Geo-vejledning.

Opgave	Typiske aktiviteter	Ansvarlige	Vejledningsmateriale
3.1 Opstil model 3.2 Gennemfør de første testkørsler	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Processer alle inputdata til det format, den valgte modelkode kræver, og med den valgte diskretisering i tid og rum</li> <li>• Lav en log over modelkørsler</li> <li>• Få modellen til at køre uden numeriske problemer med alle data</li> <li>• Kontroller via simple testkørsler, at der tilsyneladende ikke er grove fejl i modelsetup'et</li> </ul>	Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 3.1-3.2</li> </ul>
3.3 Specificer og opdater kalibrerings- og valideringsmål og nøjagtighedskriterier	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revurder nøjagtighedskravene fra udbudsbetingelserne (opgave 1.4) – er de realistiske?</li> <li>• Vurder mængde og kvalitet af observationsdata</li> <li>• Udarbejd en detaljeret plan for kalibrering og validering med nøjagtighedskriterier og grænser for målopfyldelse</li> </ul>	Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 3.3</li> <li>• <b>Afsnit 4.7.5</b></li> </ul>
3.4 Rapportering	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rapportering af Trin 3 aktiviteter</li> <li>• Reviderede planer for Trin 4 aktiviteter</li> </ul>	Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 3.4</li> <li>• <b>Afsnit 4.7.8</b></li> </ul>
3.5 Review	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eksternt review</li> <li>• Beslutninger af, på hvilke betingelser Trin 3 kan godkendes</li> <li>• Revurdering af opgave plan for Trin 4</li> </ul>	Reviewer + vandressourceforvalter + modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 3.5</li> <li>• Håndbog Kapitel 23</li> <li>• <b>Afsnit 4.7.4</b></li> </ul>

## 4.5 Trin 4 – Kalibrering og validering

Tabel 4 Opgaver under Trin 4. Numrene refererer til Tasknumre i MoST (Appendix A). Håndbog referer til Sonnenborg og Henriksen (2005). Vejledningsmateriale angivet med **fed/kursiv** skrifttype referer til afsnit senere i denne Geo-vejledning.

Opgave	Typiske aktiviteter	Ansvarlige	Vejledningsmateriale
4.1 Kalibreringsstrategi 4.2 Vælg kalibreringsmetode 4.3 Stopkriterie 4.4 Udvælg kalibreringsparametre 4.5 Parameter - estimering 4.6 Er kalibreringen afsluttet?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Processer kalibreringsdata</li> <li>• Udarbejd detaljeret kalibreringsstrategi</li> <li>• Vælg objektivfunktion</li> <li>• Vælg optimeringsmetode og værktøj</li> <li>• Fastsæt stopkriterier</li> <li>• Udvælg kalibreringsparametre</li> <li>• Sensitivitetsanalyse</li> <li>• Gennemfør kalibrering</li> <li>• Er kalibreringen OK og parametrene troværdige?</li> </ul>	Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 4.1 – 4.6</li> <li>• Håndbog Kapitel 13+14</li> <li>• <b>Afsnit 4.7.6</b></li> </ul>
4.7 Vurder troværdigheden af kalibreringen (intern KS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Er modelresultaterne rimelige?</li> <li>• Er parameterværdierne rimelige?</li> <li>• Indeholder modellen spekulative elementer?</li> <li>• Skal nogle af de alternative konceptuelle modeller forkastes?</li> <li>• Er mindst en af de geologiske modeller acceptabel?</li> </ul>	Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 4.7</li> <li>• Håndbog Afsnit 14.8</li> </ul>
4.8 Modelvalidering	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lav en plan for valideringstests</li> <li>• Gennemfør valideringstest</li> </ul>	Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 4.8</li> <li>• Håndbog Kapitel 15</li> <li>• <b>Afsnit 4.7.8</b></li> </ul>
4.9 Vurder troværdigheden af valideringen (intern KS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Giver testresultaterne mening?</li> <li>• Er modelsimuleringerne rimelige?</li> <li>• Skal nogle af de alternative konceptuelle modeller forkastes?</li> <li>• Er mindst en af de geologiske modeller tilstrækkelig?</li> </ul>	Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 4.9</li> </ul>
4.10 Usikkerhedsanalyse af kalibrering og validering	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usikkerhed på inputdata, randbetingelser og parameterværdier</li> <li>• Usikkerheder på modelstruktur</li> <li>• Usikkerhed på planlagt modelanvendelse</li> </ul>	Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 4.10</li> <li>• Håndbog Kapitel 19</li> <li>• <b>Afsnit 4.7.7</b></li> </ul>
4.11 Modellens dokumenterede anvendelsesområde	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hvad er modellens dokumenterede anvendelsesområde?</li> <li>• Hvor kan modellen måske anvendes, selv om det ikke er dokumenteret med valideringstest?</li> <li>• Hvad kan modellen ikke anvendes til?</li> </ul>	Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 4.11</li> <li>• Håndbog Kapitel 16</li> <li>• <b>Afsnit 4.7.9</b></li> </ul>
4.12 Rapportering	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rapportering af Trin 4 aktiviteter</li> <li>• Reviderede planer for Trin 5 aktiviteter</li> </ul>	Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 4.12</li> <li>• <b>Afsnit 4.7.8</b></li> </ul>
4.13 Review	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eksternt review</li> <li>• Beslutninger af, på hvilke betingelser Trin 4 kan godkendes</li> <li>• Revurdering af opgave plan for Trin 5</li> </ul>	Reviewer + vandressourceforvalter + modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 4.13</li> <li>• Håndbog Kapitel 23</li> <li>• <b>Afsnit 4.7.4</b></li> </ul>

## 4.6 Trin 5 – Simulering og evaluering

Tabel 5 Opgaver under Trin 5. Numrene refererer til Tasknumre i MoST (Appendix A). Håndbog refererer til Sonnenborg og Henriksen (2005). Vejledningsmateriale angivet med *fed/kursiv skrifttype* referer til afsnit senere i denne Geo-vejledning.

Opgave	Typiske aktiviteter	Ansvarlige	Vejledningsmateriale
5.1 Opstil scenarier	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Omsæt specifikationerne til modelanvendelse (Opgave 1.4) til ændringer i model-setup</li> <li>• Vurder om modellens setup på rimelig vis kan beskrive de ønskede anvendelser</li> <li>• Processer scenariedata til brug i modelkørsler</li> </ul>	Vandres-sourceforvalter + Interessenter + Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 5.1</li> </ul>
5.2 Simuleringer 5.3 Check simuleringer 5.4 Analyser og fortolk resultaterne	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lav modelkørsler</li> <li>• Check om beregningsresultaterne indeholder uventede resultater eller numeriske fejl</li> <li>• Analyser resultaterne og vurder, om de svarer på de spørgsmål de skal</li> </ul>	Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 5.2-5.4</li> </ul>
5.5 Vurder troværdigheden af simuleringerne (intern KS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Giver simuleringresultaterne mening?</li> <li>• Er resultaterne rimelige</li> </ul>	Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 5.5</li> </ul>
5.6 Usikkerhedsanalyse af simuleringer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usikkerhed på inputdata, randbetingelser og parameterværdier</li> <li>• Usikkerheder på modelstruktur</li> <li>• Usikkerhed på scenariedata</li> </ul>	Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 5.6</li> <li>• <b>Afsnit 4.7.7</b></li> </ul>
5.7 Er scenarieberegninger afsluttede?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Er modelkørslerne gennemført så de kan svare på de spørgsmål, der skal besvares i henhold til udbudspecifikationerne (Opgave 1.4)?</li> </ul>	Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 5.7</li> </ul>
5.8 Rapportering	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rapportering af Trin 5 aktiviteter</li> </ul>	Modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 5.8</li> <li>• <b>Afsnit 4.7.10</b></li> </ul>
5.9 Review	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eksternt review</li> <li>• Beslutninger af, på hvilke betingelser Trin 5 kan godkendes</li> </ul>	Reviewer + vandressourceforvalter + modellør	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 5.9</li> <li>• Håndbog Kapitel 23</li> <li>• <b>Afsnit 4.7.4</b></li> </ul>
5.10 Er der behov for post audit?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Er der behov for at gennemføre en post audit, fx ved at indsamle nye data i en periode og så efterfølgende teste modelberegningerne mod de nye uafhængige data. Det kan især være ønskeligt, hvis usikkerhederne på modellsimuleringerne er store på områder, som er kritiske for den beslutning, der skal tages</li> </ul>	Vandres-sourceforvalter + interessenter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 5.10</li> </ul>
5.11 Lukning af opgaven	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sikre at resultater er arkiverede som aftalt, bl.a. i <a href="http://www.geus.dk/modeldb">www.geus.dk/modeldb</a></li> <li>• Sikre at resultater og værktøj er overført til miljøcenter eller interessenter, hvis det er aftalt</li> <li>• Sikre evt. service hvis modellen overføres til miljøcenter eller interessenter, hvis det er aftalt</li> </ul>	MC + modellør + Interessenter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appendix A, 5.11</li> </ul>

## 4.7 Vejledning i udvalgte opgaver

Som det fremgår af tabellerne 1-5 henvises der, for hovedparten af denne Geo-vejledning, til eksisterende materiale, først og fremmest Håndbog i Grundvandsmodellering (Sonnensborg og Henriksen, 2005) og MoST vejledningen i god modelleringspraksis (Appendices A-C). I tillæg hertil er der udarbejdet nyt vejledningsmateriale for nogle udvalgte emner i afsnittene 4.7.1 - 4.7.10. Emnerne er udvalgt, fordi det eksisterende vejledningsmateriale med øget erfaring er forældet og kan forbedres, og fordi emnerne er meget væsentlige og erfaringsmæssigt vanskelige at håndtere.

### 4.7.1 Valg af forskellige modeltyper til forskellige formål

Før modelopgaven går i udbud, skal vandressourceforvalteren beslutte, hvad formålene med modelstudiet er. I Administrationsgrundlaget for grundvandskortlægningen (BLST, 2009) beskrives anvendelse af grundvandsmodeller som en velegnet kortlægningsmetode til at "... beregne indvindings- og grundvandsdannende oplande, indvindings- og klimascenarier, grundvandsdannelse, grundvandets alder og grundvandets strømningsveje." Denne brede vifte af formål er i Tabel 6 opdelt i en række mulige opgavetyper. For hver opgavetype og tilhørende valg af ambitionsniveau angiver tabellen hvilke modeltyper, der typisk vil være passende. Der er mange forskelligartede typer af opgaver, hvor hydrologisk modellering kan være formålstjenlig. Det er derfor vigtigt at fremhæve, at listen over typer af modelopgaver i Tabel 6 langt fra er udtømmende.

I tabellen opereres der med følgende modeltyper til beregning af vandstrømninger og trykniveauer:

- *Analytisk*: Analytisk ligning.
- *AEM*: Analytisk elementmetode (Iversen et al., 2009).
- *Stationær grundvandsmodel*: Numerisk grundvandsmodel, som kalibreres stationært.
- *Dynamisk integreret model*: Numerisk overfladevands-grundvandsmodel, som kalibreres og anvendes dynamisk, dvs. med tidsvarierende input for bl.a. klima og indvindinger.
- *PT*: Particle tracking model (Iversen et al., 2008, 2010)
- *AD*: Reaktiv stoftransportmodel, der beregner advektion, dispersion og kemiske/mikrobiologiske reaktioner.

De første fire modeltyper, som kan anvendes til beregning af vandstrømninger og trykniveauer, er anført i en rækkefølge af stigende kompleksitet. PT benyttes typisk til beregning af indvindings- og grundvandsdannende oplande, men kan også benyttes til beregning af grundvandets alder og, i specielle tilfælde, stofkoncentrationer i grundvandet. AD benyttes til beregning af transport, sorption og nedbrydning af opløste stoffer i grundvandet. PT og AD kræver en forudgående anvendelse af enten en stationær eller en dynamisk integreret model.

Tabel 6 skal kun opfattes som retningsgivende for hvilke modeltyper, der typisk vil være fordelagtige til de forskellige formål. I konkrete opgaver vil der nogle gange være forhold, der retfærdiggør andre valg. Det kan eksempelvis være mere avancerede modeller med beskrivelse af sprækkestrømning eller densitetsstrømning. Men der kan også være situati-

oner, hvor mere avancerede anvendelser af en simpel model, fx til usikkerhedsanalyser, kan være mere formålstjenlig end en simpel anvendelse af en kompleks model.

Spørgsmålet, om hvorvidt der skal vælges en stationær eller en dynamisk model, er vanskeligt at besvare generelt. Hvis følgende tre forhold er opfyldt, vil det som regel være tilstrækkeligt at anvende en stationær model:

1. *Linearitet*. Middelsituationen i den dynamiske model skal være den samme som situationen i den stationære model, hvilket vil være tilfældet, såfremt det simulerede grundvandssystem er lineært. Hvis systemet derimod indeholder tærskelværdier eller anden ikke-linearitet, vil den stationære model give et andet resultat (være biased) end middelsituationen i den dynamiske model. Drænrør og vandløb, der løber tørre, er eksempler på forhold, der giver anledning til ikke-linearitet.
2. *Prædiktions tidsskala >> system dynamik*. Dvs. at tidsskalaen for det modellen skal prædikere, skal være så stor, at de dynamiske variationer i systemet midles over hele tidsrummet. Det er fx tilfældet ved beregninger af indvindings- og grundvandsdannende oplande. Et eksempel på den modsatte situation er beregning af markvandingens indflydelse på åernes sommervandføringer.
3. *Stationære forhold i oplandet*. Dvs. at væsentlige forhold som fx klimatiske forhold, grundvandsindvinding og arealanvendelse ikke må udvise signifikante ændringer. For at vurdere dette, kan det i nogle situationer være nødvendigt at gennemføre trendtest.

Såfremt en opgave har flere formål, vil det ofte være muligt at løse noget af opgaven med en relativ simpel model, og en anden del med en relativ mere kompleks, og dermed mere tidskrævende, model. For at sikre den faglige konsistens, vil det dog være fordelagtigt at benytte den samme model til alle del-formålene. Anvendelse af kun en model vil som regel være økonomisk fordelagtig. Såfremt en modelopgave eksempelvis har til formål at fastlægge et grundvandsdannende opland og vurdere vandløbspåvirkninger i et moræneområde, vil der være behov for en dynamisk integreret model, som så bør benyttes til begge formål.

### **Anbefalinger**

Det anbefales at benytte den simplest mulige model til en given opgave, forstået som den modeltype der, for færrest mulige ressourcer med acceptabelt fagligt niveau, kan give svar på de givne spørgsmål. Tabel 6 kan bruges som retningsgivende for, hvilke modeltyper, der typisk kræves til forskellige formål. Såfremt der er tvivl om anvendelsen af en stationær model er tilstrækkelig for problemstillingerne, anbefales det at teste, om de to krav til linearitet og tidsskala kan opfyldes.

Samtidig anbefales det, både af økonomiske grunde og af hensyn til den faglige sammenhæng i opgaveløsningen, at benytte samme model til alle delformål, dvs. at det formål, der kræver den mest omfattende modeltype, vil være specifikationsættende for en given opgave.

Tabel 6 Vejledning i valg af modeltype afhængig af formålet med modelstudiet. Modeltyperne er beskrevet i teksten.

Formål (opgavetype)	Ambitionsniveau	Modeltype	Typisk diskretisering	Kommentarer
Teste geologisk model	Svag test	Stationær grundvandsmodel	200 – 500 m	
	Middelstærk test	Dynamisk integreret model		
	Stærk test	Dynamisk integreret model		Kræver ekstra datakilder som fx koncentrationer af CFC eller andre miljøtracere
Fastlægge indvindings/grundvandsdannende opland	Lille nøjagtighed (screening)	AEM	50 – 200 m	
	Middel nøjagtighed	Stationær grundvandsmodel + PT		
	Stor nøjagtighed	Dynamisk integreret model + PT		PT kan køres stationært, men modellen skal kalibreres dynamisk
Vandbalance		Dynamisk integreret model	200 – 500 m	
Grundvandsindvindings effekt på vandføring i vandløb	Hedeslette, helårsindvinding	Lille/middel nøjagtighed (screening)	50 – 200 m	
		Stor nøjagtighed		
	Hedeslette, markvanding Moræneområde	Dynamisk integreret model		
Grundvandsindvindings effekt på vandstand i vådområder og søer	Middel nøjagtighed	Stationær model	50 – 200 m	
	Stor nøjagtighed	Dynamisk integreret model		
Stoftransport (koncentrationer af forurenende stoffer)	Kildestyrke af forurening	Dynamisk integreret model	1D vertikalt	Perkolation fra rodzonen
	Transporttider i grundvandszonen	Stationær model + dynamisk PT	50 – 200 m	Dynamisk PT kildestyrke ofte nødvendig. Overvej om dynamisk kalibrering af strømningsmodel er nødvendig
	Koncentrationer af stoffer der nedbrydes i grundvandszonen	Stationær model + dynamisk AD	1 – 200 m	Dynamisk AD kildestyrke ofte nødvendig. Overvej om dynamisk kalibrering af strømningsmodel er nødvendig. Diskretisering afhænger af, hvilke geokemiske/mikrobiologiske processer, der vurderes
Effekter af klimaændringer	Output fra rodzone	Dynamisk integreret model	1D vertikal	Data fra klimamodeller skal korrigeres for bias
	Oplande, Vandbalance, Effekter af grundvandsindvinding, Forurening	Samme modeltype som beskrevet ovenfor under oplande, vandbalance, grundvandsindvinding og stoftransport		

## 4.7.2 Opstilling af konceptuel model

### Hvad er en konceptuel model?

En konceptuel model er en arbejdsbeskrivelse af karakteristika og dynamik i grundvands-systemet, dvs. en beskrivelse af, hvilke strukturelle elementer og hvilke processer, der skal indgå i den numeriske model, og hvilken indbyrdes vægt disse skal have. Det væsentligste element i formuleringen af en konceptuel model dækker over, at naturen skal oversættes til et numerisk system, og eftersom det ikke er muligt at beskrive alle processer og alt heterogenitet fuldstændigt, er det nødvendigt med en generalisering og simplificering. I denne sammenhæng er subjektivitet en afgørende faktor, som dels kræver en stor opmærksomhed på bagvedliggende antagelser, dels kræver fokus på konteksten, hvori den konceptuelle model skal indgå, og dels kræver en klar formulering af forventningerne til modellens prædiktive egenskaber. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen nr. 17 (Henriksen et al., 2001) beskriver, at det desuden kan være en fordel at udarbejde/udvikle de konceptuelle modeller sideløbende med modelberegninger.

En konceptuel model indeholder følgende elementer:

- En geologisk model (Jørgensen et al., 2008)
- Specifikation af, hvilke procesligninger der benyttes, fx 2D vs. 3D, porøse medier vs. sprækkede medier, hvilken UZ approksimation, osv.
- Specifikation af, hvorledes modelområdet underinddeles i strukturelle elementer med konstante parameterverdier
- Specifikation af randbetingelser
- Specifikation af, hvilke inputdata der driver modellen
- En overordnet forståelse af strømningsforhold og vandbalancer i området.

En konceptuel model er således en hydrologisk og en hydrogeologisk forståelsesmodel, som er tilpasset det specifikke formål og ambitionsniveau i den konkrete modelleringsopgave.

### Den geologiske model

Den geologiske model er ofte det vigtigste element i en konceptuel model. I Geo-vejledning 3 (Jørgensen et al., 2008) beskrives den geologiske modellering som en proces bestående af tre trin: (1) en geologisk forståelsesmodel; (2) en rumlig geologisk model; og (3) en hydrostratigrafisk model.

De valg, der træffes i den geologiske modellering, er væsentlige for den efterfølgende hydrologiske modellering, ligesom resultatet af den hydrologiske modellering kan give information om steder, hvor den geologiske model er inkonsistent med den hydrogeologiske viden, og hvor det derfor bør overvejes at revidere den geologiske model. Derfor anbefaler Jørgensen et al. (2008), at der foretages vurderinger af hydrogeologiske data i forbindelse med den geologiske modellering. Endelig kan en hydrologisk modellering frembringe hydrogeologisk viden, som ikke kan udledes af hydrogeologiske data alene. Jørgensen et al. (2008) anbefaler derfor, at den geologiske model bør opdateres, hvis selve grundvandsmodelleringen giver anledning til ændret forståelse af geologien.

Såfremt den geologiske og den hydrologiske modellering sker i samme opgave, er dialogen og feed-back processen mellem de to modelleringer væsentlig for opnåelsen af det bedst mulige resultat. Såfremt de to processer løses i to særskilte opgaver, hvor den hydrologiske modellør overtager en "færdig" geologisk model, er det væsentligt, at den hydrologiske modellør i forbindelse med opstilling af den konceptuelle model gennemfører følgende overvejelser:

- Er der behov for at revidere den geologiske model til den hydrologiske modelleringsopgave? Fx er det ofte nødvendigt at inddrage et større geografisk område end interesseområdet i den hydrologiske modellering, for at opnå gode randbetingelser.
- Hvilke modifikationer skal der laves i forhold til den konkrete modelleringsopgave? Det kan fx være relevant at opdele eller aggregere lag i den hydrostratigrafiske model, for at opnå de mest hensigtsmæssige beregningslag i den hydrologiske model.
- Hvor godt forholder den hydrostratigrafiske model sig til faldgruber i den hydrologiske modellering? Svarer opdelingen i lag fx til de valg af procesbeskrivelser, der vælges i den hydrologiske model?

### **Procesbeskrivelser**

Et andet meget vigtigt element i opstillingen af den konceptuelle model er at beslutte, hvilke simplifikationer der skal laves i procesbeskrivelserne. Selvom vi eksempelvis ved, at der foregår sprækkestrømning i den øverste del af moræneler, vil det til mange formål ikke være nødvendigt at beskrive sprækkestrømninger eksplicit. Tilsvarende ved vi, at strømningsbilledet i den umættede zone er 3-dimensionalt, men vi kan alligevel som regel nøjes med 1-dimensionel modellering. En konceptuel model indeholder således ikke den bedst mulige viden om processerne, men beskriver det niveau af simplifikationer, vi vurderer som tilstrækkelig til at løse en given modelleringsopgave. Kapitel 4 i Håndbog i grundvandsmodellering (Sonnenborg og Henriksen, 2005) indeholder en nærmere beskrivelse heraf og en tabel med vejledning i valg af kompleksitetsniveau for procesbeskrivelser.

### **Parametrisering – strukturelle elementer**

En grundvandsmodel kan i princippet have forskellige parameterverdier i alle modelgrids. Det ville resultere i tusindvis af forskellige parameterverdier, som vi aldrig vil kunne fremskaffe feltdata til at estimere. For at undgå overparametrisering er det derfor nødvendigt at opdele modeldomæner i strukturelle elementer, inden for hvilke parameterverdierne er konstante. Et eksempel på strukturelle elementer er hydrostratigrafiske enheder i en grundvandsmodel, som fx alle sandlag, enten i hele modelområdet eller opdelt i nogle få zoner. Et andet eksempel er jordtyper i den umættede zone, hvor der typisk benyttes samme hydrauliske parameter for alle modelgrids med samme jordtype.

Denne opdeling i strukturelle elementer er meget afgørende for hele den hydrologiske model og specielt for kalibreringen. I den forbindelse vurderes det, hvilke parameterverdier der kan fastlægges ud fra feltdata eller erfaringsverdier, og hvilke der skal estimeres via kalibrering. Det antal parametre, det er muligt at bestemme i en kalibreringsøvelse, afhænger af den informationsværdi, som kalibreringsdataene indeholder. Som en tommelfingerregel vil det sjældent være muligt at bestemme mere end 5-10 parameterverdier med tilstrækkelig nøjagtighed.

## **Randbetingelser**

Det er meget vigtigt at vælge naturlige randbetingelser, som er godt bestemt, fx et trykniveau ved havet eller en rand, hvorigennem der ikke sker nogen strømning. Hvis sådanne randbetingelser ikke kan opnås i umiddelbar nærhed af interesseområdet, kan det være nødvendigt at flytte randen langt væk, så indflydelsen af evt. unøjagtige randbetingelser reduceres. Randbetingelser er mest et problem i forbindelse med lokale modeller, hvor der ønskes stor nøjagtighed i et lille område. Her vil en søgning efter gode randbetingelser kunne resultere i en flerdobling af modelleringsområdet. I sådanne situationer kan det ofte være en god ide at benytte randbetingelser genereret af en regional model, som fx DK-modellen.

## **Inputdata**

Inputdata, der skal anvendes til at drive modellen, skal analyseres. Gode klimadata er meget afgørende for en hydrologisk model. Herudover har grundvandsmodeller behov for gode data om vandindvindinger. Endelig er der behov for data til kalibrering og validering, typisk vandføringsmålinger og trykniveauer. Dynamiske modeller benytter tidsserier direkte, mens stationære modeller benytter en enkelt størrelse, ofte middelværdien, til at karakterisere en inputvariabel.

## **Forståelse af strømningsforhold og vandbalancer**

Det er væsentligt, at modelløren, som et led i etableringen af den konceptuelle model, skaber sig en forståelse af det hydrogeologiske system, der skal modelleres. Det inkluderer en semi-kvantitativ fornemmelse af strømningsretninger og vandbalanceforhold i området. En sådan forståelse er nødvendig for at kunne træffe de rigtige valg med hensyn til procesbeskrivelse, parametrisering og randbetingelser. Samtidig er det en nødvendig forudsætning for at kunne vurdere rimeligheden af de modelresultater, der fremkommer løbende gennem modelleringsprocessen, herunder hurtigt at identificere de evt. fejl, der ofte opstår og rettes undervejs.

## **Anbefalinger**

Det anbefales, at der i den konceptuelle model bl.a. lægges vægt på følgende forhold:

- I tilfælde hvor den geologiske modellering er foretaget på forhånd i en særskilt opgave, skal det vurderes, hvor godt den geologiske model passer til den hydrologiske modellering, der skal foretages, og hvilke ændringer der i givet fald skal gennemføres.
- Det vurderes hvilket niveau af kompleksitet, der er nødvendigt i procesbeskrivelsen. Som hovedregel vælges de simpleste procesbeskrivelser, som vurderes tilstrækkelige til at løse den givne opgave.
- Parametriseringen med opdeling af et modeldomæne i strukturelle elementer bør gennemføres, således at antallet af parameterværdier, der skal fastsættes gennem kalibrering, kan holdes så lavt som muligt.
- Randbetingelser bør vælges, så de enten er nøjagtige eller placeres langt væk fra interesseområdet. Ved lokale modeller bør det overvejes at benytte randbetingelser genereret af en regional model, som fx DK-modellen.
- Modellørens forståelse af det hydrogeologiske system inkl. strømningsveje og vandbalancer i området bør beskrives som et vigtigt led i den konceptuelle model.

### 4.7.3 Behov for alternativ konceptuel model?

#### Hvorfor benytte flere konceptuelle modeller?

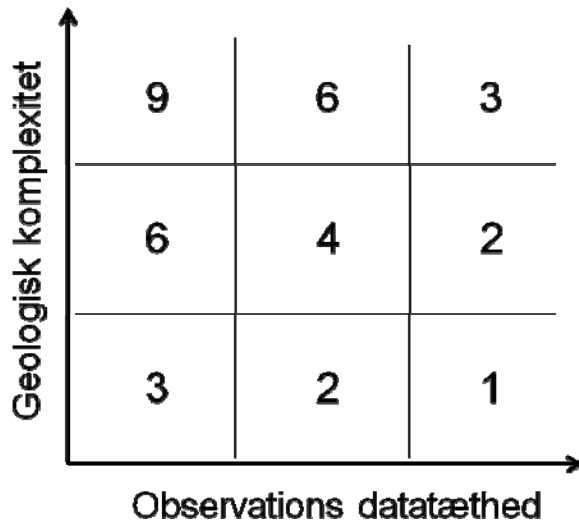
Den konceptuelle model vil i nogle sammenhænge udgøre den væsentligste usikkerhedskilde. Det kan derfor være nødvendigt at overveje, om der kan være behov for at formulere alternative konceptuelle modeller. Opstillingen af alternative konceptuelle modeller vil ofte være forbundet med en del ekstra arbejde, hvorfor det vil være en god ide at gennemføre en usikkerhedsvurdering af alternativer, før det egentlige arbejde påbegyndes. Formålet med usikkerhedsvurderingen vil være at afklare forhold omkring forventede konceptuelle modelusikkerheder i forhold til observationsdatas tæthed og kvalitet og i forhold til forventet effekt på modellens resultat.

Erfaringerne tyder på, at usikkerheden forbundet med den konceptuelle model i nogen grad kan undertrykkes af kontekstspecifik kalibrering (Højberg and Refsgaard, 2005; Troldborg et al., 2007). Populært sagt kan man kalibrere sig ud af en utilstrækkelig geologisk model og simuleringresultatet vil være forholdsvis sikkert, så længe man ikke bevæger sig for langt væk fra kalibreringsdata. Eksempelvis viser modelresultater baseret på tre forskellige geologiske modeller af et område nær Esbjerg nogenlunde ens resultater når det drejer sig om beregning af trykniveaustyrede indvindingsoplande, mens de samme tre modeller viser større variation, når der sammenlignes på aldersfordelinger af indvindingsoplandene (Harrar et al., 2003). I modellerne er der anvendt mange trykniveau- og afstrømningsdata i kalibreringen, mens der ikke er foretaget kalibrering af transportegenskaberne. Erfaringerne fra Geo-vejledningen om indvindingsoplande viser, at den geologiske model kan have ekstrem stor betydning for beregning af indvindingsoplande, når modellerne ikke har data at blive kalibreret imod (Iversen et al., 2010).

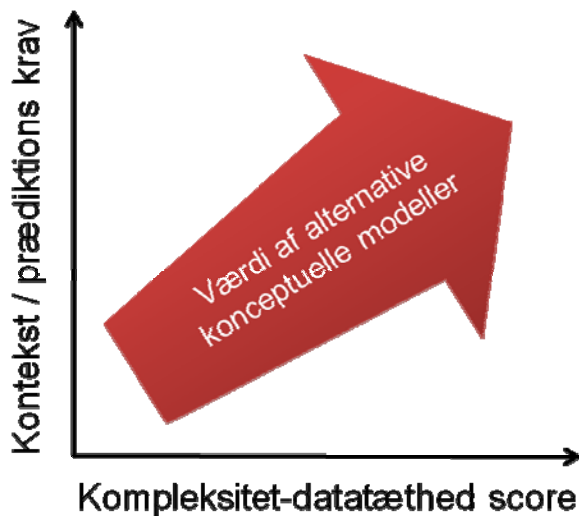
#### Usikkerhedsvurdering af delelementer i den konceptuelle model

Usikkerhedsvurderingen består af to delkomponenter. Første del består i at afveje usikkerheden på delelementer i den konceptuelle model i forhold til den hydrologiske evidens. Samlet set må det forventes, at usikkerheden på den geologiske model sat i forhold til kalibreringsgrundlaget er afgørende for, i hvor høj grad usikkerheden på den konceptuelle model påvirker den numeriske models prædiktionssevne (Figur 2). Jo flere data vi har at tune modellen efter, og jo bedre kvalitet og rumlig/tidslig fordeling dataene har, des mindre betyder det, om vi har skruet vores konceptuelle model rigtig sammen. Typisk vil der være størst datatæthed for trykniveau-observationsdata, mindre tæthed for afstrømningsdata og mindst tæthed for koncentrations- og miljøtracerdata. Endnu færre data eksisterer for områder som vandløbsøkologi, mens der i sagens natur ingen observationsdata eksisterer for fremtidsscenerier, eksempelvis klimaændringspåvirkninger.

Anden del af usikkerhedsvurderingen har til formål at afdække behovet for alternative konceptuelle modeller. I modelleringskonteksten handler det om, hvor robust en beslutning, der skal træffes, over for usikkerhed på konceptuel model, og hvor meget står der på spil - hvad er risikovilligheden? Afhængigt af hvilke krav der stilles til prædiktionssevne, og i hvor høj grad modellen skal bruges uden for kalibreringskontekst, vil betydningen af usikkerhed på den konceptuelle model og manglende observationsdata være styrende for behovet for alternative konceptuelle modeller (Figur 3).



Figur 2 Første del af usikkerhedsvurderingen består i at afveje usikkerheden på delelementer i den konceptuelle model i forhold til den hydrologiske evidens. I dette eksempel gives en score for betydning af alternative konceptuelle modeller som funktion af geologisk kompleksitet/usikkerhed og observationsdatatæthed/-kvalitet/-fordeling. Med observationsdata menes observationsdata, der anvendes i den hydrologiske kalibreringsfase, og som er inden for den kontekst, hvori modellens prædiktioner skal anvendes. Scoren anvendes i anden del af usikkerhedsvurderingen.



Figur 3 Anden del af usikkerhedsvurderingen afdækker behovet for alternative konceptuelle modeller gennem en afvejning af prædiktions krav i forhold til scoren usikkerhed på delelementer i forhold til hydrologisk evidens. Følges eksemplet ovenfor vil dette være styret af prædiktionskrav i forhold til scoren fra Figur 2.

### Hvordan kan alternative konceptuelle modeller opstilles?

Forskellene på de konceptuelle modeller er i nogle tilfælde afgrænset til forskelle i geologiske modeller, mens det i andre tilfælde kan bestå af forskellige procesligninger, randbetingelser og lignende. Mens det for randbetingelser, inputdata og procesligninger er forholdsvis indlysende, hvordan der kan opstilles alternativer, så er det mere indviklet med den

geologiske model. Den geologiske modellering er ifølge Geo-vejledning 3 opdelt i tre dele: den geologiske forståelsesmodel, den rumlige geologiske model og den hydrostratigrafiske model (Jørgensen et al., 2008). Den rumlige geologiske model og den hydrostratigrafiske model er begge digitale modeller og sidstnævnte vil kunne indarbejdes direkte i den numeriske model uden yderligere oversættelse. Den geologiske forståelsesmodel indeholder primært en sammenstilling af eksisterende litteratur og geologiske tolkninger, og vil i denne sammenhæng ikke være relevant at lave alternative modeller for. De to digitale modeller indeholder udprægede tolkningselementer, og hvis det vurderes, at der er brug for alternative geologiske modeller, så vil det være på disse stadier, de kan udvikles. Den rumlige geologiske model skal ses som en database for den geologiske forståelse, og dækker kun områder, hvor der er relativt sikkert kendskab til geologien. I den hydrostratigrafiske model skal der derimod udføres en hydrostratigrafisk tolkning i hele området, dvs også i området, hvor geologien er relativt ukendt, og hvor det derfor ofte vil være mest oplagt at udvikle alternative tolkninger.

Det er meget vigtigt at kommunikere de subjektive tolkninger, der er indbygget i både den rumlige geologiske model og den hydrostratigrafiske model. Det er i de bevidste valg, som modelløren træffer undervejs i tolkningsprocessen, at de alternative muligheder opstår. Det må antages, at tolkningerne kan simplificeres, kompliceres eller i nogle tilfælde grundlæggende ændres. Dette kan fx dreje sig om ændringer af begravede dales bredde, dybde, fyld eller måske endda forløb eller eksistens. På denne måde kan der udarbejdes alternative tolkninger med simplificeringer og/eller udvidelser af tolkningsprincippet og alternativer til strukturforløb og laggrænser. Endelig kan der udvikles stokastiske eller statistiske tolkningsmetoder, som kan udgøre alternativer til den traditionelle tolkning, enten inden for dele af modelområdet eller som delementer i den rumlige geologiske model.

### **Anbefalinger**

Det anbefales, at der gennemføres en usikkerhedsvurdering af delementer i den konceptuelle model. Formålet med usikkerhedsvurderingen er, at svagheder i den konceptuelle model skal overvejes i forhold til prædiktionskrav, så det kan afklares, om der skal udvikles eventuelle alternativer af delementer i den konceptuelle model. Udviklingen af alternative konceptuelle modeller vil have det primære formål at muliggøre en følsomhedsanalyse af modellen, hvor den konceptuelle model også medtages. Sekundært vil de kunne anvendes i forbindelse med hypotesetest i den numeriske model.

## **4.7.4 Review**

### **Hvorfor er det nødvendigt med eksterne reviews?**

Der findes ikke to modelleringsopgaver som er ens. De adskiller sig på mange væsentlige områder, både med hensyn til det fysiske system (geologi, klima, arealanvendelse), tilgængelighed af data og med hensyn til opgavens formål, ønsker til nøjagtighed, økonomiske ressourcer, interessenter mv. I forbindelse med selve modelleringsarbejdet skal der træffes hundredvis af små og store beslutninger, om hvilke prioriteringer der skal laves, hvilke data der skal inddrages, hvordan data tolkes, hvilke numeriske værktøjer der benyttes til modelopstilling, kalibrering, osv. I nogle situationer vil forskellige metoder kunne lede til samme mål, om end det for forskellige modellører kan kræve forskelligt ressourceforbrug, mens det

i andre situationer ikke er tilfældet. Derfor er det umuligt at lave en detaljeret teknisk vejledning, som giver svar på alle spørgsmål i en hydrologisk modelleringsopgave. Tekniske anvisninger med checklister og beskrivelser af, hvad der skal laves, er nyttige, men på grund af opgavernes forskelligartethed og de mange beslutninger undervejs, kan man sagtens komme i den situation, at selv om man har gennemført alle de aktiviteter, der er beskrevet i en teknisk vejledning, er resultatet alligevel fagligt utilfredsstillende.

Den situation, at tekniske vejledninger i hydrologisk modellering er nyttige, men ikke i sig selv en garanti for god kvalitet, er ikke forskellig fra situationen i så mange andre komplekse beslutningssituationer, som fx anlægsprojekter. For at sikre bedst mulig kvalitet i sådanne situationer, er det internationalt erkendt, at det er vigtigt at inddrage uafhængig faglig erfaring til at vurdere det gennemførte arbejde. I den sammenhæng benyttes peer reviews, som også er den mest anerkendte metode til at skelne god og dårlig kvalitet i forskningsverdenen.

Derfor er reviews det vigtigste element i en kvalitetssikring af modelleringsarbejdet. Der skal foretages to typer reviews:

- *Interne reviews.* Modelløren's organisation skal sørge for interne reviews, hvor modelleringsarbejdet kvalitetssikres af kollegaer, der ikke selv har været involveret i arbejdet. Interne reviews kan foregå løbende, men bør som minimum foregå ved de milepæle, der svarer til opgaverne 2.9, 4.7, 4.9 og 5.5 (Tabellerne 2, 4 og 5). Alle velrenommerede rådgivende firmaer har et internt kvalitetssikringssystem. Derfor indeholder nærværende Geo-vejledning ingen angivelser af, hvordan den interne kvalitetssikring bør foretages.
- *Eksterne reviews.* Vandressourceforvalteren skal sørge for, at der gennemføres eksterne reviews i tilknytning til afslutningen af de forskellige modelleringsstrin. Eksterne reviews er vandressourceforvalterens sikkerhed for en god kvalitet. Ud over at kvalitetssikre den tekniske standard af modelleringen, vil eksterne reviews ofte have den ekstra nyttevirkning, at troværdigheden af det færdige arbejde hos tredjeparter øges. Det er specielt vigtigt i situationer, hvor modelleringsarbejdet udgør grundlaget for kontroversielle beslutninger, eller hvor resultaterne skal videregives til opfølgning hos kommuner eller interessenter. I den sammenhæng er det vigtigt, at reviewet gennemføres af fagfolk, der er eksterne i forhold til opgavens parter.

### **Principper for godt eksternt review**

Det er meget væsentligt, at revieweren er bevidst om sin opgave og rolle og bidrager konstruktivt til modelleringsopgavens gennemførelse. Vigtige principper i den sammenhæng er:

1. Et review skal gennemføres af fagfolk, som har lige så stor modelleringsmæssig erfaring og indsigt som modelløren. Ved model appraisal (se nedenfor) kan der dog stilles mindre krav til reviewerens specifikke modelleringserfaring. Reviewerens vigtigste redskaber er modelleringserfaring, fagligt overblik og sund fornuft.
2. Revieweren refererer til vandressourceforvalteren, men skal i rent tekniske spørgsmål optræde som uafhængig ekspert.
3. Revieweren må ikke være inhabil i forhold til nogle af modelleringsopgavens aktører og må ikke på anden vis have interesser på spil i opgaven. Revieweren kan dog godt være en konkurrent til modelløren, såfremt de etiske principper i næste punkt overholdes.

Dog må revieweren ikke have været i direkte konkurrence med modelløren om at vinde udbuddet af den pågældende modelopgave.

4. Revieweren skal optræde neutralt i forhold til modelløren, selv om de måske i andre sammenhænge kan være konkurrenter. Det indebærer bl.a., at revieweren skal bestræbe sig på at optræde fordomsfrit og ikke forsøge at opnå konkurrencemæssige fordele af sin funktion som reviewer.
5. Reviewerens opgave er ikke primært at påpege fejl hos modelløren, men at fremdrage kritiske elementer i modelleringsarbejdet, som kan have behov for yderligere behandling. Det kan fx dreje sig om vurderinger af kritiske forudsætninger.
6. Revieweren skal udføre sine vurderinger med respekt for de givne rammer med hensyn til balancen mellem formål, ønsket nøjagtighed, tilgængelige data, allokeret tid og penge, mv. dvs. revieweren må ikke forvente en mere ambitiøs opgaveløsning, end der med rimelighed kan forventes med de til rådighed værende ressourcer.
7. Revieweren må gerne komme med forslag til løsninger, men skal ikke bidrage til modelleringsopgaven.
8. Reviews gennemføres typisk i forbindelse med afslutningen af et af de sidste fire modeltrin (Figur 1). Her vil modelløren typisk præsentere resultatet af den gennemførte modellering og fremlægge forslag til arbejdet i næste trin i form af en skriftlig rapport og en præsentation på et møde med deltagelse af vandressourceforvalter, modellør, reviewer og evt. interessenter. Reviewet vil her danne udgangspunkt for, at vandressourceforvalteren beslutter, om det foreliggende modelleringsarbejde kan godkendes.
9. Det bør fremgå af udbudsmaterialet, at der vil være en ekstern reviewer tilknyttet projektet samt hvad opgaven omfatter.
10. Omkostningerne til revieweren vil typisk udgøre 5-10 % af udgifterne til selve modelleringsarbejdet.

### **Forskellige typer reviews**

Afhængig af opgavetype kan reviews gennemføres med større eller mindre grundighed. I Sonnenborg og Henriksen (2005) skelnes mellem følgende typer reviews:

- *Model appraisal*, dvs. en gennemgang af modelrapporten af en fagperson, som ikke nødvendigvis er modellør.
- *Peer review*, dvs. et review gennemført af "ligemænd", hvilket vil sige af uafhængige modellører.
- *Model audit*, som ud over en gennemgang af en modelrapport også omfatter en gennemgang af samtlige modelsetupfiler, simuleringer og output af en erfaren modellør.

En appraisal er mindre modelteknisk end et peer review, som omvendt ikke er lige så omfattende som en modelaudit. I Appendix B (Checklists for Reviews/Audits/Appraisals, pp 6-9) er der forslag til tjeklister for model appraisal og peer review, incl. score-lister, der beskriver modellens samlede performance.

### **Anbefalinger**

Det anbefales, at der gennemføres eksterne reviews i modelleringsopgaver baseret på ovenstående principper. Omfanget af reviews bør afhænge af opgavetypen. Tabel 7 giver en oversigt over hvilke typer reviews, der kan være brug for i forskellige situationer. Modellering i forbindelse med grundvandskortlægning vil ofte falde i kategorien 'Detailberegninger, planlægningsstudie' (næstsidste kolonne). Ud over at benytte en reviewer til selve mo-

delleringsopgaven, anbefales det, at vandressourceforvalteren overvejer at tilknytte revieweren allerede i forbindelse med valg af modellør i udbudsfasen under Trin 1.

*Tabel 7 Behov for forskellige typer review i forskellige situationer*

Projektfase	Screening	Overslagsberegninger	Detailberegninger	
			Planlægningsstudie	Projekter med særlig økonomisk/politisk betydning (høj risiko)
Trin 2 Data og konceptualisering	Model appraisal af samlet opgave	Model appraisal	Peer review	Peer review
Trin 3 Modelopstilling		Intet	Peer review	Peer review
Trin 4 Kalibrering og validering		Peer review	Peer review	Model audit
Trin 5 Simulering og evaluering		Intet	Peer review	Model audit
<p><b>Model appraisal:</b> gennemføres af fagmand (ikke nødvendigvis modelleringsekspert)  <b>Peer review:</b> gennemføres af modelekspert  <b>Model audit:</b> grundigt review inklusiv test af inputfiler, simuleringer og beregningsnøjagtighed</p>				

#### 4.7.5 Valg af kalibrerings- og valideringskriterier og mål for nøjagtighed

Et nøjagtighedskriterium er et numerisk mål for overensstemmelsen mellem en modelsimulering og observerede feltdata og benyttes som mål i kalibrerings- og valideringsprocedurer. Et nøjagtighedskriterium består af to delelementer:

- Valg af kvalitative og kvantitative kriterier
- Numeriske mål for nøjagtigheden (fx talværdi for størrelsen af  $R^2$ , RMS, mv.)

Kriterier og mål vil variere fra opgave til opgave bl.a. afhængig af model, krav til nøjagtighed, områdets karakteristika (fx trykniveauvariation inden for området, heterogenitetsforhold, maskevidde, variationer i afstrømning, osv.). Vejledningen kan give en ramme med "bløde vejledninger", men det afgørende er, at aktørerne konkret tager stilling til, hvad der skal benyttes i den konkrete opgave.

#### Valg af kvalitative og kvantitative kriterier (objektivfunktion)

Kvalitativt bør det gælde, at (a) de estimerede parametre har realistiske værdier; (b) residualer er rimeligt jævnt fordelt i tid og sted; og (c) områdets hydrologiske karakteristika reproduceres af modellen (fx strømningsretning, gradient, beliggenheden af grundvandskel, hydrograf- og vandstandsdyamik, forureningspåvirkning).

Ud over de kvalitative kriterier opstilles udvalgte kvantitative kriterier, der beregnes statistisk ud fra simulerings- og observationsdata. I Tabel 8 er vist eksempler på kvantitative nøjagtighedskriterier til brug for kalibrering og validering. Der er ikke tale om en fuldstændig liste, og de foreslåede kriterier kan evt. suppleres med andre. Tabel 9 giver vejledning i valg af kvantitative kriterier tilpasset formålet med opgaven.

**Tabel 8 Kvantitative nøjagtighedskriterier**

<p><b>Kriterium 1.</b> Trykniveauekriterium med udgangspunkt i middelfejlen. Middelfejl på potentialerne (ME), relateres til den maksimale variation i de observerede potentialer inden for de enkelte delmodeller:</p> $ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\psi_{obs,i} - \psi_{sim,i})$	$\frac{ ME }{\Delta h_{max}} \leq \beta_1$
<p><b>Kriterium 2.</b> Trykniveauekriterium, der relaterer RMS til standardafvigelsen på observationerne (<math>s_{obs}</math>), se Appendix D. Kriteriet forudsætter en konkret vurdering for såvel stationær som dynamisk kørsel (idet ikke stationaritet typisk vil påvirke den samlede <math>S_{obs}</math>).</p> $RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\psi_{obs,i} - \psi_{sim,i})^2}$	$\frac{RMS}{s_{obs}} \leq \beta_2$
<p><b>Kriterium 3.</b> Trykniveauekriterium baseret på vurdering af spredningen på residualerne i forhold til standardafvigelsen på observationsværdierne. Kriteriet er beslægtet med kriterium 2, men anvendes, hvis der er variabel usikkerhed på de inkluderede observationsdata.</p> $SE = \sqrt{\frac{1}{n-P} \sum_{i=1}^n w_i (\psi_{obs,i} - \psi_{sim,i})^2}$	$SE \leq \beta_2$
<p><b>Kriterium 4.</b> Trykniveauekriterium der tager udgangspunkt i variationen i potentialerne for modelområdet (<math>\Delta h_{max}</math>). RMS, se Kriterium 2.</p>	$\frac{RMS}{\Delta h_{max}} \leq \beta_3$
<p><b>Kriterium 5.</b> Vandføringskriterium der udtrykker modellens evne til at simulere dynamikken i afstrømning baseret på <math>R^2</math>-værdien (Nash and Sutcliffe, 1970). Højere <math>R^2</math> værdi kan forventes fra store oplande med stor årtidsvariation i vandføring (variation fastlægges ud fra <math>Q_{10}/Q_{90}</math>).</p> $R^2 = \frac{\sum (\psi_{obs} - \bar{\psi}_{obs})^2 - \sum (\psi_{obs} - \psi_{sim})^2}{\sum (\psi_{obs} - \bar{\psi}_{obs})^2}$	$R^2 = f(Q_{var}) < \beta_4$ <p>(~ 4 typer defineret af <math>Q_{var}</math>)</p>
<p><b>Kriterium 6.</b> Vandbalancekriterium baseret på vandbalancefejlen på middelvandføringen.</p> $Fbal = 100 \frac{\bar{Q}_o - \bar{Q}_s}{\bar{Q}_o}$	$ Fbal  = f(Q_{mid}) < \beta_5$ <p>(~ 4 typer defineret af <math>Q_{mid}</math>)</p>
<p><b>Kriterium 7.</b> Vandbalancekriterium baseret på vandbalancefejlen på sommervandføringen. Svarer til Fbal jf. kriterium 5, men opgjort for juni-juli-august.</p>	$ Fbal  = f(Q_{min}) < \beta_6$ <p>(~ 4 typer defineret af <math>Q_{min}</math>)</p>
<p><b>Kriterium 8.</b> Fraktilværdi kriterium vurderet på afstrømningsregime. Der benyttes <math>Q_{90}</math> eller <math>Q_{95}</math>, altså en vandføring der underskrides i hhv. 10 % eller 5 % af tiden. Kvalitativ vurdering på grafisk afbildning.</p>	<p>Sammenligning af målt og simuleret <math>Q_{90}/Q_{95}</math> for udvalgte perioder på vandløbskort</p>
<p><b>Kriterium 9.</b> Aldersdatering/miljøtracere. Forudsætter partikelbane- eller stoftransportsimulering med henblik på simulering af koncentration af fx CFC eller andre miljøtracere. Simuleret koncentration sammenlignes med målt koncentration. Kvalitativ vurdering på profil..</p>	<p>Sammenligning af observeret og simuleret koncentrationer på geologisk snit samt i indvindingsboringer / vandløbspunkter</p>
<p><b>Kriterium 10.</b> Temperatur. Kvalitativ vurdering på vandløbskort.</p>	<p>Simuleret og målt temperatur i vandløb</p>

Tabel 9 Valg af kvantitative nøjagtighedskriterier afhængigt af modelformål

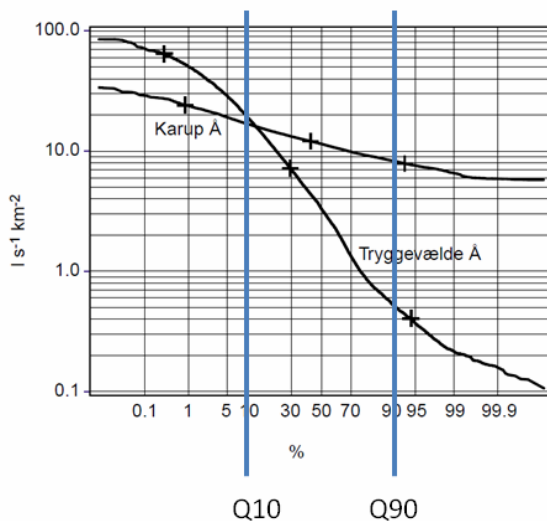
Modelformål	ME/ dh <sub>max</sub>	RMS/ S <sub>obs</sub> eller SE <sup>1)</sup>	RMS/ dh <sub>max</sub>	R <sup>2</sup>	F <sub>bal</sub> år	F <sub>bal</sub> , som	Q90- Q95	Alder/ Tracer	Tem p.
Kriterium	1	2/3	4	5	6	7	8	9	10
Teste hydrostratigrafisk model	X	X	X		X	X		X	
Fastlægge indvindingsoplande/grundvandsdannende oplande	X	X	X		X	X		X	
Vandbalance	X	X	X	X	X	X			
Grundvandsindvindingsseffekt på vandføring i vandløb	X	X	X	X	X	X	X		? <sup>2)</sup>
Diffus forurening	X	X	X	X	X	X		X	
Effekter af klimænderinger	X	X	X	X	X	X	X		X <sup>1)</sup>

Note

1): Hvis der er variabel usikkerhed på de inkluderede observationsdata (jf. Sobs) anvendes kriterium 4 (baseret på SE) i stedet for kriterium 3 (baseret på RMS/dh<sub>max</sub>), se også Appendix D

2): Vandløbstemperatur er vigtig, hvis der fokuseres på ferskvandsøkologi

Vedr. **Kriterium5** og kravet til oplandsareal jf. R<sup>2</sup> er i Figur 4 vist et eksempel på de fire oplandstyper, der benyttes ved fastlæggelse af R<sup>2</sup> krav jf. variationen i vandføring over året (Q<sub>var</sub>).



Type 1:  $Q_{10}/Q_{90} < 5$

Type 2:  $5 < Q_{10}/Q_{90} < 10$

Type 3:  $10 < Q_{10}/Q_{90} < 20$

Type 4:  $20 < Q_{10}/Q_{90}$

Eksempler:

Type 1: Karup å, Skjern å

Type 2: Ribe å, Uggerby å, Odense å

Type 3: Havelse å, Åmose å

Type 4: Tryggevælde å, Tude å

Figur 4 Klassificering i oplandstyper (Q<sub>var</sub>) i forbindelse med Kriterium 5 (R<sup>2</sup>). Figur fra Ovesen et al. (2000)

Vedr. **Kriterium 6** om F<sub>bal</sub> på årsværdier skelnes der mellem fire grupper af årlige middelvandføringer (Q<sub>mid</sub>): a) meget små Q<sub>mid</sub> (< 100 l/s eller 3 mio. m<sup>3</sup> pr. år), b) små Q<sub>mid</sub> (100 - 500 l/s eller 3 - 15 mio. m<sup>3</sup> pr. år), c) mellem store Q<sub>mid</sub> (500 - 2000 l/s eller 15 - 60 mio. m<sup>3</sup> pr. år) og d) store (> 2000 l/s eller 60 mio. m<sup>3</sup> pr. år).

Vedr. **Kriterium 7** om  $F_{bal}$  på sommerværdier skelnes der mellem fire grupper ( $Q_{min} \sim$  middel sommervandføring jun-jul-aug): a) meget små  $Q_{min}$  ( $< 10$  l/s eller  $0.3$  mio.  $m^3$  pr. år), b) små  $Q_{min}$  ( $10 - 50$  l/s eller  $0.3 - 1.5$  mio.  $m^3$  pr. år), c) mellemstore  $Q_{min}$  ( $50-200$  l/s eller  $1.5- 6$  mio.  $m^3$  pr. år) og d) store  $Q_{min}$  ( $> 200$  l/s eller  $6$  mio.  $m^3$  pr. år).

Tabel 9 indeholder forslag til valg af forskellige nøjagtighedskriterier afhængig af modellens formål. I forbindelse med kalibrering kan disse kriterier sammensættes til en objektivfunktion, som skal optimeres i den inverse modellering. I den forbindelse skal vægtingen af de forskellige kriterier afspejle modellens formål, således at krydsene i Tabel 9 tildeles forskellig vægt. Det er dog vigtigt samtidig at have for øje, at der ud over optimeringen af objektivfunktion fx ved invers modellering, fortsat skal bevares fokus på, om modellen opfylder de formulerede kvalitative nøjagtighedskriterier, fx at parameterverdier er beliggende inden for fastlagte variationsrammer, at beskrivelsen af strømningsretning, gradientforhold, hydrograf mv. er repræsentativ i forhold til observationer, og at afvigelse er rimeligt jævnt fordelt i tid og sted. Processen vil derfor altid kræve en helhedsorienteret, iterativ vurdering af både de kvantitative og de kvalitative mål for nøjagtigheden, og evt. feedback til tidligere step.

### Numeriske mål for nøjagtigheden

Baseret på erfaringer fra hidtidige modelstudier i Danmark, er der i Tabel 10 angivet forslag til numeriske mål for seks af nøjagtighedskriterierne i Tabel 8. Forslagene er angivet som kravverdier til  $\beta_1 - \beta_6$  for tre forskellige ambitionsniveauer.

### Anbefalinger

Det anbefales at nøjagtighedskriterier og -mål vælges efter følgende procedure:

- Først vurderes ud fra modellens formål, hvilke kvantitative nøjagtighedskriterier i Tabel 8, der skal bringes i spil. Tabel 9 kan benyttes som vejledning hertil.
- Herefter formuleres hvilke kvalitative kriterier, modellen skal opfylde, og det overvejes samtidig, om der skal suppleres med yderligere ad hoc kriterier, så de konkrete formål for modelanvendelsen bedst muligt kan afspejles af de valgte kriterier.
- Observationsdata og de nødvendige hjælpe størrelser, der indgår i de enkelte kriterier, vurderes nøje, fx  $dH_{max}$ ,  $S_{obs}$  (jf. Appendix D) samt hvilken klasse de enkelte vandføringslokaliteter repræsenterer jf.  $Q_{var}$ ,  $Q_{mid}$  og  $Q_{min}$ .
- Endelig vurderes hvilke numeriske mål, der skal opfyldes for de enkelte kriterier. Her kan betaværdierne i Tabel 10 benyttes som vejledning.

Generelt er det vigtigt at fremhæve, at både valget af kriterier og valget af de numeriske mål, ikke bør ske ved automatiske opslag i de tre tabeller i nærværende afsnit, men bør vurderes konkret i forhold til den aktuelle modelleringsopgave. Der foreligger således i dag et begrænset grundlag for vurdering af de forskellige hjælpe størrelser og betaværdier, specielt for små oplande. Derfor anbefales det i en periode at bruge et bredt spektrum af kriterier, dvs. både Kriterium 2 (eller 3) og 4 til fastlæggelse af RMS, indtil erfaringsbasen er bedre dokumenteret. Det samme gælder krav til  $R^2$  og  $F_{bal}$ , sommer. Man vil ikke kunne opfylde kravene i Tabel 10 til  $R^2$  og  $F_{bal}$ , sommer - hvis vandbalancen er dårlig bestemt.

Tabel 10 Numeriske mål for nøjagtigheden (kravværdier til beta)

	Screening	Overslagsbe- regning	Detailmodelle- ring
<b>Kriterium 1</b> $\beta_1$ (ME/dH <sub>max</sub> )	0,05	0,025	0,01
<b>Kriterium 2 og 3</b> $\beta_2$ (RMS/S <sub>obs</sub> - Se Appendix D)	2,6	2	1,65
<b>Kriterium 4</b> $\beta_3$ (RMS/dH <sub>max</sub> )	0,1	0,05	0,025
<b>Kriterium 5</b> (80 % af stationerne skal overholde kravværdien) $\beta_4$ (R2)			
Type 1 $Q_{10}/Q_{90} < 5$	0,55	0,65	0,75
Type 2 $5 < Q_{10}/Q_{90} < 10$	0,60	0,70	0,80
Type 3 $10 < Q_{10}/Q_{90} < 20$	0,65	0,75	0,85
Type 4 $20 < Q_{10}/Q_{90}$	0,70	0,80	0,90
<b>Kriterium 6</b> (80 % af stationerne skal overholde kravværdien) $\beta_5$ (Fbal, år)			
Type 1 $Q_{mid} < 100$ l/s	40	25	15
Type 2 $100 \text{ l/s} < Q_{mid} < 500$ l/s	25	15	10
Type 3 $500 \text{ l/s} < Q_{mid} < 2000$ l/s	15	10	5
Type 4 $2000 \text{ l/s} < Q_{mid}$	10	5	3
<b>Kriterium 7</b> (80 % af stationerne skal overholde kravværdien) $\beta_6$ (Fbal, sommer)			
Type 1 $Q_{min} < 10$ l/s	120	80	50
Type 2 $10 \text{ l/s} < Q_{min} < 50$ l/s	80	50	30
Type 3 $50 \text{ l/s} < Q_{min} < 200$ l/s	50	30	15
Type 4 $200 \text{ l/s} < Q_{min}$	30	15	10

#### 4.7.6 Modelkalibrering

Kalibrering er et af de teknisk vanskeligste elementer i selve modelleringen. Både selve kalibreringsprocessen og tekniske aspekter af automatisk kalibrering (invers modellering) er udmærket beskrevet i Kapitlerne 13 og 14 i Håndbog i grundvandsmodellering (Sonnenborg og Henriksen, 2005). Dette afsnit indeholder ikke en komplet beskrivelse af kalibreringsprocessen, men behandler blot enkelte spørgsmål, som ikke er beskrevet særlig dybdegående i Sonnenborg og Henriksen (2005).

##### Invers eller manuel kalibrering?

Indtil for få år siden blev invers modellering næsten kun gennemført for stationære modeller, fordi computerkravene til at gennemføre invers modellering for dynamiske modeller var for høje til, at det kunne passes ind i normale modelleringsopgaver. Den situation har ændret sig, så invers modellering nu benyttes som standard i næsten alle modelstudier, inklusive dynamiske modeller.

PEST (Doherty, 2005, 2010) er det mest anvendte værktøj til autokalibrering inden for grundvandsmodellering. PEST's standardmetode er en lokal gradientbaseret optimeringsalgoritme. For komplekse modeller med mange parametre og for ikke-lineære systemer vil gradientbaserede metoder ofte finde et lokalt optimum i stedet for det globale optimum, hvorfor det er nødvendigt at gentage den inverse modellering et antal gange for at undersøge, hvor følsom de optimerede parameterverdier er over for startverdier. Der findes mere avancerede globale optimeringsalgoritmer, som er væsentlig bedre til at finde det globale optimum. Det gælder eksempelvis de såkaldte shuffled complex evolution (SCE) algoritmer (Duan et al., 1992). MIKE SHE's AUTOCAL (Madsen, 2000) er baseret på denne metode. PEST indeholder ligeledes to globale optimeringsrutiner som supplement til den lokale gradientbaserede. Den ene tilhører som AUTOCAL gruppen af SCE, mens den anden metode er baseret på en covariance matrix adaptation – evolutionary strategy (CMAES) (Hansen and Ostermeier, 2001; Hansen et al., 2003). Ulempen med de globale optimeringsalgoritmer er, at de kræver mange flere modelberegninger og derfor er meget beregningstunge, hvilket kan være begrænsende for deres anvendelse i praksis, især ved store komplekse integrerede dynamiske modeller.

### **Dynamisk eller stationær kalibrering?**

Det anbefales som regel at anvende så simpel en model, som det kan retfærdiggøres under hensyntagen til de ønskede modelanvendelser, ambitionsniveau, mv. En væsentlig beslutning i den sammenhæng er spørgsmålet, om det er tilstrækkeligt at anvende en stationær model, eller om en dynamisk model er nødvendig, jfr. Afsnit 4.7.1. Det er også nødvendigt at vurdere, hvorvidt modellen skal kalibreres mod dynamiske eller stationære data.

Modeller, som anvendes dynamiske, skal som udgangspunkt kalibreres dynamisk.

Modeller, som anvendes stationært, fx ved at benytte et stationært strømningsfelt til partikelbanesimulering af indvindingsoplande, kan kalibreres enten stationært eller dynamisk. En stationær kalibrering er hurtigere, da den kræver mindre beregningstid og mindre databehandling. For integrerede overfladevands-grundvandsmodeller, der simulerer både trykniveauer og vandføringer, er det imidlertid problematisk, at konceptualisere vandføringen som en stationær værdi. Skal man eksempelvis kalibrere mod minimumsvandføringer, hvor de fleste data (synkronmålinger) findes, men hvor det er uklart hvilken nettonedbør, der skal benyttes, eller skal man benytte den årlige nettonedbør og kalibrere mod middelvandføringer? Selvom en model ikke skal anvendes til at prædiktere vandføringer, kan det altid anbefales at benytte vandføringsdata til kalibrering. Erfaringer fra DK-modellen viser, at forskellige konceptualiseringer af en stationær model kan resultere i vidt forskellige parameterverdier og dermed vidt forskellige strømningsmønstre (Sonnenborg et al., 2003).

### **Hvordan vægtes data til objektivfunktionen?**

Som beskrevet i Afsnit 4.7.5 benyttes ofte mange numeriske kriterier til at karakterisere, hvor god en simulering er. Ved en autokalibrering er det nødvendigt at vægte nogle af kriterierne i Tabel 8 til en objektivfunktion, som kan optimeres. Vægtningen bør afspejle formålet med opgaven, fx større vægt til vandføringskriterier og sommervandføringer, hvis opgaven drejer sig om at bestemme vandløbspåvirkninger i minimumssituationer, eller større vægt til trykniveauekriterier, hvis opgaven drejer sig om fastlæggelse af indvindingsoplande (Tabel 9). Under kalibrering af den seneste version af DK-modellen (DK-model2009) blev

der anvendt en balanceret vægtning, dvs. samlet set blev potentialerne og vandløbsafstrømningerne vægtet lige højt under kalibreringen. Inden for de to observationstyper blev der opstillet flere observationsgrupper, hvor der eksempelvis blev anvendt alle tre kriterier for vandføring (kriterium 5, 6 og 7 i Tabel 8). Vægtningen mellem observationsgrupperne inden for én datatype blev bestemt på baggrund af nogle initielle test af, hvor følsom det endelige kalibreringsresultat var over for de tildelte vægte. For en gennemgang af observationsgrupperne og deres individuelle vægte henvises til modelrapporterne for DK-model2009, der kan downloades fra [www.vandmodel.dk](http://www.vandmodel.dk).

### **Anbefalinger**

I tillæg til anbefalingerne i Kapitlerne 13 og 14 i Håndbog i grundvandsmodellering (Sonnenborg og Henriksen, 2005) anbefales følgende:

- Kalibreringen bør foretages ved brug af invers modellering i en iterativ proces, der indeholder en kritisk vurdering af, hvorvidt modellen opfylder såvel de kvantitative som de kvalitative kriterier (Afsnit 4.7.5).
- Hvis der benyttes en stationær strømningsmodel, bør det overvejes at kalibrere den for dynamiske situationer for bedre at kunne validere modellen. Samtidig bør parameterfølsomheden over for forskellige konceptualiseringer af stationære modeller undersøges.
- Vægtning af data til objektivfunktionen bør afspejle opgavens formål. Der bør foretages en følsomhedsanalyse med forskellige vægtekombinationer.

### **4.7.7 Usikkerhedsanalyser**

Inden for det seneste årti har der været en øget fokus på modelusikkerheder, og usikkerhedsanalyser er nu ved at være standard i ethvert modeljob, der udbydes. Erfaringer har imidlertid vist, at usikkerhedsvurderinger er et meget vanskeligt emne at adressere i praksis. Udfordringen er generelt ikke relateret til selve udførelsen af analyserne (Trin 5 i modelleringprocessen, Figur 1), men i højere grad til den forudgående opgave, hvor det beslutes, hvilke usikkerhedskilder der skal fokuseres på, og hvilken metode der skal vælges til gennemførelse af usikkerhedsvurderingerne.

Usikkerhedskilderne inden for modellering er mangfoldige, og den store udfordring ligger i at erkende samtlige kilder, vurdere deres betydning og efterfølgende forsøge at reducere usikkerhederne eller kvantificere deres betydning. Forskellige modeljobs vil typisk være associeret med forskellige usikkerhedskilder, ligesom betydningen af de enkelte usikkerhedskilder vil variere fra projekt til projekt. En velegnet metode til belysning af usikkerheden i ét modeljob vil således ikke nødvendigvis være optimal i andre projekter.

Den optimale usikkerhedsanalyse er en integreret del af modelopgaven, der påbegyndes helt fra modelopgavens start og indeholder følgende elementer:

- Specificering af formål for analysen
- Identificering og karakterisering af usikkerhedskilder
- Prioritering af usikkerhederne
- Håndtering af usikkerhederne

De enkelte dele gennemgås kort herunder, mens der henvises til kapitel 19 i Sonnenborg og Henriksen (2005) for en mere detaljeret beskrivelse.

### **Specificering af formål for analysen**

Formål og ambitionsniveauet for en usikkerhedsvurdering gennem et modelleringsprojekt bør fastsættes allerede i udbudsfasen. De enkelte usikkerhedskilder samt deres betydning for modelresultaterne er imidlertid sjældent kendt fra opstart af et modelprojekt, og det er derfor vanskeligt at fastsætte hvilke analyser, der skal gennemføres ved opstart. Dette har sine udfordringer mht. styring af projektforsløb samt projektøkonomien, idet der ikke kan gives tilbud på gennemførelse af en usikkerhedsanalyse, hvis omfang er ukendt. Som led i udarbejdelsen af udbudsmaterialet anbefales det, at ordregiveren får konkretiseret formål og vigtigheden af en usikkerhedsanalyse. Dette vil bl.a. indeholde en risikovurdering, hvor mulige udfald og deres konsekvens vurderes. Eksempler inden for grundvandskortlægningen kan være en vurdering af, hvorvidt et indvindingsopland kan risikere at indeholde kendte punktkilder, eller om et grundvandsdannende opland kan risikere at være beliggende i et bebygget/industrielt område. I tilfælde, hvor der potentielt er en risiko for, at indvindings-/grundvandsdannende opland kan omfatte forurenende kilder, skal det vurderes, hvor risikabelt dette vil være, og hvilke samfundsøkonomiske konsekvenser det vil kunne have. På basis af en sådan analyse bør ambitionsniveauet for usikkerhedsanalysen fastsættes, dvs. en afstemning mellem risiko og budget. Ambitionsniveauet bør fremgå af udbudsmaterialet, fx at der ønskes en løbende fokus og opsamling på potentielle usikkerhedskilder, ligesom de mulige problemstillinger beskrives (fx placering af forurenende virksomheder). Da behovet og type af analyser ikke er kendt på forhånd, anbefales det, at selve udførelsen af analyserne ikke indskrives i udbudsmaterialet. Derimod bør beløbet afsat ved afdækning af ambitionsniveauet for usikkerhedsanalysen reserveres, så en projektudvidelse er mulig, i det omfang erfaringerne gennem modelprojektet viser det nødvendigt at gennemføre usikkerhedsanalyser.

I nogle tilfælde kan det, ud fra generelle krav til modelopgavens gennemførelse eller andre overvejelser, på forhånd være specificeret hvilke usikkerhedsanalyser, der skal gennemføres, fx parameterusikkerhed eller usikkerhed i nettonedbørens størrelse og/eller fordeling. I disse tilfælde kan de ønskede analyser specificeres i udbudsmaterialet. Det skal dog understreges, at det i disse tilfælde ikke kan garanteres, at det er de mest betydende usikkerhedskilder, der bliver adresseret. Er de usikkerhedskilder, der inddrages i analysen, således af mindre betydning for modelresultaterne, vil analysen give et falsk indtryk af, at modelusikkerhederne er kendte. Er en modelopgave derfor underlagt krav om udførelse af specifikke usikkerhedsanalyser, bør analysen om ambitionsniveauet for usikkerhedsvurderingen og reservation af midler stadig foretages. Endvidere kan erfaringer opnået gennem modelprojektet afdække, at gennemførelsen af de planlagte usikkerhedsanalyser ikke er meningsfyldte, hvorfor det via udbudsbetingelserne bør være muligt at fravælge, udskyde eller omformulere de planlagte usikkerhedsanalyser ved genforhandling med den udøvende rådgiver.

### **Identificering og karakterisering af usikkerhedskilder**

Dette går ud på at identificere de forskellige usikkerhedskilder, dvs. hvor i modellen optræder usikkerheden. Denne øvelse går således ud på at gennemtænke, hvilke mulige usikkerhedskilder, der optræder i forbindelse med opstilling og kalibrering af modellen. I Tabel

11 er der givet eksempler på typiske usikkerhedskilder, der kan optræde i forbindelse med kortlægningsmodeller. Da hver modelopgave er unik mht. det fysiske system, datagrundlag, problemstillinger osv., vil usikkerhedskilderne variere fra opgave til opgave, og eksemplerne i Tabel 11 må ikke opfattes som en udtømmende liste.

Samtidigt med en identifikation skal usikkerhederne karakteriseres. Det indebærer en vurdering af vores kendskab til usikkerheden. Yderpunkter her er usikkerheder, der kan beskrives statistisk ved en forventet værdi (middelværdi) og en varians, kontra usikkerheder, hvor vi ikke kan beskrive størrelsen af usikkerheden, men blot har erkendt, at en størrelse er usikker. Inden for grundvandsmodellering er usikkerheden på den geologiske tolkning et velkendt problem. Her er det ikke umiddelbart muligt at udtrykke sikkerheden af en tolkning ved en bestemt sandsynlighed. Til gengæld kan der angives en kvalitativ vurdering af usikkerheden på tolkning vha. en farvekode (Jørgensen et al., 2008). Under karakterisering af usikkerheden afgøres endvidere, om det er muligt at reducere usikkerheden, eksempelvis ved indsamling af yderligere data.

*Tabel 11 Eksempler på usikkerhedskilder og mulige følsomhedsanalyser til vurdering af deres betydning.*

<b>Usikkerhedskilde</b>	<b>Følsomhedsanalyse</b>
Ydre randbetingelse	Test betydning af fastholdt tryk vs. no-flow randbetingelse
Udveksling med vandløb	Test betydning af en lav/høj lækage; ændre beskrivelse af udveksling (kun bestemt af vandløbslækage eller lækage + akvifer materiale)
Nedbør/ fordampning/ Nettonedbør	Variere størrelsen og/eller fordelingen
Hydrauliske egenskaber Gridopløsning	Variere parameterværdi til min. hhv. maks. af realistisk interval Halver gridopløsningen. Ultimativ test er en reduktion af gridstørrelse indtil der ikke sker ændringer i modeloutput
Stationær vs. dynamisk	Test om middel af en dynamisk simulering er lig en stationær simulering
Geologisk tolkning	Test alternative tolkninger.(Afsnit 4.7.3)
Markvanding	Variere indvindingsmængde til eksempelvis tilladelse eller højere for belysning af situationen i tørre år
Dræn	Variere dybde; anvend forskellige rumlige distribueringer, fx kun i landbrugsområder vs. hele arealet

### **Prioritering af usikkerhederne**

Efter de forskellige usikkerhedskilder er identificeret, skal der ske en prioritering af hvilke kilder, der skal inddrages i det videre forløb. Dette vil være afhængig af såvel størrelsen af de enkelte kilder (hvor usikkert er det) samt effekten af usikkerheden på modelresultaterne, og hvor kritisk dette er for den videre beslutningsproces.

Til prioritering af usikkerhederne er følsomhedsanalyser ofte et meget vigtigt redskab, hvor der afvikles modelsimuleringer med forskellige værdier af de usikre størrelser og effekten heraf vurderes ved sammenligning af modelresultaterne. En følsomhedsanalyse er standard forud for modelkalibreringen, hvor de mest følsomme størrelser udvælges til kalibreringen. Det kan imidlertid ikke garanteres, at eksempelvis de parametre, der er mest følsomme mht. kalibreringsdataene, ligeledes er de parametre, der er mest betydende over for de variable, som modellen ønskes anvendt til at simulere. Den afgørende og meget

vigtige forskel på de to følsomhedsanalyser er derfor, at følsomhedsanalysen, der udføres som del af usikkerhedsanalysen, skal vurderes på basis af de prædiktionsværdier, som modellen efterfølgende ønskes anvendt til at simulere, og ikke på kalibreringsdataene. I forbindelse med kortlægningsmodeller, hvor en af de primære opgaver er en afgrænsning af indvindingsoplandene, skal den udførte usikkerhedsanalyse således vurderes på baggrund af, hvor meget en given ændring af en usikker størrelse ændrer ved oplandets størrelse og placering. Udførelsen af en følsomhedsanalyse er ikke begrænset til en vurdering af parameterfølsomhederne, men kan i princippet gennemføres for alle elementerne af en model. Eksempelvis bør der altid udføres en følsomhed af modelrandens betydning, hvilket kan gennemføres ved afprøvning af forskellige randbetingelser.

Følsomhedsanalysen bør udføres målrettet. Det betyder, at der i første omgang fokuseres på de faktorer, der forventes at have den største effekt på de ønskede modelresultater. Herefter udvælges "værdierne" for følsomhedsanalysen, så de repræsenterer "yderpunkter" mht. effekten på de ønskede modelresultater. Et eksempel herpå er ved udformning af en alternativ geologisk tolkning. Her kan der opstilles utallige alternativer, hvilket ikke er håndterbart i en følsomhedsanalyse udført som del af et standardmodeljob. Indledningsvist udvælges der derfor alternative formuleringer, som forventes at have den største effekt på modelresultaterne, eksempelvis en tolkning af et sammenhængende tykt dæklag under en industrigrund vs. et dæklag indeholdende sandvinduer. For parameterværdier vil det sjældent være muligt på forhånd at afgøre hvilke parameterværdier og/eller kombination af værdier, der vil have den største effekt. Oplagte værdier for følsomhedsanalysen vil derfor være min./maks. af deres respektive realistiske parameterværdi intervaller.

I Tabel 11 er der sammen med typiske usikkerhedskilder angivet nogle eksempler på, hvorledes en usikkerhedsanalyse kan gennemføres for vurdering af de enkelte usikkerhedskilders betydning.

### **Håndtering af usikkerhederne**

Hvis det er muligt at reducere usikkerhederne, er dette optimalt. For den del af usikkerhederne, der ikke kan reduceres, skal effekten på modelresultaterne søges estimeret, hvilket oftest gøres ved afvikling af modelsimuleringer for derigennem at belyse, hvor stor effekt de enkelte usikkerhedskilder har på modelresultaterne. På grund af forskelligheden af de usikkerhedskilder, der optræder inden for modellering, vil det ikke være muligt at kvantificere samtlige usikkerheder med én og samme metode. Der er derfor behov for en suite af forskellige metoder, hvorfra der kan vælges en egnet metode. Hvilken metode, der er egnet, afhænger af kendskabet til usikkerheden. I tilfælde, hvor det er muligt at karakterisere usikkerheden statistisk, er det muligt at anvende de statistiske/stokastiske metoder, hvor specielt Monte Carlo-metoden ofte har været anvendt i forbindelse med vurdering af parameterusikkerhederne. Ofte har man dog kun et meget begrænset kendskab til de usikkerheder, hvor en statistisk karakterisering ikke er mulig. Et eksempel herpå er usikkerheden på den geologiske tolkning. Som beskrevet i Afsnit 4.7.3 er det muligt at udforme forskellige alternative modeller og analysere de hydrologiske konsekvenser af forskellige geologiske tolkninger. Der eksisterer dog ikke en operationel metode til fastsættelse af sandsynligheder på de alternative tolkninger, og det er derfor kun muligt at give en kvalitativ vurdering af usikkerheden. For en gennemgang af hvilke metoder der kan anvendes ved vurdering af

forskellige usikkerhedskilder henvises til kapitel 19 i Sonnenborg og Henriksen (2005) og Refsgaard et al. (2007).

### Praktisk gennemførelse

Uden en systematisk tilgang, hvor usikkerhedsvurderingen er en integreret del af modelleringsprocessen, og hvor de enkelte usikkerhedskilder løbende samles op, vurderes og prioriteres inden usikkerhedsanalysen gennemføres, risikeres det, at analysen bliver gennemført på usikkerhedskilder uden nævneværdig effekt på forhold af betydning for modelleringen, mens de betydende kilder overses. Dette kan give en falsk tryghed, hvor det signaleres, at modelusikkerhederne er kendte, mens det i virkeligheden kun er en del af usikkerhederne, der er kvantificeret. Der er således behov for en metode som synliggør usikkerhedskilderne, giver overblik og kan lede til en prioritering samt forslag til håndtering. En velegnet metode hertil kan være anvendelsen af en usikkerhedsmatrix, hvor de identificerede usikkerhedskilder listes, karakteriseres og prioriteres. Et simpelt eksempel herpå er givet i Tabel 12, mens indholdet af de enkelte kolonner er beskrevet i Tabel 13. Et yderligere eksempel findes som template i Appendix F.

Tabel 12 Eksempel på usikkerhedsmatrix

Kilde		Usik.grad/ dækning	Vægt	Effekt	Redu- cerbar	Kvantifi- cerbar	Tiltag	Bemærkninger
D A T A	Potentiale	<i>lille</i>	<i>middel</i>	<i>middel</i>				
	Afstrømning	<i>middel</i>	<i>middel</i>	<i>middel</i>				
	Geologi	<i>stor</i>	<i>stor</i>	<i>stor</i>				
M O D E L	input data							
	Grundvandsdannelse	<i>middel</i>	<i>stor</i>	<i>stor</i>				
	Konceptuel model							
	Geologi	<i>stor</i>	<i>stor</i>	<i>stor</i>				
	Processer	<i>middel</i>	<i>stor</i>	<i>middel</i>				
M A N A G E M E N T S C E N A R I E R	Rand	<i>middel</i>	<i>lille</i>	<i>lille</i>				
	Kode	<i>lille</i>	<i>lille</i>	<i>lille</i>				
	Politiske forhold	<i>middel</i>	<i>lille</i>	<i>lille</i>				
M A N A G E M E N T S C E N A R I E R	Fremtidige forhold							
	Indvindingsbehov	<i>middel</i>	<i>stor</i>	<i>stor</i>				
	Klima	<i>stor</i>	<i>middel</i>	<i>middel</i>				
	Forureningsbelastning	<i>middel</i>	<i>middel</i>	<i>middel</i>				

### Anbefalinger

Det anbefales, at ambitionsniveauet for usikkerhedsvurderingerne fastlægges allerede i startfasen og fremgår af udbudsmaterialet. Der kan være eksterne bindinger, der dikterer hvilke usikkerhedsanalyser, der skal gennemføres, og som således kan indskrives i udbudsmaterialet. Som grundlæggende princip anbefales det dog ikke, at det i udbudsmaterialet specificeres hvilken type usikkerhedsanalyse, der skal gennemføres, idet dette først skal identificeres gennem projektførelsen. Den første betingelse for en succesfuld usikkerhedsvurdering er, at det er de betydende usikkerhedskilder, der medtages i vurderingen. For at sikre den nødvendige fokus på identificering af disse usikkerhedskilder, anbefales det, at usikkerhedsmatricen anvendes, og indgår som en fast del af de afholdte milepæls-møder, hvor rådgiver forud for mødet har revurderet matricen. Det aktuelle ressourcforbrug, der skal allokeres denne opgave, vil være bestemt af ambitionsniveauet for usikkerhedsanalysen.

Tabel 13 Beskrivelse af kolonnerne i usikkerhedsmatricen i Tabel 12.

Kilde	Her angives kilden til usikkerhed
Usik. grad/ Dækning	Usik.grad er graden af usikkerhed knyttet til usikkerhedskilden, dvs. er der stor eller lille usikkerhed omkring variabelen. Dækning er primært relevant at vurdere i forhold til tilgængeligheden af data, hvor kvalitet og datamængder er betydende for, hvor godt modelresultat, der kan forventes
Vægt	Angiver hvor betydende faktoren er for modelresultatet. Her skal der både tages hensyn til, hvor stor effekt usikkerhedskilden har på modelresultatet (fx ved udførelse af en følsomhedsanalyse), samt hvor kritisk denne usikkerhed er i forhold den efterfølgende beslutningsproces.
Effekt	Er usikkerhedsgrad multipliceret med vægt, altså en risikovurdering
Reducerbar	Henfører til, om det er muligt at reducere usikkerheden, fx gennem litteraturstudier eller supplerende undersøgelser.
Kvantificerbar	Refererer til, om det er muligt at anvende en metode til at kvantificere usikkerheden, herunder om der er tilstrækkelig information omkring variabelen (fx observationer) til, at metoden kan anvendes.
Tiltag	Her vurderes, om der skal foretages yderligere tiltag i forbindelse med usikkerhedskilden og i givet fald hvilke. Dette indebærer eksempelvis forslag om ekstra undersøgelser, metode til kvantificering af usikkerhed, eller om det kun er muligt at give en kvalitativ beskrivelse af usikkerheden.
Bemærkning	Her kan angives korte bemærkninger/kommentarer, der giver en præcisering af usikkerhedskilden. Specielt nyttig hvis usikkerhedsmatricen anvendes som en dialogplatform. Her kan evt. også refereres til en rapport, hvor usikkerheden er beskrevet mere detaljeret.

#### 4.7.8 Modelvalidering

##### Definitioner og formål

Som beskrevet i Appendix C benyttes følgende begreber i nærværende Geo-vejledning:

- *Verifikation* benyttes om en modelkode, dvs. dokumentation for, at en modelkode løser de givne ligninger med en specificeret nøjagtighed.
- *Validering* benyttes i relation til en sted-specifik model, dvs. dokumentation for, at en sted-specifik model kan beskrive virkeligheden med en tilfredsstillende nøjagtighed.

Grundvandsmodeller indeholder et meget stort antal parametre, hvorfor det næsten altid vil være muligt at finde en kombination af parameterværdier, som giver en god overensstemmelse mellem modeloutput og feltdata i en kort kalibreringsperiode. Det giver imidlertid ingen garanti for, at modelstrukturen eller de skønnede parameterværdier er passende og vil resultere i pålidelige forudsigelser for andre perioder. En model bør derfor aldrig anvendes uden en forudgående modelvalidering, fordi modellens pålidelighed i så fald ikke kendes. Formålet med modelvalidering er at undersøge og dokumentere, hvilken nøjagtighed en given model kan forventes at have, når den efterfølgende skal anvendes.

##### Principper og typer af valideringstest

For at vurdere, hvorvidt en kalibreret model kan betragtes som gyldig til efterfølgende brug, skal den valideres ved test mod andre data end dem, der blev brugt til kalibrering. Tilsvarende er det afgørende, at en valideringstest indeholder situationer sammenlignelige med dem, modellen bliver udsat for i den efterfølgende modelanvendelse.

Eftersom modelopgaver er forskellige med hensyn til bl.a. datatilgængelighed og formål for modelanvendelse, vil valideringstestene være forskellige. Et godt udgangspunkt for udarbejdelse af konkrete tests for modelvalidering er at benytte principper foreslået af Klemes (1986). Han opstiller nedenstående testtyper svarende til forskellige situationer med hensyn til, hvorvidt der findes data til at foretage en kalibrering, og hvorvidt situationen i modelområdet er stationær. Stationaritet hentyder i denne sammenhæng eksempelvis til, hvorvidt der er tale om menneskeskabte ændringer (oppumpning, ændret arealanvendelse, klimaændring, mv.) eller ikke.

- *Split-sample test* er den klassiske test for dynamiske modeller, hvor den tilgængelige datamængde deles i to tidsperioder, hvorefter der kalibreres på den ene og efterfølgende valideres på den anden. Den kan bruges i situationer, hvor der er tilstrækkelige data til en meningsfuld kalibrering, og hvor situationen i oplandet er stationær.
- *Proxy-basin test*. Denne test skal anvendes i stationære situationer, hvis der ikke findes data til kalibrering i det pågældende område. Princippet i denne test er, at der bør foretages test i to lignende områder (fx naboområder), hvor ukalibrerede (blindsimulerede) modelresultater sammenlignes med feltdata. Model performance for de to blindtest kan så betragtes som indikatorer på den nøjagtighed, modellen kan forventes at have i det umålte opland. Det er vigtigt, at proceduren for parameterestimation i de to oplande laves objektiv og gennemskuelig, og at en lignende procedure anvendes i det umålte opland. I den ultimative situation findes der slet ingen kalibreringsdata af fx trykniveauer eller vandføringer i det umålte opland ('basin'). Men princippet kan også benyttes til situationer, hvor der fx ønskes simuleringer af trykniveauer eller vandføringer i et opland med data, men for andre punkter end hvor der findes historiske observationer.

Eksempel PB\_1 (umålt opland): En hydrologisk model ønskes anvendt til at simulere vandføring for oplande, hvor der ikke er vandføringsdata. Her kan der så opstilles en hydrologisk model for et større område, indeholdende såvel flere vandløbsoplande med vandføringsdata som det umålte opland. Modellen kalibreres ved anvendelse af de fleste vandføringsdata på en sådan måde, at der benyttes standardiserede procedurer med fx ens parameterværdier i samme geologiske enheder i hele modelområdet, men data fra to af de målte oplande benyttes ikke i kalibreringen. Herefter sammenlignes modelsimuleringer fra de to oplande med feltdata. Performance for de to oplande kan så benyttes som indikatorer på den nøjagtighed, der kan forventes i det umålte opland. Såfremt testene for de to oplande er inden for de opstillede nøjagtighedsmål, kan modellen siges at være valideret for umålte områder med den givne nøjagtighed.

Eksempel PB\_2 (intern validering): En hydrologisk model ønskes anvendt til at simulere andre punkter inden for et opland, end de punkter, hvor den er blevet kalibreret. Refsgaard (1997) præsenterede et sådant eksempel for Karup Å. En hydrologisk model blev kalibreret mod vandføringsdata fra stationen, dækkende hele oplandet og trykniveaudata fra syv observationsboringer. Herefter blev der foretaget en split-sample test for en anden periode. Endelig blev der simuleret vandføring fra tre deloplande og trykniveauer fra fire andre observationsboringer. Denne interne valideringstest er principielt en proxy-basin test. Resultaterne for de nye punkter, som ikke blev benyttet i kalibreringen, kan betragtes som indikatorer på modellens forventede nøjagtighed ved simulering af vandføringer og trykniveauer på helt nye lokaliteter inden for oplandet.

Eksempel PB\_3 (simulering af andre variable): En hydrologisk model ønskes anvendt til at simulere koncentrationer i grundvandsmagasiner, og der findes vandføringsdata og trykniveaudata, men ikke koncentrationsdata, til at kalibrere modellen imod. Trolborg et al. (1997) præsenterede et sådant eksempel for Eggeslevmagleområdet på Vestsjælland. Fire forskellige hydrologiske modeller, baseret på fire forskellige geologi-

ske tolkninger, blev kalibreret mod vandføringsmålinger og trykniveauer. Herefter blev koncentrationer simuleret ved hjælp af en particle tracking model og sammenlignet med målte koncentrationer for et stort antal miljøtracere (CFC, tritium, helium). Modellens performance mod koncentrationsdata er principielt en proxy-basin test, som kan give viden om, hvor god modellen kan forventes at være til simulering af koncentrationer i det pågældende område.

Eksempel PB\_4 (stationær grundvandsmodel): En stationær grundvandsmodel ønskes anvendt til at simulere trykniveauer og herudfra bestemme et indvindingsopland. De eksisterende trykniveauobservationer opdeles i to halvdele, hvoraf den ene del anvendes til kalibrering sammen med vandføringsdataene. Herefter foretages modelvalidering mod den anden halvdel af trykniveaudataene. Endvidere foretages test af modellens evne til at simulere strømningsretningen. Modellens performance af trykniveauer i valideringstesten er en indikator på modellens evne til at simulere trykniveaubilledet generelt i området, og dens evne til at simulere strømningsretningen giver viden om, hvor godt modellen kan forventes at beskrive indvindingsoplande.

- *Differential split-sample test*. Denne test skal anvendes i ikke-stationære situationer, hvor der findes lokale data i et opland til kalibrering, men hvor modellen skal bruges til at forudsige konsekvenser af menneskelige indgreb som fx oppumpninger, ændringer i arealanvendelse eller klimaændringer. Tilsvarende til proxy-basin tests skal der her foretages test på sammenlignelige situationer i to tilsvarende områder.

Eksempel DSS\_1: En hydrologisk model ønskes anvendt til at simulere effekten på vandføringer som et resultat af ændret grundvandsoppumpning på sjællandske kildepladser. Der identificeres tre vandløb, som i dag er påvirket af betydelig vandindvinding, og hvor der eksisterer gode vandføringsdata fra perioder før grundvandsindvindingerne startede. I dette tilfælde kalibreres modellen for den nuværende situation, og der foretages en almindelig split-sample valideringstest mod en anden periode med det nuværende niveau af vandindvinding. Herefter foretages en test af modellens evne til at simulere vandføringen for tre vandløb for perioder før vandindvindingerne startede. Resultaterne af denne differential split-sample test kan betragtes som indikatorer på modellens forventede nøjagtighed ved simulering af vandløbspåvirkninger ved ændring af oppumpning i andre områder af Sjælland.

De to sidste tests (proxy-basin og differential split-sample) er svagere end en split-sample test, fordi der ikke kan benyttes testdata fra det opland, hvor modellen skal anvendes til sit egentlige formål. Ved at teste modellen i fx to andre oplande opnås to indikationer på modellens nøjagtighed. Testene fra to oplande kan resultere i to meget forskellige indikatorer på nøjagtigheden. Såfremt flere end to ekstra oplande benyttes, kan de forskellige test resultater benyttes til at vurdere et sandsynligt interval, inden for hvilket modellens nøjagtighed kan forventes at være.

### Anbefalinger

Det anbefales, at der i modelleringsopgaven eksplicit lægges vægt på gennemførelse af valideringstest baseret på ovenstående principper. Det kan ske ved følgende handlinger:

- *Vandressourceforvalteren*, evt. med input fra *interessenter*, beskriver i udbudsbetingelserne et krav om, at modelløren skal opstille passende valideringstest målrettet mod den ønskede modelanvendelse, som også skal være specificeret i udbudsmaterialet (Tabel 1, opgaverne 1.4 og 1.5)
- *Modelløren* beskriver konkret, hvordan valideringstestene planlægges gennemført. Det sker i første omgang i tilbuddet (Tabel 1, opgave 1.6) og senere mere detaljeret (Tabel 3, opgave 3.3).
- *Vandressourceforvalteren* - med støtte fra *revieweren* - vurderer og godkender de foreslåede valideringstest (Tabel 3, opgave 3.5).

- *Modelløren* gennemfører valideringstestene og beskriver modellens dokumenterede anvendelsesområde (Tabel 4, opgaverne 4.8 og 4.11).
- Resultaterne af valideringstestene vurderes og godkendes efterfølgende af *vandresourcforvalteren* med støtte fra *revieweren* (Tabel 4, opgave 4.13).

Som det ses, illustrerer ovenstående på udmærket vis nødvendigheden af, at alle aktører i modelleringsprocessen udfylder deres respektive roller.

#### 4.7.9 Modellens dokumenterede anvendelsesområde

##### Betinget gyldighed

Som et grundlæggende princip har ingen model universel gyldighed i et opland. Enhver udtalelse om en models gyldighed skal derfor være betinget af følgende konkrete forhold:

- Geografiske lokaliteter inden for et opland. En model vil som regel give bedre resultater i ét delområde end i et andet delområde.
- Typer af anvendelse. En model kan være dokumenteret velegnet til en type anvendelse, men ikke til en anden type anvendelse.
- Nøjagtighed i modelsimulering. En model kan eksempelvis give tilfredsstillende resultater med et mindre ambitiøst nøjagtighedskrav, men ikke hvis kravet bliver strammet.

##### Test og beskrivelse af model gyldighed

Valideringstest (se Afsnit 4.7.6) har til formål at dokumentere, i hvilket omfang en model er velegnet til at løse en bestemt opgave. I nogle situationer vil der ikke være tilstrækkeligt med data til at gennemføre en ønsket valideringstest, hvorfor der må benyttes mere kvalitative og mere subjektive vurderinger af en models gyldighed.

En models anvendelsesområder skal beskrives, før den anvendes, eller før den videregives til tredjeparter. Afhængig af omfanget og resultatet af valideringstestene, kan en models anvendelsesområde eksempelvis beskrives som tilhørende en af følgende klasser:

- *Dokumenteret velegnet*: De typer af modelanvendelser og geografiske lokaliteter, hvor modellen via valideringstest har dokumenteret at kunne lave forudsigelser med en angivet nøjagtighed.
- *Måske egnet*: De typer af modelanvendelser og geografiske lokaliteter, hvor modellen kan forventes at lave forudsigelser med en rimelig nøjagtighed, men hvor det ikke har været muligt at gennemføre valideringstest på grund af manglende data.
- *Ikke egnet*: De typer af modelanvendelser og geografiske lokaliteter, hvor modellen ikke kan forventes at kunne give resultater med brugbar nøjagtighed. Den vurdering kan enten komme som resultatet af en valideringstest med et dårligt resultat, eller for situationer, hvor der ikke findes data til relevante valideringstest, men hvor det vurderes, at modellen ikke er velegnet.

##### Eksempel

En dynamisk grundvandsmodel er med en split-sample test (kalibrering i en periode, valideret i en anden periode) valideret mod trykniveaudata fra 20 borer med en nøjagtighed svarende til en RMS værdi på 2,0 m. Her vil vi fx kunne beskrive modellens anvendelsesområder som følger:

- *Dokumenteret velegnet* til simulering af trykniveauer i andre perioder under uændret klima for de samme 20 borerer med en nøjagtighed svarende til en RMS værdi på 2,0 m.
- *Måske egnet* til simulering af trykniveauer i andre perioder under uændret klima for andre lokaliteter end de 20 borerer, men der må påregnes en lidt mindre nøjagtighed.
- *Måske egnet* til simulering af trykniveauer i ændret klima, men der må påregnes en del mindre nøjagtighed.
- *Ikke egnet* til simulering af vandføringer, koncentrationer og grundvandets alder.

### **Anbefalinger**

En models gyldighed skal altid beskrives. Det inkluderer både modellens dokumenterede anvendelser og dens begrænsninger. Beskrivelsen af anvendelsesområde kan eksempelvis ske ved brug af de tre ovenstående klasser (dokumenteret velegnet, måske egnet, ikke egnet). Beskrivelsen skal være specifik med hensyn til geografiske områder, typer af modelanvendelser og tilhørende model nøjagtighed.

Det anbefales at sammenfatte beskrivelsen af en models anvendelighed ved brug af det tilhørende datablad i Appendix F.

## **4.7.10 Dokumentation af model**

### **Behov for dokumentation**

Både for vandressourceforvalteren, modelløren og eksterne interessenter, herunder kommuner, er en fyldestgørende dokumentation et afgørende element for at opnå et tilfredsstillende modelleringsforløb. På den ene side har vandressourceforvalteren store forventninger til, at dokumentationen gør væsentlige valg og antagelser i modelleringsforløbet gennemskuelige, samt at modelresultaterne bliver præsenteret og grundigt forklaret. På den anden side er dokumentationen modellørens mulighed for at dokumentere og forklare det ofte meget omfattende og teknisk krævende arbejde, der er gennemført, for i sidste ende at nå hen til et modelleringsresultat, der kan anvendes i vandressourceforvaltningen. Endelig er modeldokumentationen af afgørende betydning for interessenter, som enten skal anvende modellen videre, eller bliver påvirket af beslutninger truffet på baggrund af resultaterne fra modelleringen. At gennemføre en fyldestgørende dokumentation er en løbende proces og et tidskrævende element i modelleringen, og det er vigtigt, at omfanget af dokumentation nøje tilpasses til den aktuelle modelleringsopgave for at fastlægge et passende niveau for dokumentationen. Alle aktører har derfor en fælles interesse i, at man tidligt i forløbet indgår klare skriftlige aftaler vedr. omfang og tidsrammer for dokumentationen.

### **Typer af dokumentation**

Dokumentation af modelleringsprocessen skal indeholde følgende elementer:

- Modelrapport
- Dokumentation af geologiske modeller
- Dokumentation af oplande
- Anden dokumentation relevant for miljøcentre
- Indberetning til Model- og Rapportdatabasen

- Referencer til Den nationale Vandressourcemodel

### **Modelrapport**

Modelrapporten skal indeholde en beskrivelse af resultaterne af modelleringsforløbet i de sidste fire modeltrin (Tabellerne 2-5). Et forslag til strukturering og indhold af modelrapporten er givet i Tabel 14. I tabellen er endvidere anført, hvilke dele af rapporten, der naturligt udarbejdes, skal gennem review og godkendes i forbindelse med dialogmøderne, som markerer afslutningen på hvert af de fire trin. I Tabel 14 lægges der op til, at man udarbejder én sammenhængende rapport for hele modelleringsarbejdet, men rapporten kan ofte med fordel inddeles i flere delrapporter og en sammenfattende rapport. Man skal ved udarbejdelsen af delrapporterne være opmærksom på, at de skal kunne forstås og "stå alene" og samtidig sættes i relation til de øvrige rapporter i modelleringsforløbet.

I Appendix E er der givet en oversigt over relevante korttemaer, figurer og tabeller, der bør overvejes udarbejdet i forbindelse med de forskellige afsnit i modelrapporten.

### **Dokumentation af geologiske modeller**

For udarbejdelse af dokumentation for geologiske modeller henvises til Geo-vejledning 3 (Jørgensen et al., 2008).

### **Dokumentation af oplande**

For beregning, optegning og dokumentation af indvindings- og grundvandsdannende oplande i forbindelse med grundvandskortlægningen henvises til Geo-vejledning 2 (Iversen et al., 2008).

### **Anden relevant dokumentation for miljøcentrene**

Miljøcentrenes slutprodukt for en grundvandskortlægning indeholder bl.a. en rapport til kommunerne, der overtager arbejdet vedrørende indsatsplanlægningen. I Administrationsgrundlaget for grundvandskortlægningen (BLST, 2009) kapitel 3 gives der en række retningslinier til afrapporteringen, hvad denne bør omfatte, samt hvilke korttemaer der *skal* indgå, og hvilke der *kan* indgå. I forbindelse med afrapportering af grundvandsmodeller under miljøcentrenes grundvandskortlægning, bør modelløren orientere sig i forhold til den række forslag/krav til afrapporteringen og udarbejdelse af korttemaer, der foreligger.

Modelrapporter og korttemaer, der udarbejdes i forbindelse med afrapportering af den hydrologiske model, skal kunne levere de informationer og viden, der gør det muligt at udarbejde den endelige slutrapport ved afslutningen af grundvandskortlægningens forløb. Det er derfor vigtigt, at både vandressourceforvalter og modellør tidligt i modelforløbet gør sig klart, hvilke formelle krav, der er til slutafrapporteringen, og finder ud af, hvordan disse krav i modelleringsarbejdet og rapporteringen heraf opfyldes.

Tabel 14 Forslag til disposition for Modelrapport.

Afsnit i rapport	Indhold	Godkendes	Emner fra vejledningen som skal rapporteres her
Rapporttitel	Titel der kommunikerer projektmål og resultater med modellen. Endvidere skal titelbladet indeholde tidspunkt for publicering, navn på rekvirent, navn på rådgivningsfirma/institution, der udfører modelleringen inkl. navne på de personer, der konkret har udført modelleringen.		
Indholdsfortegnelse	Indholdsfortegnelsen skal indeholde en liste over bilag eller appendices. Derudover bør der udarbejdes en selvstændig figurliste, tabelliste og en liste med benyttede forkortelser i rapporten.		
Kapitel 1. Resume	En opsummering af konceptuel model, modelopstilling, resultater af kalibrering og validering samt en beskrivelse af de opstillede scenarier for modelanvendelse og deres hovedresultater. En vurdering af modelberegningernes usikkerhed/pålidelighed og begrænsninger. <i>Omfang: 2-10 sider.</i>	TRIN 5	
Kapitel 2. Introduktion	Beskrivelse af problemstilling, projektformål, modelformål, og krav til modelnøjagtighed i specifikke og kvantificerbare størrelser. Vurderinger af de væsentligste usikkerhedskilder og deres potentielle betydning. Introduktion til modelområdet, tidligere undersøgelser i området, og beskrivelse af vandressourceaspekter der rettes særlig fokus på i området. <i>Omfang: 3-6 sider.</i>	TRIN 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elementer af opgaverne 1.1–1.4 (Tabel 1)</li> <li>• Usikkerhedsmatrix, Afsnit 4.7.7</li> </ul>
Kapitel 3 Geologisk model	Her beskrives den geologiske model. Det vil typisk ske i form af en særskilt rapport efter retningslinierne i Jørgensen et al. (2008). I så fald gives kun et kort resume her. <i>Omfang: resume på 2-5 sider (plus særskilt geologisk rapport)</i>	TRIN 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geovejledning 3 (Jørgensen et al., 2008)</li> </ul>
Kapitel 4 Øvrige data	De øvrige (ud over geologi) tilgængelige data beskrives og vurderes i forhold til den konkrete modelopgave. En del af databeskrivelsen kan med fordel placeres i appendices eller, i tilfælde af indsamling af nye data, udgøre selvstændige datarapporter. <i>Omfang: 10-20 sider plus eventuelle appendices/datarapporter</i>	TRIN 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tabel 2, opgaverne 2.1-2.3</li> </ul>
Kapitel 5 Konceptuel model	Her beskrives de(n) opstillede konceptuelle model(ler). Begrundelse for simplifikationer mht. geologisk model, strømningsligninger, mv. Planer for parametriseringer, randbetingelser. Behovet for alternative konceptuelle modeller vurderes. <i>Omfang: ca. 3-6 sider.</i>	TRIN 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tabel 2, opgaverne 2.4-2.9</li> <li>• Afsnit 4.7.2</li> <li>• Afsnit 4.7.3</li> </ul>
Kapitel 6. Numeriske modelværktøjer og metodik	Her gives en beskrivelse af den modelleringsmetodik, der er benyttet. Hvilken modeltype er anvendt? Hvilken modelkode er anvendt? Hvad er den overordnede metodik ved parametrisering, kalibrering, validering, modelanvendelser, og usikkerhedsanalyser? Hvordan påtænkes den numeriske modelkode tilpasset den konceptuelle model? Indledende planer herom vil typisk være indeholdt i modelørens tekniske tilbud, men bør formuleres mere konkret ved udgangen af Trin 2. <i>Omfang: ca. 3-6 sider.</i>	TRIN 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tabel 2, opgave 2.10</li> <li>• Afsnit 4.7.1</li> <li>• Afsnit 4.7.4</li> <li>• Afsnit 4.7.6</li> <li>• Afsnit 4.7.7</li> <li>• Afsnit 4.7.8</li> </ul>

Kapitel 7. Modelopstilling	Beskrivelse af modelområde, diskretisering, hydrauliske parametre, input og output til vandbalancen, randbetingelser og den udførte databearbejdning. <i>Omfang: 10-20 sider.</i>	TRIN 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tabel 3, opgaverne 3.1-3.2</li> </ul>
Kapitel 8. Kalibrerings- og valideringsstrategi	Hvilke nøjagtighedskriterier anvendes? Hvilke numeriske mål for nøjagtighed fastsættes? Hvilke data benyttes til kalibrering? Beskrivelse af kalibreringsmetodik. Hvilke typer valideringstest planlægges udført og med hvilke data? <i>Omfang: 3-6 sider.</i>	TRIN 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tabel 3, opgave 3.3</li> <li>• Afsnit 4.7.5</li> </ul>
Kapitel 9 Kalibrering	Beskrivelse af resultater af kalibreringsprocessen, herunder objektivfunktion, følsomhedsanalyse, udvalgte kalibreringsparametre, kalibreringsresultat med hensyn til simulerede versus observerede variable, opnåede parameterværdier med tilhørende konfidensgrænser og en vurdering af, hvor god kalibreringsresultatet er. <i>Omfang: 10-15 sider.</i>	TRIN 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tabel 4, opgaverne 4.1-4.7</li> </ul>
Kapitel 10 Validering og usikkerhedsanalyse	Beskrivelse af resultater fra modelvalideringen og den efterfølgende usikkerhedsanalyse af kalibrerings- og valideringsresultaterne, herunder vurdering af usikkerheder på planlagte modelanvendelser. <i>Omfang: 5-10 sider.</i>	TRIN 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tabel 4, opgaverne 4.8-4.10</li> <li>• Afsnit 4.7.7</li> <li>• Afsnit 4.7.8</li> </ul>
Kapitel 11 Modellens dokumenterede anvendelsesområde	Beskrivelse af hvilke anvendelser (geografiske områder, typer af beregninger, nøjagtighedsniveau) modellen er dokumenteret gyldig til via valideringstest. Endvidere beskrivelser af hvilke anvendelser modellen måske er egnet til og endelig beskrivelse af anvendelser modellen ikke kan anses for egnet til. <i>Omfang 1-2 sider.</i>	TRIN 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tabel 4, opgave 4.11</li> <li>• Afsnit 4.7.9</li> </ul>
Kapitel 12 Scenarieopstillinger	Opstilling af scenarier og beskrivelse af, hvordan modellen kan simulere scenarierne. Vurdering af de indgåede scenarier Resultater af de valgte simuleringsscenarier beskrives i forhold til valgt basis-case. Vurdering af usikkerheder på simuleringresultater. <i>Omfang: 3-6 sider.</i>	TRIN 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tabel 5, opgave 5.1</li> </ul>
Kapitel 13 Simuleringsresultater	Resultater og vurderinger, inkl. usikkerhedsanalyser, af modelberegningerne for de opstillede scenarier. <i>Omfang: 10-20 sider.</i>	TRIN 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tabel 5, opgaverne 5.2-5.7</li> <li>• Afsnit 4.7.7</li> </ul>
Kapitel 14 Konklusioner og anbefalinger	Resultaterne af modelarbejdet sammenfattes. Anbefalinger vedr. scenarier og andre resultater af modelarbejdet. <i>Omfang: 1-2 sider.</i>	TRIN 5	
Kapitel 15 Referencer	Der udarbejdes en referenceliste med relevant litteratur. <i>Omfang: 1-3 sider.</i>	TRIN 5	
Appendices og bilag	Så meget som muligt af den detaljerede information præsenteres i appendices eller bilagsform, således at læsbarheden af rapporten er så god som muligt. De krævede specifikke leverancer kan indgå her eller i særskilte rapporter. <i>Omfang: Efter behov – kan variere meget fra opgave til opgave.</i>	Løbende	

## Indberetning til Model- og Rapportdatabasen

Alle de hydrologiske modeller og rapporter, der udarbejdes i forbindelse med den nationale grundvandskortlægning skal indberettes af rådgiver til de to nationale databaser, som er udviklet i et samarbejde mellem GEUS og de statslige miljøcentre.

- *Modeldatabasen.* Her lagres både data og dokumentation om numeriske grundvandsmodeller. For nuværende lagres de numeriske grundvandsmodeller optimalt i zip-filer. I zip-filen bør der inkluderes en tekstfil med en grundig beskrivelse af modeldata og modellens opbygning samt hvilken softwareplatform og version, som modellen er opstillet i. Man skal være opmærksom på, at zip-filer trunckeres ved 4 GB, og at det derfor kan være nødvendigt at lagre modellen i et andet zippet format, der tillader større filer ("rar" formatet kan være en mulighed). Dokumentationen skal omfatte en udfyldelse af databladet i Jørgensen et al. (2009). Link til modeldatabasen og den seneste vejledning i anvendelse af Modeldatabasen samt databladet findes på <http://www.geus.dk/modelddb/>.
- *Rapportdatabasen.* Her lagres modelrapporter. Titlen/titlerne på modelrapporterne skal angives således, at det er muligt at fremsøge dem i Rapportdatabasen. Rapportdatabasen findes på <http://geuskort.geus.dk/GeusMap> og seneste vejledning for indberetning findes på <http://jupiter.geus.dk/datavask/RapportDatabase.doc>.

Bilag, der beskriver og dokumenterer datagrundlag og indberetninger til databaser, skal medtages i slutrapporteringen.

## Referencer til Den nationale Vandressourcemodel

Beregningslagene i de hydrologiske modeller skal referere til beregningslagene i Den nationale Vandressourcemodel. Det er en del af den dokumentation, der skal fremgå af databladet i Jørgensen et al. (2009).

## 4.8 Nødvendige rammebetingelser

Som det fremgår af de foregående afsnit i Kapitel 4, er hydrologisk modellering ikke en disciplin, hvor man kan udlicitere en opgave til en modellør, som så på entydig måde løser modelleringsopgaven, hvorefter alle forstår resultaterne. Modellering er en læringsproces, hvor aktørerne gradvist bliver mere vidende om det modellerede opland, og hvor der skal træffes mange valg. Samtidig bliver matematisk modellering af mange fagfolk uden modelleringserfaring opfattet som abstrakt og vanskeligt forståeligt. Derfor kræver en god modelleringsproces en konstant dialog mellem de forskellige aktører.

Det er af afgørende betydning for resultatet, at alle de involverede aktører udfylder deres respektive roller. Det er derfor nødvendigt, at alle aktører dels har den fornødne tid til at indgå i processen og dels har en vis overordnet viden om modellering. Det er helt naturligt, at modelløren skal have omfattende ekspertise i modellering, og der findes stærke modelleringsgrupper i mange danske rådgivende firmaer. En vandressourceforvalter behøver ikke have tilsvarende modellerings ekspertise, men det er vigtigt med en vis forståelse for de tekniske aspekter af modelleringen og tilstrækkelig modelerfaring til eksempelvis at kunne vurdere, hvad der realistisk set kan forventes opnået med modellering, og hvor faldgruberne ligger. En tilsvarende overordnet ekspertise vil være nødvendig for nogle interessenter.

Hvis eksempelvis de kommuner, der skal overtage modeller og modelresultater fra grundvandskortlægningen, ikke kan afkode nuancerne i en models anvendelsesmuligheder og ikke er i stand til at stille de rigtige tekniske spørgsmål i forbindelse med en efterfølgende opdatering, vil nyttevirkningen af modelleringen nemt blive reduceret betydeligt.

Derfor er det vigtigt, at alle aktører, der på en eller anden måde er afhængig af hydrologisk modellering, opbygger tilstrækkelig faglig kapacitet til på fornuftig vis at håndtere deres respektive rolle. I den sammenhæng er der behov for en løbende efteruddannelse af medarbejdere i bl.a. miljøcentre og kommuner.

## 5. Sammenfatning og konklusion

Denne Geo-vejledning i hydrologisk modellering til grundvandskortlægning er baseret på principper for god modelleringspraksis, som har udmøntet sig i Danmark gennem de sidste par årtier (Henriksen et al., 2001; Sonnenborg og Henriksen 2005; Refsgaard, 2007) og som er solidt forankret i international forskning.

Vejledningen er resumeret i Tabellerne 1-5. 10 særligt væsentlige emner er behandlet i afsnittene 4.7.1 – 4.7.10. Herudover er der henvist til tekniske beskrivelser fra EU projektet HarmoniQuA's vejledning MoST (Appendices A-C) samt til anden litteratur, først og fremmest Håndbog i Grundvandsmodellering (Sonnenborg og Henriksen, 2005).

De væsentligste elementer i vejledningen er:

- Modelleringen er en proces, hvor forskellige aktører (vandressourceforvalter, modellør, reviewer, interessenter) har hver deres rolle at spille. En *aktiv dialog* mellem de forskellige aktører er essentiel. Processen er beskrevet summarisk i Tabellerne 1-5.
- Eksterne *reviews* er et vigtigt element i en kvalitetssikring af modelleringsarbejdet. Anbefalinger til forskellige typer af reviews fremgår af Tabel 7 og afsnit 4.7.4.
- Forskellige *formål for modelopgaver* kræver ofte forskellige typer af modeller. En vejledning om valg af modeltype til forskellige delformål i forbindelse med grundvandskortlægningen er givet i Tabel 6 og afsnit 4.7.1.
- *Konceptuelle modeller* er ofte den væsentligste usikkerhedskilde i hydrologisk modellering. Derfor er der behov for at vurdere behovet for at opstille alternative konceptuelle modeller. Vejledning herom er givet i afsnit 4.7.2 og afsnit 4.7.3.
- *Kravene til en models nøjagtighed* skal afspejle målsætningen med modelanvendelse og tage hensyn til datatilgængeligheden og de allokerede ressourcer. En models nøjagtighed kan karakteriseres ved hjælp af *nøjagtighedskriterier*. Vejledning om valg af forskellige relevante kriterier til forskellige formål er givet i afsnit 4.7.5, hvor der endvidere beskrives, hvilke *mål for nøjagtighed* der kan forventes opfyldt i forskellige typer opgaver.
- *Usikkerhedsvurderinger* er essentielle gennem hele modelleringsprocessen, herunder i dialogen mellem de forskellige aktører. Vejledninger til usikkerhedsanalyser er givet i afsnit 4.7.7.
- *Modelvalidering* mod uafhængige data bør foretages før modelanvendelse. Vejledning om principper for opstilling af valideringstest er givet i afsnit 4.7.8. På baggrund heraf skal *dokumenterede anvendelsesområder og begrænsninger* beskrives (afsnit 4.7.9).
- En model skal *dokumenteres* bl.a. ved rapportering og ved indrapporteringer til nationale databaser. Vejledning herom er givet i afsnit 4.7.10.
- *Tekniske vejledninger* er nyttige som opslagsværk, inspiration og fælles referencegrundlag for de forskellige aktører i modelleringsprocessen. Tekniske vejledninger er medtaget som Appendices A-C og via henvisninger til ekstern litteratur i Tabellerne 1-5.
- Det er væsentligt at *sikre samspil mellem geologisk modellering og hydrologisk modellering*. Det indebærer eksempelvis: (a) at nødvendigheden af at beskæftige sig med effekten af geologisk usikkerhed i den hydrologiske modellering allerede overvejes i forbindelse med den geologiske modellering, så der eksempelvis kan etableres flere alternative geologiske tolkninger; (b) at den hydrostratigrafiske model testes i den hydro-

logiske modellering; og (c) at der er muligt at gå tilbage til den geologiske modellering, hvis den hydrostratigrafiske model viser sig ikke at være i stand til at forklare feltdata via en hydrologisk model. En opsplitning af modelleringsarbejdet i geologisk modellering og hydrologisk modellering som to særskilte opgaver kan derfor være uhensigtsmæssig og bør generelt undgås.

## 6. Referencer

- ASTM (1992) Standard practice for evaluating mathematical models for the environmental fate of chemicals. American Society for Testing and Materials, Standard E978-92. <http://www.astm.org>.
- ASTM (1994) Standard guide for application of a ground-water flow model to a site-specific problem. American Society for Testing and Materials, Standard D5447-93. <http://www.astm.org>.
- ASTM (1996) Standard guide for Conceptualization and characterization of Ground-Water Systems. American Society for Testing and Materials, Standard D5979-96. <http://www.astm.org>.
- BLST (2009) Administrationsgrundlaget for Miljøministeriets afgiftsfinansierede grundvandskortlægning. By- og Landskabsstyrelsen. <http://www.blst.dk/Grunddrikkevand/Grundvandskortlaegning/>
- Doherty J (2005) PEST: Model independent parameter estimation. User manual 5<sup>th</sup> edition. Watermark numerical computing, Brisbane, Australia. <http://www.pesthomepage.org/Home.php>
- Doherty J (2010) Addendum to the PEST manual, Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia. <http://www.pesthomepage.org/Home.php>
- Duan Q, Sorooshian S, Gupta V (1992) Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 28(4), 1015-1031.
- Hansen N, Ostermeier A (2001) Completely derandomised self-adaptation in evolution strategies. *Evolutionary Computation*, 9(2), 159-195.
- Hansen N, Müller SD, Koumoutsakos P (2003) Reducing the time complexity of the derandomized evolution strategy with covariance matrix adaptation (CMA-ES). *Evolutionary Computation*, 11(1), 1-18.
- Harrar WG, Sonnenborg TO, Henriksen HJ (2003) Capture zone, travel time, and solute transport model predictions using inverse modeling and different geological models. *Hydrogeology Journal* 11(5), 536-547.
- Henriksen HJ, Sonnenborg T, Christiansen HB, Refsgaard JC, Harrar B, Rasmussen P, Brun A (2001) Retningslinier for opstilling af grundvandsmodeller. Miljøstyrelsen. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen. Nr. 17, 2001.
- Henriksen HJ, Refsgaard JC, Højberg AL, Ferrand N, Gijsbers P, Scholten H (2009) Harmonised principles for public participation in quality assurance of integrated water resources modelling. *Water Resources Management*, 23, 2539-2554.
- Højberg AL, Refsgaard JC (2005) Model Uncertainty - Parameter uncertainty versus conceptual models. *Water Science and Technology*, 52(6), 177-186.
- Højberg AL, Refsgaard JC (2009) Quality Assurance in Water Resources Modelling. NOVANAQuA. GEUS rapport 2009/16, 75 sider.
- Iversen CH, Lauritsen LU, Nyholm T, Kürstein J (2008) Udpegning af indvindings- og grundvandsdannende oplande (Del 1). Vejledning i oplandsberegninger i forbindelse med den nationale grundvandskortlægning. Geo-vejledning 2, GEUS.
- Iversen CH, Wernberg T, Nyholm T (2009) Test af analytiske elementmodeller sammenlignet med den numeriske metode til udpegning af indvindingsoplande, GEUS Særudgivelse.
- Iversen CH, Trolborg L, Møller RR, Christensen S (2010) Rapport om stationære og dynamiske oplande. Delprojekt\_2 om oplande. GEUS Rapport. Høringsversion, december 2009
- Jørgensen F, Kristensen M, Højberg AL, Klint KES, Hansen C, Jordt BE, Richardt N, Sandersen P (2008) Opstilling af geologiske modeller til grundvandsmodellering. Geo-vejledning 3, GEUS. [http://gk.geus.info/xpdf/geovejledning-270808\\_low.pdf](http://gk.geus.info/xpdf/geovejledning-270808_low.pdf).
- Jørgensen LF, Sandersen P, Sørensen J, Trolborg L, Ditlefsen C, Højberg AL, Møller RR, Iversen CH (2009) Dokumentation af informationer om modeller – sikring af fremtidig genanvendelse. GEUS rapport 2009/87. <http://jupiter.geus.dk/ModelDBDoc/DokumentationAfInformationerOmGeologiskeModeller.pdf>
- Klemes V (1986) Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31, 13-24.

- Madsen H (2000) Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology*, 235, 276-288.
- Middlemis H (2000) Murray-Darling Basin Commission. Groundwater flow modelling guideline. Aquaterra Consulting Pty Ltd. Project No. 125.
- Ovesen NB, Iversen HL, Larsen SE, Müller-Wohlfeil DI, Svendsen LM, Blicher AS, Jensen PM (2000) Afstrømningsforhold i danske vandløb. Faglig rapport fra DMU, nr. 340. Fagdatacenter for Hydrometri.
- Refsgaard JC (1997) Parametrisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 198, 69-97.
- Refsgaard JC (2007) Hydrological modelling and river basin management. Doctoral Thesis. GEUS Særudgivelse 2007.
- Refsgaard JC, Henriksen HJ, Harrar WG, Scholten H, Kassahun A (2005) Quality assurance in model based water management – Review of existing practice and outline of new approaches. *Environmental Modelling & Software*, 20, 1201-1215.
- Refsgaard JC, van der Sluijs, Højberg AL, Vanrolleghem PA (2007) Uncertainty in the environmental modelling process – A framework and guidance. *Environmental Modelling & Software*, 22, 1543-1556.
- Scholten H, Groot S (2002) Dutch guidelines. In: J. Refsgaard (Ed.), State-of-the-art report on Quality Assurance in modelling related to river basin management, vol. HarmoniQuA-report D-WP1-1, www.HarmoniQuA.org., GEUS, Copenhagen, ISBN, pp. ch.12, 1-10 [www.harmoniqua.org](http://www.harmoniqua.org).
- Scholten H, Kassahun A, Refsgaard JC, Kargas T, Gavardinas C, Beulens AJM (2007) A methodology to support multidisciplinary model-based water management. *Environmental Modelling & Software*, 22, 743-759.
- Scholten H, Refsgaard JC (2010) Quality Assurance in model based water management: Better Modelling Practices. In: Vanrolleghem PA (Ed) Modelling Aspects of Water Framework Directive Implementation Volume 1. IWA Publishing, London.
- Sonnenborg TO, Christensen BSB, Nyegaard P, Henriksen HJ and Refsgaard JC (2003) Transient modelling of regional groundwater flow using parameter estimates from steady-state automatic calibration. *Journal of Hydrology*, 273, 188-204.
- Sonnenborg TO, Henriksen HJ (2005) Håndbog i Grundvandsmodellering. GEUS rapport 2005/80, 305 sider.
- Troldborg L, Refsgaard JC, Jensen KH, Engesgaard P (2007) The importance of alternative conceptual models for simulation of concentrations in multi-aquifer system. *Hydrogeology Journal*, 15, 843-860.
- US EPA (2003) Draft Guidance on the Development, Evaluation; and Application of Environmental Models. Council for Regulatory Environmental Modelling, U. S. Environmental Protection Agency, Washington DC. November 2003
- US EPA (2009) Guidance on the Development, Evaluation; and Application of Environmental Models. Council for Regulatory Environmental Modelling, U. S. Environmental Protection Agency, Washington DC. EPA/100/K-09/003. March 2009
- Van Waveren RH, Groot S, Scholten H, Van Geer F, Wösten H, Koeze R, Noort JJ (1999) Good Modelling Practice Handbook, STOWA/RWS-RIZA, Utrecht/Lelystad, in Dutch, ISBN 90-5773-056-1. (<http://harmoniqua.wau.nl/public/Reports/Existing%20Guidelines/GMP111.pdf>).



# Appendix A: The Knowledge Base in MoST – Tasks and Activities

Appendix A kan downloades som pdf-fil fra  
[www.grundvandskortlægning.dk](http://www.grundvandskortlægning.dk) eller  
[www.vandmodel.dk](http://www.vandmodel.dk)

The MoST Knowledge Base was produced in 2006 by the project Harmonising Quality Assurance in model based catchments and river basin management (HarmoniQuA) which was partly funded under EU's FP5 (Contract EVK1-CT2001-00097)



<http://www.harmoniqua.org>



# Appendix B: The Knowledge Base in MoST - Methods

Appendix B kan downloades som pdf-fil fra  
[www.grundvandskortlægning.dk](http://www.grundvandskortlægning.dk) eller  
[www.vandmodel.dk](http://www.vandmodel.dk)

The Glossary was produced in 2006 by the project Harmonising Quality Assurance in model based catchments and river basin management (HarmoniQuA) which was partly funded under EU's FP5 (Contract EVK1-CT2001-00097)



<http://www.harmoniqua.org>



# Appendix C: The Knowledge Base in MoST - Glossary

Appendix C kan downloades som pdf fil fra  
[www.grundvandskortlægning.dk](http://www.grundvandskortlægning.dk) eller  
[www.vandmodel.dk](http://www.vandmodel.dk)

The Glossary was produced in 2006 by the project Harmonising Quality Assurance in model based catchments and river basin management (HarmoniQuA) which was partly funded under EU's FP5 (Contract EVK1-CT2001-00097)



<http://www.harmoniqua.org>



# Appendix D: Fastlæggelse af krav til RMS med konkret vurdering af usikkerhed på observationsdata, $S_{obs}$

Uddrag af og viderebearbejdning af materiale i "Sonnenborg TO, Henriksen HJ (2005) Håndbog i Grundvandsmodellering. GEUS rapport 2005/80".

## D.1 Formål med at bestemme usikkerhed på observationsdata

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

Formålet med at kvantificere usikkerheden på observationsdata (kalibreringsdata,  $S_{obs}$ ) er at opnå et mål for, hvor præcist modellen i bedste fald kan forventes at reproducere data. Herved kan i princippet opnås et objektive kriterium for, hvorledes data af samme type skal vægtes indbyrdes og endnu vigtigere, hvordan data af forskellig type skal vægtes i forhold til hinanden (vigtigt ved brug af objektivfunktioner).

Observationsdata vil altid være behæftet med usikkerhed. I nærværende sammenhæng vil faktorer, som resulterer i ikke systematiske afvigelser mellem målinger og modelresultater blive fortolket som usikkerhed på observationsdata. Målefejl er en af årsagerne til en del af denne usikkerhed, mens uoverensstemmelse mellem naturens kontinuerte variable og modellens diskrete variable er en anden årsag til afvigelser mellem observationer og modelprediktioner. Effekterne, som beskrives i dette afsnit, vil i middel være nul og introducerer derfor ikke nogen systematisk fejl i modelarbejdet. I det følgende vil usikkerheden på trykniveau- og vandføringsobservationer blive kvantificeret. Der sigtes på at bestemme en størrelsesorden for usikkerheden, idet en meget nøjagtig kvantificering kun undtagelsesvist kan lade sig gøre. Desuden er det ikke nødvendigt at fastlægge usikkerheden med speciel høj præcision for at kunne vurdere kvaliteten af observationerne.

## D.2 Kilder til usikkerhed på trykniveauobservationer

Trykniveauobservationer kan være behæftet med *målefejl*. Selve pejlingen i boringen kan være fejlbehæftet, idet både tryktransducere og vandspejlsmåleudstyr har en endelig præcision. Denne fejl vil under normale omstændigheder være relativ beskeden (få centimeter). Større fejl kan opstå pga. manuelle aflæsningsfejl eller tastefejl. Desuden kan det målte vandniveau i boringen afvige fra den sande værdi i magasinet pga. delvis tilstopning af eller omkring filtersætningen. Da barometertrykket sjældent indgår eksplicit i grundvandsmodeller, og atmosfæriske lufttryksændringer derfor ikke beskrives af modellen, kan barometereffekter også introducere en fejl på det måle trykniveau. Samlet vil målefejlene typisk resultere i en standardafvigelse på observationsværdien på 5 – 30 cm.

Koten, hvortil dybden til vandspejlet i boringen relateres (*målepunktskoten*), kan være behæftet med betydelig usikkerhed. Hvis terrænkoten er bestemt ud fra et topografisk kort med skalaen 1:25.000, vil intervallerne mellem konturlinierne være 2.5 m med en præcision på 0.5 m. Medtages boringens usikre placering på kortet, kan den samlede standardafvigelse på målepunktskoten være på 1 – 2 m. Hvis terrænkoten er bestemt vha. GPS vil usikkerheden typisk være af størrelsesorden centimeter.

*Skalaeffekter* medfører en yderligere usikkerhed på data. Skalaeffekter opstår, fordi der anvendes numeriske celler af endelig størrelse til beskrivelse af den kontinuerte fysiske virkelighed. Eksempelvis kan der være uoverensstemmelse mellem boringens filtersatte interval og den *vertikale diskretisering* i modellen. Både hvis filterintervallet er mindre end lagtykkelsen men specielt, hvis det er større end lagtykkelsen eller den vertikale cellestørrelse, vil der opstå fejl ved sammenligningen af observeret og simuleret trykniveau. Hvis boringen eksempelvis er filtersat over to sandmagasiner adskilt af et lavpermeabelt lerlag, vil det være vanskeligt at relatere det målte trykniveau til resultater fra en model, der opløser den geologiske lagserie. Normalt vil filterets midtpunkt blive anvendt til at afgøre, hvilken celled trykniveau der skal repræsentere det observerede. Dette valg introducerer en fejl, som er svær at kvantificere i det generelle tilfælde. Fejlen vil bl.a. afhænge af faktorer som filterlængden, den vertikale diskretisering og den geologiske opbygning af reservoiret.

Observationsboringens horisontale placering kan være behæftet med usikkerhed pga. unøjagtig opmåling. Hvis placeringen er vurderet ud fra kort, kan denne fejl være betydelig. Desuden vil boringens placering kun sjældent være sammenfaldende med midtpunktet af en numerisk celle. Det kan derfor være nødvendigt at interpolere mellem nærliggende celler, for at opnå det bedst mulige estimat af trykniveauet ved boringen. Derved introduceres en *interpolationsfejl*, som vil afhænge af den anvendte horisontale diskretisering og gradienten på trykniveauet i området.

*Topografiens variation* indenfor de numeriske celler kan give anledning til afvigelser mellem observeret og simuleret trykniveau. Trykniveauet i specielt de terrænnære frie magasiner vil være følsomt overfor variationer i topografien. Standardafvigelsen på det hydrauliske trykniveau vurderes generelt at afhænge af topografiens variation, den anvendte diskretise-

ring og det frie magasins ledningsevne, men det er svært at kvantificere fejlen i det generelle tilfælde.

Den sidste skalafejl skyldes den *geologiske heterogenitet* indenfor de numeriske celler, som det i en deterministisk grundvandsmodel er umuligt at beskrive eksplicit, da hver celle skal tilskrives ét sæt hydrauliske parametre. Usikkerheden på trykniveauet, skyldes ikke kun modelleret heterogenitet, men er desuden en funktion af gradienten på det hydrauliske trykniveau, variansen på logtransformeret hydraulisk ledningsevne samt korrelationslængden for samme størrelse. Det kræver derfor et detaljeret kendskab til den rumlige variabilitet af den hydrauliske ledningsevne, som sjældent er tilgængelig i praksis, at kvantificere denne type fejl. Imidlertid vil det undertiden være muligt at give et kvalificeret skøn på den hydrauliske ledningsevnes geostatistiske egenskaber ved at inddrage erfaringsværdier fra sammenlignelige områder. Alternativt kan fejlen vurderes, hvis trykniveaudata fra tætstående borer er til rådighed.

*Tidsskalaeffekter* kan være en fejlkilde, hvis der anvendes en stationær grundvandsmodel. Anvendelse af observationsdata, som repræsenterer ikke-stationære tilstande, vil ved brug af en stationær model resultere i afvigelser mellem observeret og simuleret trykniveau, som ikke kan elimineres. Hvis tidsserier af trykniveaumålinger er til rådighed, kan data analyseres, og en værdi, der repræsenterer den stationære tilstand, som ønskes beskrevet, kan beregnes. Herved kan den ikke-stationære fejl minimeres til et niveau, som er bestemt af tidsseriens længde og den anvendte analysemetode. I mange tilfælde vil der imidlertid kun være enkelte eller få målinger til rådighed fra de fleste af de installerede borer, og i dette tilfælde vil det være svært at filtrere den ikke-stationære effekt fra. Da målingerne kan indeholde værdifuld information om trykniveaubilledet i området, vil de ofte blive anvendt i kalibreringen alligevel. Hvis trykniveauerne i de tilgængelige borer er fremkommet ved måling på tilfældige tidspunkter af året, vil det imidlertid være rimeligt at antage, at målingerne i gennemsnit repræsenterer et middeltrykniveau. Pga. sæsonvariationerne vil de pågældende data være behæftet med en betydelig usikkerhed, som kan kvantificeres vha. tidsserier af trykniveaumålinger fra det aktuelle område. Herved kan et estimat for årstidsvariationerne og dermed usikkerheden på datapunkterne skønnes. Ud fra tidsserier ses mange steder variationer med ca.  $\pm 1$  m, svarende til en standardafvigelse på omkring en halv meter.

I Tabel D.1 ses en oversigt over de ovenfor beskrevne usikkerheder, hvor standardafvigelsen er anvendt til kvantificeringen. Yderligere er det forsøgt at beregne de enkelte usikkerhedsbidrag for hhv. Esbjergmodellen, DK model 2003 for Fyn, Sjælland og Sønderjylland og DK-model 2009 for Sjælland. Vurderingen tager udgangspunkt i den øverste regionale sandformation (eksempelvis beregningslag 3 i DK model Fyn og Sjælland). Variansen på log K er vurderet til hhv. 1 og 2 for Esbjerg/Sønderjylland (vest for hovedopholdslinien) og Fyn/Sjælland/Sønderjylland (øst for hovedopholdslinien), og korrelationslængden,  $\lambda$ , er for begge "områdetyper" sat til 500 m.

**Tabel D.1** Angivelse af standardafvigelse,  $s_{obs}$  (i m), på observationer af hydraulisk trykniveau.  $\Delta x$  betegner den horisontale diskretisering, og  $J$  er den hydrauliske gradient.

	$\Delta x$ m	Pejlefejl		Skalafejl		Ikke-stationaritet	Andre effekter <sup>3)</sup>	Samlet usikkerhed $S_{obs}$	Nøjagtighedskrav RMS
		Målefejl	Kote	In-terpol	Heterogenitet				
Generelt		0,05–0,3	0 – 2	0,5 $\Delta x J$	$C^{1/2} \lambda$ $S_{InK} J$ 1)	$\Delta h_t/2$ <sup>2)</sup>	0 – 1	$\sqrt{\Sigma s^2}$	
Esbjerg <sup>4)</sup>	500	0,1	1,5	0,5	1,0	0,5	0,25	2,0	$(\beta_2=1,65)$ 3,3
DK model 2003 Fyn	1000	0,1	1,5	1,5	2,1	0,5	0,25	3,0	$(\beta_2=2,0)$ 6,0
DK model 2003 Sønderjylland <sup>5)</sup>	1000	0,5 - 1		1 – 2		<=		3,0	$(\beta_2=2,0)$ 6,0
DK model 2003 Sjælland <sup>6)</sup>	1000	0,1	1,5	1,5	2,1	0,5	0,5	3,1	$(\beta_2=2,0)$ 6,2
DK model 2008 Sjælland <sup>7)</sup> Stationær	500	0,05	0,1	0,75	2,1	1,15	0,25	2,52	$(\beta_2=2,0)$ 5,0
DK model 2009 Sjælland <sup>8)</sup> Dynamisk	500	0,05	0,1	0,75	2,1	0	0,25	2,25	$(\beta_2=2,0)$ 4,5

1)  $S_{InK}$  er standardafvigelsen på log K.  $\lambda$  er korrelationslængden for log K. C er en konstant hvis værdi afhænger af strømningssystemet (se Sonnenborg og Henriksen, 2005) for yderligere forklaring.

2)  $\Delta h_t$  angiver amplituden på sæsonvariationerne i hydraulisk trykniveau.

3) Inkluderer effekter som vertikal skalafejl og variationer i topografi.

4) Kilde: Harrar et al. (2003)

5) Kilde: Sonnenborg et al. (2003)

6) Kilde: Henriksen et al. (2003)

7) Kilde: Højberg et al. 2008)

8) Kilde: Højberg et al. (2010)

### D.3 Samlet usikkerhed

Hvis fejlkilderne antages at være uafhængige, kan de enkelte bidrags varians (kvadratet på de tabulerede standardafvigelser) summeres, og den samlede standardafvigelse på observationsdata kan beregnes som kvadratroden af denne sum (vist i kolonnen længst til højre i tabel D.1). Usikkerheden beregnet i kolonnen længst til højre i tabel D.1 repræsenterer den nedre grænse for, hvor præcist en model med horisontal diskretisering  $\Delta x$  kan forventes at reproducere de tilgængelige trykniveauobservationer. Eventuelle fejl i f.eks. den konceptuelle model, modelopsætning, og parameterværdier vil forringe præcisionen af modelresultaterne udover dette niveau.

Ovenstående  $S_{obs}$  vurderinger er for Esbjerg, DK model 2003 og DK model 2008 foretaget i forbindelse med en 'quasi stationær' brug af observationsdata, hvor der er antaget et væsentligt bidrag som følge af ikke-stationaritet. Vurderingen af  $S_{obs}$  for DK model 2009 er i modsætning hertil foretaget for en dynamisk simulering og relateret i forhold til pejleobservationernes faktiske måletidspunkter, hvor bidraget fra ikke-stationaritet, giver et begrænset bidrag til den samlede spredning.

Ser vi på valideringsresultatet med DK model 2009 (Højberg et al., 2010) er der opnået resultater for Sjælland på (RMS = 4.05). Det vil sige at DK model 2009 honorerer det i tabellen vurderede RMS kriterium. Som supplement valgte GEUS desuden at fastsætte RMS kriteriet ud fra kriterium 3:  $\frac{RMS}{\Delta h_{max}} \leq \beta_3$ , hvor  $\beta_3$  blev fastsat til 0,05. Herved blev der fastlagt krav

til RMS for Sjælland på 4,89. Bemærk at kriterium 3 ikke skelner mellem om der anvendes en stationær eller en dynamisk model. Men i dette tilfælde er de to uafhængige skøn af krav til RMS altså relativt tæt på hinanden, hvilket styrker vurderingen.

## D.4 Konklusioner med hensyn til vurderinger af $S_{obs}$

Der er behov for mere erfaringsopsamling i form af konkrete vurderinger af  $S_{obs}$ . Det anbefales at bruge såvel kriterium 2 som kriterium 3 ved vurdering af krav til RMS, med henblik på tilvejebringelse af et bedre dokumenteret erfaringsgrundlag til fastsættelse af  $S_{obs}$ .

## D.5 Referencer

- Harrar WG, Sonnenborg TO, Henriksen HJ (2003) Capture zone, travel time, and solute transport model predictions using inverse modeling and different geological models. *Hydrogeology Journal* 11(5), 536-547.
- Henriksen, HJ, Troldborg L, Nyegaard P, Sonnenborg TO, Refsgaard JC, Madsen B (2003) Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark. *Journal of Hydrology*, 280, 52-71.
- Højberg AL, Troldborg L, Nyegaard P, Ondracek M, Stisen S, Christensen BSB & Nørgaard A (2008). National Vandressource Model: Sjælland, Lolland, Falster og Møn - Opdatering januar 2008. GEUS rapport 2008/65, København. [www.vandmodel.dk](http://www.vandmodel.dk)
- Højberg AL, Troldborg LT, Nyegaard P, Ondracek M, Stisen S, Christensen BSB (2010) DK model 2009. Sammenfatning af opdateringen 2005-2009. Draft 22. februar 2010.
- Sonnenborg TO, Christensen BSB, Nyegaard P, Henriksen HJ, Refsgaard JC (2003) Transient modelling of regional groundwater flow using parameter estimates from steady-state automatic calibration. *Journal of Hydrology*, 273, 188-204.



# Appendix E: Korttemaer, figurer og tabeller fra modelarbejdet

Informationerne listet i nedenstående tabel bør overvejes at indgå i afrapporteringen af den hydrologiske modellering. Nogle informationer vil være mest oplagte at præsentere som kort, andre som figurer og atter andre i tabelform. Afhængig af opgavetype, datatilgængelighed mv. vil valget af kort, figur eller tabel kunne variere for mange af informationerne.

Afsnit i rapport (Tabel 14, afsnit 4.7.10)	Udarbejdelse af kort / figurer / tabeller
Kapitel 3 Geologisk model (TRIN 2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Skematiske typeprofilsnit</li> <li>• Lithologiske fladekort</li> <li>• Udbredelse for top og bund af linser og 3D-views fra den geologiske forståelsesmodel/rumlige geologiske model</li> <li>• Tykkelseskort for de enkelte lag</li> <li>• Konceptuelle profilskitser, fx for de øverste morænelerslag</li> <li>• Kort over heterogenitetsforhold med vægt på sprækker og sandvinduer, glacialtektonisk variabilitet og tektoniske forhold såsom forkastninger mm</li> <li>• Korttemaer med modelusikkerhed for den geologiske model</li> </ul>
Kapitel 4 Øvrige data (TRIN 2)	<p><i>Generelt</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Oversigtskort over modelområdet med afgrænsninger af interesseområdet</li> <li>• Topografi</li> <li>• Vandløbs- og dræningssystemer</li> </ul> <p><i>Hydrauliske størrelser</i></p> <p>A-priori parameterværdier for de enkelte geologiske enheder vurderet på baggrund af prøvepumpningsanalyser, slug-tests eller erfaringsværdier fra andre områder.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hydraulisk ledningsevne intervaller (horisontal og vertikal)</li> <li>• Magasinkoefficienter og <math>\alpha</math>-tal</li> <li>• Lækagekoefficienter for fx vandudveksling mellem grundvand og vandløb/søer</li> </ul> <p><i>Klima- og vandføringsdata</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tidslig og rumlig variation i nedbør og fordampning, evt. i form af tidsserier og temakort med angivelse af datagrundlag og metoder</li> <li>• Nettonedbørens variation i tid og rum og antagelser vedr. fordeling af nettonedbør mellem grundvand og overfladevand</li> <li>• Evt. øvrige "kilder" til grundvandsdannelse i området fx infiltrationsbassiner, nedsivning langs forsyningsledninger</li> <li>• Tidslig og rumlig variation i afstrømningsforhold fra faste målestationer og synkronmålinger</li> </ul> <p><i>Vandindvinding</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vandforsyningsstruktur – korttemaer med vandværker og vandforsyningsboringer, markvandere og vandindvinding til industrielle formål.</li> <li>• Tidslig udvikling i vandindvinding</li> </ul> <p><i>Grundvandsforhold i øvrigt</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grundvandspotentialeforhold og tidslige variationer i trykniveau ud fra pejletidsserier</li> <li>• Naturlige vandkvalitetsforhold på udvalgte profilsnit, fx ved vandtype, redoxmiljø og nitratindhold eller i form af kort over de enkelte hydrostratigrafiske lag/grundvandsmagasiner</li> <li>• Korttema der viser, hvor der er foretaget aldersdateringer af grundvandet med angivelse af filter og dateringsmetode</li> </ul>

Geo-vejledning 7, God praksis i hydrologisk modellering  
Appendix E: Korttemaer, figurer og tabeller fra modelarbejdet

<p>Kapitel 5 Konceptuel model (TRIN 2)</p>	<p><i>Afgrænsning af modelområdet</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• UTM koordinater for modelområdet</li> <li>• Horisontal og vertikal diskretisering af beregningslag</li> </ul> <p><i>Randbetingelser</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ydre og indre randbetingelser som fx placering af dræn, vandløb, søer, hav, trykniveaurande mv. på kort</li> </ul> <p><i>Procesbeskrivelser</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Skematisk oversigt over hvilke fysiske/kemiske processer der skal benyttes i den numeriske model</li> </ul> <p><i>Parameterisering</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zonering af hydrauliske parametre</li> <li>• Parameterværdier som ikke skal indgå i kalibrering</li> <li>• Startgæt og realistisk interval på parametre som skal kalibreres</li> </ul> <p><i>Vandbalance</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Størrelsesorden af forventet vandbalance for området (nedbør, fordampning, grundvandsdannelse, oppumpning, underjordisk strømning over rand, vandløbsafstrømning evt. opdelt på afstrømningskomponenter).</li> </ul> <p><i>Alternative konceptuelle modeller</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Præsenteres skematisk, såfremt det er valgt at arbejde med mere end en model.</li> </ul>
<p>Kapitel 6. Numeriske modelværktøjer og metodik (TRIN 2)</p>	<p><i>Usikkerhedskilder – karakterisering og prioritering</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Usikkerhedsmatrice (se Template i Appendix F)</li> </ul>
<p>Kapitel 7. Modelopstilling (TRIN 3)</p>	<p><i>Modeltekniske størrelser</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Konvergenskriterier</li> <li>• Tidsskridt</li> <li>• Vandbalancefejl</li> </ul>
<p>Kapitel 8. Kalibrerings- og valideringsstrategi (TRIN 3)</p>	<p><i>Kalibrering</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Liste med targets, dvs hvilke observationsdata (fx pejleboringer, vandføringsmålestationer) benyttes til kalibrering</li> <li>• Numeriske kriterier (kvalitative og kvantitative)</li> <li>• Numeriske mål for nøjagtighed</li> <li>• Vægtning af objektivfunktion</li> </ul> <p><i>Validering</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Liste med valideringstest med angivelse af targets, numeriske kriterier og mål for nøjagtighed</li> </ul>
<p>Kapitel 9 Kalibrering (TRIN 4)</p>	<p><i>Resultater af sensitivitetsanalyser og invers modellering</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Skaleret sensitivitet som grundlag for udvælgelse af parameterværdier til optimering under kalibrering</li> <li>• Kalibrerede parameterværdier med angivelse af 95 % konfidensgrænser fra den inverse modellering samt startgæt og vurderet realistisk variationsinterval (tabel eller figur).</li> </ul> <p><i>Kalibreringsresultater</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vandbalancer (og massebalancer) for modellen som helhed og udvalgte delområder og modellag</li> <li>• Tidsserier af trykniveauer, vandføring og evt. koncentrationer – vises sammen med observerede data</li> <li>• Kort med residualværdier af trykniveauer</li> <li>• Kalibreringsresultat i forhold til statistiske mål</li> </ul>

Geo-vejledning 7, God praksis i hydrologisk modellering  
Appendix E: Korttemaer, figurer og tabeller fra modelarbejdet

Kapitel 10 Model validering og usikkerhedsanalyse (TRIN 4)	<i>Valideringsresultater</i> <ul style="list-style-type: none"><li>• Samme typer kort, figurer og tabeller som ved modelkalibrering</li></ul> <i>Usikkerhedsanalyser</i> <ul style="list-style-type: none"><li>• Oversigt over usikkerhed på simulerede kalibrerings- og valideringstargets sammenholdt med vurderet usikkerhed på de tilsvarende observationsdata</li></ul>
Kapitel 11 Modellens dokumenterede anvendelsesområde (TRIN 4)	Benyt Template i Appendix F
Kapitel 12 Scenarie opstilling (TRIN 5)	Oversigt over scenarier med tilhørende forudsætninger præsenteret i tabelform og evt. på figurer.
Kapitel 13 Simuleringsresultater (TRIN 5)	<i>Resultater af simuleringsscenarier.</i> <ul style="list-style-type: none"><li>• Oversigt over simuleringsresultater for de for de ønskede prædiktionsvariable (fx grundvandsdannelse, indvindingsoplunde, vandløbspåvirkninger) i form af kort, figurer og tabeller</li></ul> <i>Usikkerhedsanalyser</i> <ul style="list-style-type: none"><li>• Oversigt over usikkerheder på modelsimuleringer af de ønskede prædiktionsvariable</li></ul>



# Appendix F: Templates

## F.1 Usikkerhedsmatrice

- Simpel
- Udvidet

## F.2 Model gyldighed

## F.3 Eksempel på log til modelkalibrering – til internt brug hos Modelløren

Templates kan downloades som pdf-filer fra [www.grundvandskortlægning.dk](http://www.grundvandskortlægning.dk), eller fås som excel-filer ved henvendelse til GEUS, Afdelingen for Grundvands- og Kvartærgeologisk kortlægning, tlf. 3814 2081.

Geo-vejledning 7, God praksis i hydrologisk modellering  
 Appendix F1: Template for usikkerhedsmatrice - simpel

Kilde		Usik.grad/ dækning	Vægt	Effekt	Redu- cerbar	Kvantifi- cerbar	Tiltag	Bemærkninger
D A T A	Potentiale							
	Afstrømning							
	Geologi							
M O D E L	input data							
	Grundvandsdannelse							
	Konceptuel model							
	Geologi							
	Processer							
	Rand							
M A N A G E M E N T S C E N A R I E R	Kode							
	Politiske forhold							
	Fremtidige forhold							
	Indvindingsbehov							
	Klima							
	Forureningsbelastning							

Kilde	Usik. Grad/ dækning	Vægt	Effekt	Reducerbar	Kvantificierbar	Tiltag	Bemærkninger
<b>System data</b>							
Arealanvendelse							
Datagrundlag							
Repræsentation i model							
Topografi							
Datagrundlag							
Repræsentation i model							
Geologi							
Tolkning							
Datagrundlag og kvalitet							
Data dækning							
Repræsentation i model							
Redoxgrænse							
Datagrundlag og kvalitet							
Data dækning							
Repræsentation i model							
<b>Rande</b>							
Top							
Nedbør/fordampning							
Datagrundlag							
Repræsentation i model							
Bund							
Horisontal model rand							
Vandløb							
Datagrundlag							
Repræsentation i model							
Søer							
Datagrundlag							
Repræsentation i model							
Indvindinger							
Datagrundlag							
Repræsentation i model							
Kunstig vanding							
Datagrundlag							
Repræsentation i model							
Udledninger							
Datagrundlag							
Repræsentation i model							
Dræn							
Datagrundlag							
Repræsentation i model							
<b>Input data</b>							
Potentialer							
Datakvalitet							
Rumlig opløsning							
Tidslig opløsning							
Afstørningsdata							
Datakvalitet							
Rumlig opløsning							
Tidslig opløsning							
<b>Parametre</b>							
hydrauliske ledn. Evne							
lækage							
magasintal							
drænkonsant							
manningtal							
rodzone param.							
overlandflow parametre							
rand parametre							
<b>Modelkode</b>							
Procesbeskrivelse							
UZ-dummy							
Rodzone							
Overfladisk afstrømning							
Dræn							
Ydre randbetingelser							
Indre randbetingelser							
Vandløb							
fjord/hav							
indvindinger							
Befæstede arealer							
Ikke medtaget processer							
Sprækker							
manglende UZ beskrivelse							
tidslig variable, vandløb							
Numerik							
Kode fejl							
<b>Andet</b>							
Data processing/menneskelige							

## Datablad - Anvendelighed af hydrologisk model

### 1.0 Modelinfo

**1.1 Stamdata** Modelnavn: \_\_\_\_\_ Modeldb id: \_\_\_\_\_  
Udført af: \_\_\_\_\_ Modelejer: \_\_\_\_\_  
Dato: \_\_\_\_\_

### 1.2 Formål med modelanvendelse

- |  |  |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> Test af geologisk model                         | <input type="checkbox"/> Indvindings/grundvandsdannende oplande  |
| <input type="checkbox"/> Vandbalance                                     | <input type="checkbox"/> Grundvandsindvindings effekt på vandløb |
| <input type="checkbox"/> Grundvandsindvindings effekt på søer/vådområder | <input type="checkbox"/> Stoffransport                           |
| <input type="checkbox"/> Effekter af klimaændringer                      | <input type="checkbox"/> Andet: _____                            |

### 1.3 Model type

Beskriv: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## 2.0 Model validering

### 2.1 Valideringstest

Hvilke test er gennemført - beskriv: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

### 2.2 Resultater af validering

Beskriv: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## 3.0 Modellens gyldighed

### 3.1 Dokumenteret velegnet

Type anvendelse	Geografisk område	Nøjagtighed

### 3.2 Måske velegnet

Type anvendelse	Geografisk område	Nøjagtighed

### 3.3 Ikke velegnet

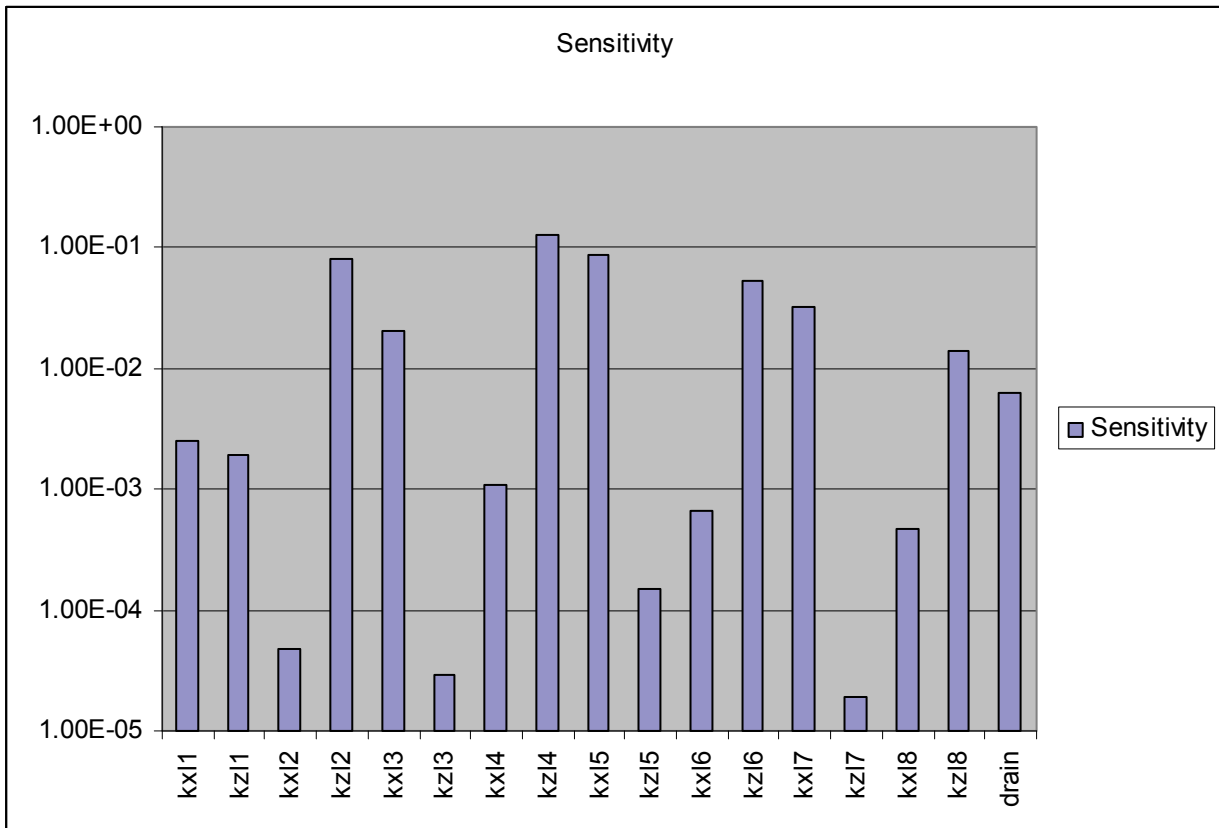
Type anvendelse	Geografisk område	Nøjagtighed

### XXXinv1:

<b>Dato</b>	01-01-2010	
<b>Beskrivelse</b>	Test af invers opsætning. Model kørt én gang og residualer (phi) beregnet af PEST	
<b>Observationer</b>	<b>Potentialer</b>	Case_pejlHovedO1970-2006.txt
	<b>Afstrømning</b>	Qretrive.ins:43.04,47.15,47.10,44.08,44.12,45.02,45.21,45.01,45.22,46.04,46.02,46.01,46.03,45.27
<b>Parameter i optimering</b>	-	
<b>Resultater</b>		
<b>Følsomheder</b>	-	
<b>Korrelationer</b>	-	
<b>Konklusion</b>	-	
<b>Fil</b>	-	

### XXXinv2:

<b>Dato</b>	02-01-2010	
<b>Beskrivelse</b>	En iteration for at finde følsomheder og korrelationer.	
<b>Observationer</b>	<b>Potentialer</b>	Case_pejlHovedO1990-2006.txt
	<b>Afstrømning</b>	Qretrive.ins:43.04,47.15,47.10,44.08,44.12,45.02,45.21,45.01,45.22,46.04,46.02,46.01,46.03,45.27
<b>Parameter i optimering</b>	Alle K + dræn	
<b>Resultater</b>		
<b>Følsomheder</b>	Se graf	
<b>Korrelationer</b>	To sæt med korrelationer > 0.7 (kxl4,kzl4 og kxl6,kzl6)	
<b>Konklusion</b>	Param til kalib: Kxl1,Kzl1,Kzl2, Kzl4, kzl6,kxl5, drain zone 3 og 7 tied til zone 5 kx/kz=10	
<b>Fil</b>	Case_invoptim.xls (output PEST)	



### XXXinv3:

<b>Beskrivelse</b>		Første optimering. Initial værdier fra literatur
<b>Observationer</b>	<b>Potentialer</b>	XXX_pejlHovedO1990-2006r1.txt Der er frasorteret potentialer, der står i tæt på en indv. (<250m) i samme lag og hvor der var en stor ME (abs(ME)>10) i XXXinv2. Alle pejledatoer er sat til 01-01-2007
	<b>Afstrømning</b>	Qretrive.ins:43.04,47.15,47.10,44.08,44.12,45.02,45.21,45.01,45.22,46.04,46.02,46.01,46.03,45.27
<b>Parameter i optimering</b>		kx11,kz11,kz14,kx15,drain
<b>Resultater</b>		
<b>Bemærkninger</b>		Med optimerede værdier er der fem potentielle observationer der står i dry cell (145.2244,155.1036,155.1223_1,155.992,145.2239) og bidrager meget til Phi  Generelt er potentialebilledet pænt – rigtige gradient og retning. Der er dog nogle problemer ved XXX kildeplads centralt i modellens område. Fra følsomheder i inv2 ses, at potentialer centralt er følsomme overfor alle tre lerlag, muligt at disse skal have forskellige ledningsevner for at tilgodese lokalområdet

	<p>Vstation XX.XX er helt ved siden af, der er problemer med både dynamik og niveau</p> <p>Øvrige vstationer har rimelig dynamik men fejl niveau</p> <p>Samlede vandbalance viser 14% for meget vand på årsbasis</p>
<b>Følsomheder</b>	følsomhed for kx11 væsentligt lavere ved slut
<b>Korrelationer</b>	alle under 0,7
<b>Konklusion</b>	<p>Ny obs-fil frasorteret obs i dry cells</p> <p>Der er sluse og pumpeanlæg v Vstat XX.xx, den tages ud af kalibreringen</p> <p>kx11 tages ud af kalib, låses til kx11 med en faktor 50</p> <p>Starter med manuel følsomhedsanalyse med variation af K for de tre lerlag, justeret en faktor 10</p>
<b>Fil</b>	<p>Case_invoptim.xls (output PEST)</p> <p>Case_kalib_log.xls (samlet oversigt)</p>





9 788778 712806

## GEO-VEJLEDNING 7 GOD PRAKSIS I HYDROLOGISK MODELLERING

Som støtte for den nationale grundvandskortlægning udarbejder GEUS i samarbejde med By- og Landskabsstyrelsens miljøcentre faglige vejledninger i forskellige aspekter af grundvandskortlægningen.

Disse vejledninger udgives i en serie kaldet Geo-vejledninger, og skal blandt andet tjene som fagligt grundlag for de udbud af kortlægningsopgaver som miljøcentrene foretager indenfor grundvandsområdet.

Nærværende Geo-vejledning sammenfatter de seneste erfaringer med god praksis i hydrologisk modellering. Det er formålet med denne Geo-vejledning at fremhæve de erfaringer der kan sikre at opstilling og anvendelse af hydrologiske modeller sker metodisk ensartet og på et tilstrækkeligt højt niveau i hele landet.

Geo-vejledningen anvendes sidestillet med lærebøger og andet litteratur der detaljeret beskriver opstillingen af hydrologiske modeller.