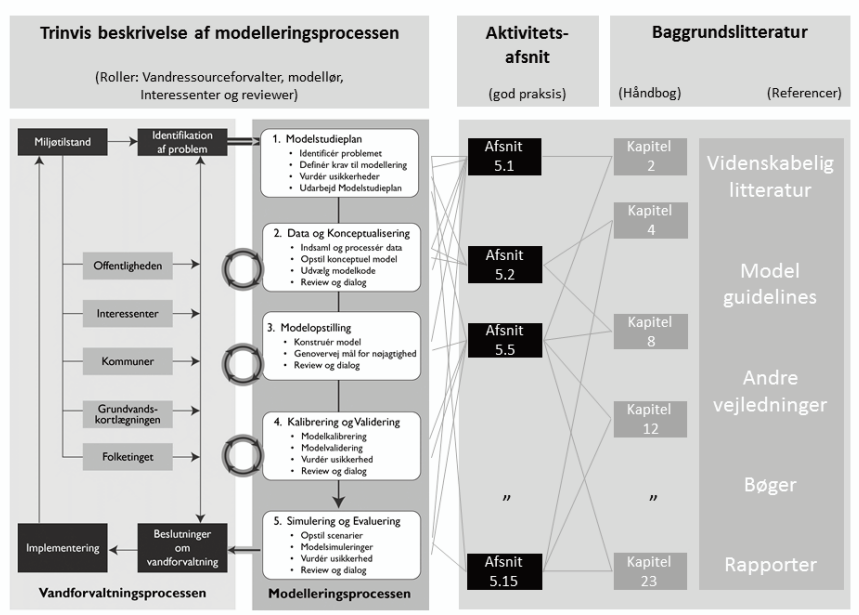


Hydrologisk geovejledning

God praksis i hydrologisk modellering

Hans Jørgen Henriksen, Lars Trolborg, Torben Sonnenborg, Anker Lajer Højberg,
Simon Stisen, Jacob B. Kidmose, Jens Christian Refsgaard

GEO-VEJLEDNING 2017/1



Geovejledning nr. 2017/1 – Hydrologisk geovejledning

God praksis i hydrologisk modellering

30. Maj 2017

Hans Jørgen Henriksen, GEUS

Lars Trolborg, GEUS

Torben Sonnenborg, GEUS

Anker Lajer Højberg, GEUS

Simon Stisen, GEUS

Jacob B. Kidmose, GEUS

Jens Christian Refsgaard, GEUS

Indhold

Forord	5
1. Baggrund, formål og vision	7
2. Indhold og anvendelse af Hydrologisk geovejledning	9
2.1 Indhold.....	9
3. God modelleringspraksis – videnstatus	11
3.1 Danske og internationale vejledninger i hydrologisk modellering / grundvandsmodellering.....	11
3.2 Hvorfor benyttes hydrologisk modellering	11
3.3 Hvordan sikres god kvalitet i hydrologisk modellering	12
4. God modelleringspraksis - vejledning	15
4.1 Aktørerne og de fem trin i modelleringsprocessen	15
4.2 Trin 1 – Model studieplan	18
4.3 Trin 2 – Data og konceptualisering	19
4.4 Trin 3 – Model opstilling	20
4.5 Trin 4 – Kalibrering og validering	21
4.6 Trin 5 – Simulering og evaluering	22
4.7 Nødvendige rammebetingelser	23
5. Vejledning i udvalgte opgaver	25
5.1 Valg af forskellige modeltyper til forskellige formål	25
5.2 Opstilling af konceptuel model	31
5.3 Behov for alternativ konceptuel model?	36
5.4 Review.....	41
5.5 Valg af kalibrerings- og valideringskriterier og mål for nøjagtighed	45
5.6 Modelkalibrering	53
5.7 Usikkerhedsanalyser	58
5.8 Model validering	63
5.9 Modellens dokumenterede anvendelsesområde	69
5.10 Dokumentation af model	71
5.11 Datatilgængelighed, diskretisering og parameterisering	77
5.12 Hydrologisk modellering i det urbane rum.....	85
5.13 Modellering af indvindingsoplande	90
5.14 Modellering af grundvandsdannelse til specifikke magasiner	98
5.15 Genanvendelse af kortlægningsmodel.....	105
6. Konklusioner	113
7. Referencer	115
Appendix A: Lessons learned	117
A.1 Formål og metode.....	117
A.2 Spørgeskema	118
A.3 Væsentlige resultater fra undersøgelsen.....	120
Appendix B: Fastlæggelse af krav til RMS med konkret vurdering af usikkerhed på observationsdata, S_{obs}	122
B.1 Formål med at bestemme usikkerhed på observationsdata.....	122
B.2 Kilder til usikkerhed på trykniveauobservationer	122
B.3 Samlet usikkerhed	124

B.4 Konklusioner med hensyn til vurderinger af S_{obs}	126
B.5 Referencer	126

Forord

Opdateringen af Geovejledning 7 og 2 (i det følgende benævnt "Geovejledning nr. 2017/1 - Hydrologisk geovejledning") blev påbegyndt i efteråret 2015, og samler den tidligere Geovejledninger 7 samt Geovejledning 2 (og diverse delrapporter), som omhandler hydrologi og beregning af indvindingsoplande. Desuden er indarbejdet dele af administrative præciseringsnotater, udarbejdet i forbindelse med grundvandskortlægningen.

Projektforløbet er foregået jf. to faser:

- Fase 1 Kravspecifikation (September 2015- December 2015)
- Fase 2 Udførelse (Januar 2016 – December 2016)

Kravspecifikationen fra Fase 1 mandede ud i en skitse til en samlet Hydrologisk geovejledning, omfattende en synopsis med forslag til opdatering af 10 vejledningsafsnit fra Geo-Vejledning 7, samt fem nye vejledningsafsnit vedr. datatilgængelighed og parameterisering, modellering i byområder, modellering af indvindingsoplande, modellering af grundvandsdannelse og genanvendelse af modeller.

Arbejdsgruppen har bestået af:

- Hans Jørgen Henriksen, GEUS (projektleder, afsnit 5.5, 5.9, 5.10, 5.14)
- Jens Christian Refsgaard, GEUS (afsnit 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.8)
- Anker Lajer Højberg, GEUS (afsnit 5.6, 5.7)
- Lars Trolborg, GEUS (afsnit 5.13)
- Torben Sonnenborg, GEUS (afsnit 5.15)
- Simon Stisen, GEUS (afsnit 5.11)
- Jacob B. Kidmose, GEUS (afsnit 5.12)
- Philip Grinder Pedersen, Miljøstyrelsen (kontaktperson SVANA)
- Anders Pytlich, Miljøstyrelsen
- Elise Schmidt, Miljøstyrelsen
- Janni Thomsen, Miljøstyrelsen (fra 1. oktober 2016)

Der har i forbindelse med opdateringen været afholdt to workshops i København (december 2015) og Middelfart (august 2016) med yderligere deltagelse af:

- Bibi Gondwe, Rambøll
- Jens Asger Andersen, Orbicon
- Jens Østerby, Randers Kommune
- Saschin Karan, COWI
- Anders Refsgaard, COWI
- Claus Iversen, Viborg Kommune
- Kurt Møller, Danske Regioner
- Helen Berger, COWI
- Ole Munch Johansen, NIRAS
- Morten Asp Andersen, SWECO
- Paul Thorn, Rambøll
- Thomas Vangkilde Pedersen, GEUS
- Lisbeth Flindt Jørgensen, GEUS

1. Baggrund, formål og vision

Med udgangen af 2015 er grundvandskortlægningen i sin hidtidige udformning afsluttet, men fortsætter fra 2016 fem år frem med kortlægning af nye indvindingsoplande udenfor OSD. Der er derfor identificeret et behov for en opdatering dels med ny forskningsmæssig viden og dels på baggrund af erfaringer, der er indkommet siden sidste vejledning blev færdiggjort i 2010. Inddragelsen af interessenter har i den sammenhæng været essentiel til prioritering af arbejdet.

Det primære formål er fortsat at understøtte grundvandskortlægningen, der kræver opstilling af numeriske grundvandsmodeller. Anvendelse af numeriske grundvandsmodeller er en velegnet kortlægningsmetode til at beregne bl.a. indvindings- og grundvandsdannende oplande, indvindings- og klimascenarier, grundvandsdannelse, grundvandets alder og grundvandets strømningsretning. Nærværende geovejledning har til formål at sikre, at hydrologisk modellering relateret til kortlægningen gennemføres på et tilstrækkeligt højt fagligt niveau, og at modelleringen sker på en ensartet måde i hele landet. Det er håbet, at vejledningen desuden kan bruges til andre formål.

Visionen for opdatering af Hydrologisk geovejledning har været følgende (NST, 2015):

- Integration af relevant materiale fra Geo-Vejledning 2 (alle tre delrapporter) og Geo-Vejledning 7, inklusiv relevant fagligt vejledningsmateriale fra præciseringsnotater (porøsitet og indvindingsoplande) samt nye vejledningsafsnit omhandlende datatilgængelighed og parameterisering, hydrologisk modellering i relation til kortlægningen i urbane rum, modellering af indvindingsoplande og grundvandsdannelse samt genanvendelse og post-audit af eksisterende modeller
- Bred involvering af interessenter i prioriteringer af vejledningsafsnit til den opdaterede vejledning med workshops med aktiv deltagelse af modellører (fra rådgivere) samt repræsentanter for slutbrugere (kommuner og regioner)
- Dynamisk opdatering, dvs. mulighed for wiki-pedia lignende løsning eller en løsning hvor brugere kan indsende forslag opdatering af vejledningsafsnit og metoder, som en redaktør på GEUS kan tage stilling til og lave opdateringer af, når det skønnes nødvendigt.

2. Indhold og anvendelse af Hydrologisk geovejledning

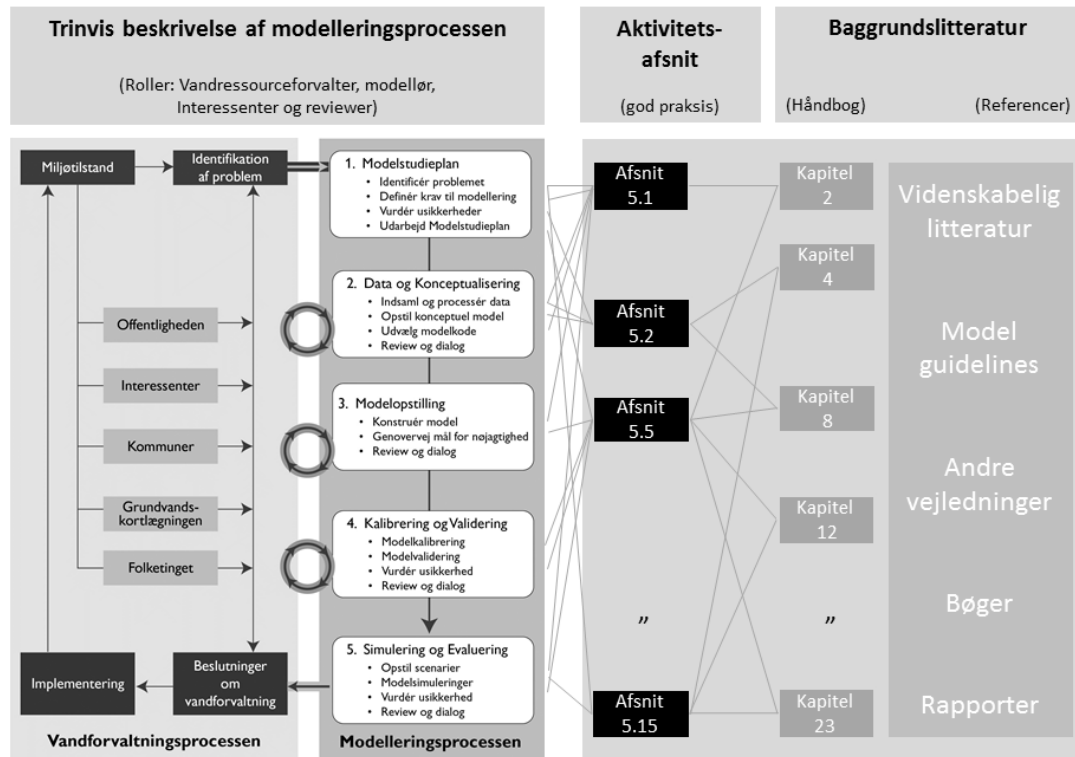
2.1 Indhold

Der eksisterer en mangfoldighed af vejledninger i hydrologisk modellering og grundvandsmodellering (ASTM, 1992; ASTM, 1994; van Waveren et al., 1999; Middlemis, 2000; Henriksen et al., 2001; Scholten, 2002; US EPA, 2003; Refsgaard et al., 2005; Scholten et al., 2007; US EPA, 2009; Scholten and Refsgaard, 2010). Der findes meget skriftligt materiale med vejledninger til god modelleringspraksis for grundvandsmodellering fx MoST som blev udviklet under EU projektet HarmoniQuA (www.harmoniqua.org) og "Håndbog i Grundvandsmodellering" (Sonnenborg og Henriksen, 2005). Endelig findes der detaljerede specifikationer af dataformater og leverancer til databaser, som fx hvilke modeldata, der skal lægges ind i GEUS' modeldatabase. Dette materiale har udgjort grundlaget for Geovejledning 2 og 7 samt diverse administrative præciseringsnotater, udarbejdet i forbindelse med grundvandskortlægningen.

Der har været behov for en afklaring vedr. snitfladen til administrationsgrundlaget og Hydrologisk geovejledning udgør i denne sammenhæng den faglige vejledning og state-of-the-art vedr. god praksis i hydrologisk modellering, fx faglig vejledning af alle de forhold der i modelprocessen bør og skal inddrages i de forskellige modeltrin. Administrativt og i forbindelse med bl.a. udbud af kortlægningsmodeller, har Miljøstyrelsen i administrationsgrundlaget behov for at sikre ensartethed vedr. opgavens udførelse fx afgrænsning af det 'administrative indvindingsopland', der benyttes af slutbrugere (kommuner) som grundlag for indsatsplaner vedr. grundvandsbeskyttelsen, ligesom den administrative praksis i grundvandskortlægningen kan være anderledes end beskrevet i geovejledningen, fx i gennemførelse af fem trinsmodellen beskrevet i kapitel 4, eller konsekvent brug af eksterne reviewere eller alternative konceptuelle modeller. Der vil altid være en vekselvirkning mellem anbefalinger vedr. faglig god praksis og administrationsgrundlaget.

Ved at stile efter en wikipedia web løsning, er der mulighed for at opdatere Hydrologisk geovejledning og administrative vejledningsafsnit (notat om administrative hydrologiske valg) løbende med fortsat vekselvirkning.

Hensigten med denne opdatering af tidligere geovejledninger vedrørende hydrologisk modellering i relation til grundvandsbeskyttelse og kortlægning (fx modellering af indvindingsoplande og grundvandsdannelse) er at give en samlet faglig vejledning til hydrologisk modellering jf. en strukturering af modelprocessen i fem trin jf. Figur 1. I hvert trin indeholder Hydrologisk geovejledning en beskrivelse af god praksis i hydrologisk modellering opdelt på i alt 15 aktivitetsafsnit, med henvisninger til litteratur og baggrundskapitler (Håndbog i grundvandsmodellering).



Figur 1 Strukturering af modelproces, aktiviteter, metoder og baggrundskapitler

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 med aktivitetsafsnit i god praksis. For hvert trin (se Figur 1 og 2) opridses de tilhørende modelleringsopgaver med konkrete henvisninger til, hvor mere detaljeret vejledning findes. Herudover er der udarbejdet opdaterede vejledningsafsnit 5.1 – 5.10 om emner og problemstillinger, der erfaringsmæssigt er vigtige og hvor det eksisterende vejledningsmateriale fra de hidtidige Geovejledninger 2 og 7 er forbedret ud fra opnåede erfaringer og nye forskningsresultater.

I vejledningsafsnit 5.11-5.15 gives vejledning og god praksis i emnerne datatilgængelighed og parameterisering, modellering i urbane rum, modellering af indvindingsoplande og grundvandsdannelse, samt genanvendelse af eksisterende modeller.

Kapitel 5 indeholder en konklusion med et sammendrag af de væsentligste elementer.

3. God modelleringspraksis – videnstatus

3.1 Danske og internationale vejledninger i hydrologisk modellering / grundvandsmodellering

Siden den hidtidige Geovejledning 7 (Refsgaard et al. 2010) blev udarbejdet er der kommet nye guidelines til fra Australien der indeholder fx online vidensforum og forskellige vejledninger (Black et al. 2011), ligesom delrapport 3 af den hidtidige Geovejledning 2 har opsamlet viden om usikkerheder på indvindingsoplande (Henriksen et al. 2011). Endelig er der i administrative præciseringsnotater beskrivelser af bl.a. porøsitet og partikelbanesimulering af indvindingsoplande. Desuden er der kommet ny viden om hydrologisk modellering og kortlægning af indvindingsoplande i urbane rum og voxel modellering. Opgaven har efter 2015 ændret sig, så der nu eksisterer modeller rigtig mange steder, hvorfor det er vurderet, at god praksis i hydrologisk modellering fortjener præcisering og opdatering.

3.2 Hvorfor benyttes hydrologisk modellering

Behovet for hydrologisk modellering opstår i forbindelse med vandforvaltningen. 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 vandbalancens elementer såsom nedbør, fordampning, grundvandsdannelse, grundvandstilskud og drænafstrømning til vandløb; (c) at vurdere effekten af alternative indvindings-scenarier på grundvandsmagasiner, vandløb og vådområder; (d) at vurdere grundvandets alder og strømningsretninger; eller (e) at vurdere klimaændrings effekter på vandressourcen. I de senere år har der været et voksende fokus på også at kunne vurdere (f) effekter af klimatilpasning fx LAR på vandressourcen i byområder samt (g) at vurdere effekter på grundvand og overfladevand fra jord- og grundvandsforureninger, herunder forskellige typer deponeringsanlæg.

Selvom formålene for forskellige opgaver i forbindelse med grundvandskortlægningen typisk vil være de samme og i sit udgangspunkt vil være relateret til grundvandsbeskyttelse og indsatsplaner, som forudsætter at indvindingsoplandet til en vandindvinding og grundvandsdannelsen i et område fastlægges, ender alle modelleringsopgaver med at være forskellige. Det skyldes både, at de forskellige oplande er forskellige med hensyn til bl.a. geologi, klima og datatilgængelighed, og at problemstillingerne med vandforvaltningen varierer fra sted til sted afhængig af fx forureningstrusler, interessentinteresser, konkrete handlingsmuligheder og –omkostninger. Det betyder, at hver modelleringsopgave i princippet vil være unik, og at der ofte (næsten altid) opstår overraskelser undervejs. Eftersom overraskelser kan være ganske lærerige og af stor betydning for vores viden om grundvandsforholdene i et givet område, er det vigtigt at være åben overfor, at modelleringen ikke nødvendigvis giver det forventede resultat. 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 model baserede 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 (vandressourceforvalter¹, modellør og interessenter) med henblik på at opnå en fælles forståelse samt skabe konsensus om den udførte modellering. Før modelleringsopgaven påbegyndes bør parterne i fællesskab helt konkret afklare om der er tilstrækkelig data til det ønskede ambitionsniveau.
2. Der skal gennemføres *eksterne reviews* (peer reviews eller model audit afhængigt af opgavetypen ved højt ambitionsniveau/detailberegninger) af selve modelleringsarbejdet. Det skal gennemføres af fagfolk, som har modelleringsmæssig erfaring og indsigt i at gennemfører selve modelleringsopgaven, og som desuden er eksterne (uafhængige) i forhold til opgavens parter.
3. Modelleringen skal udføres i henhold til en god modelleringspraksis (fx denne vejledning), 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. Helt konkret skal de 3-5 væsentligste kilder til usikkerhed ved afslutning af trin 2 (konceptualisering) udvælges og det skal aftales mellem partnerne hvordan usikkerhedsanalysen skal gennemføres. Tilsvarende skal kravene til en models nøjagtighed til brug for 3D partikelbanesimulering af indvindingsoplande og 3D grundvandsdannelse til specifikke magasiner løbende vurderes i samspil mellem modellør, vandressourceforvalter og interessenter.
5. Der skal i videst muligt omfang gennemføres valideringstest mod uafhængige data for de typer situationer, hvortil modellen påtænkes anvendt. Hvis der fx skal beregnes grundvandsdannelse eller indvindingsoplande er det vigtigt at inddrage valideringstests der omfatter pejlinger og vandføringsmålinger fra punkter, der ikke har indgået i kalibreringen, ligesom det er vigtigt at inddrage bløde data såfremt sådanne foreligger (aldre, vandkemi og potentialekort). Det samme gælder data fra tidsperioder med ændrede

¹ Vandressourceforvalteren er den myndighed som har ansvar for at udbyde en hydrologisk kortlægningsopgave (stat, region, kommune, vandforsyning mv.)

klima-, indvindings- og arealanvendelse i forhold til kalibreringsperioden, såfremt sådanne data foreligger. Modellens gyldighed og valideringsstatus skal beskrives med angivelse af dens dokumenterede anvendelsesmuligheder og dens begrænsninger (beskrivelsen skal være specifik).

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. Mere konkret betyder det, at 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 (bløde) kriterier. Benyttes en stationær strømningsmodel, bør det overvejes at kalibrere den for dynamiske situationer for bedre at kunne validere modellen.
7. Dokumentation af modeljobbet skal sikre *gennemskuelighed* mht. de anvendte metoder og tilgrundliggende antagelser fra alle interesserede parter. Endvidere skal de dominerende usikkerhedskilder angives, og betydning for modelresultater klart fremgå.
8. Der skal ske en dokumentation så modellen er *reproducerbar*. Dette er nødvendigt for at tredjemand på et senere tidspunkt kan foretage en gennemgang af modellen for vurdering af dennes kvalitet (post-audit mod nye data), eller udføre nye scenarie simuleringer samt ved opdatering af modellen eller af modeller for tilgrænsende områder.

4. God modelleringspraksis - vejledning

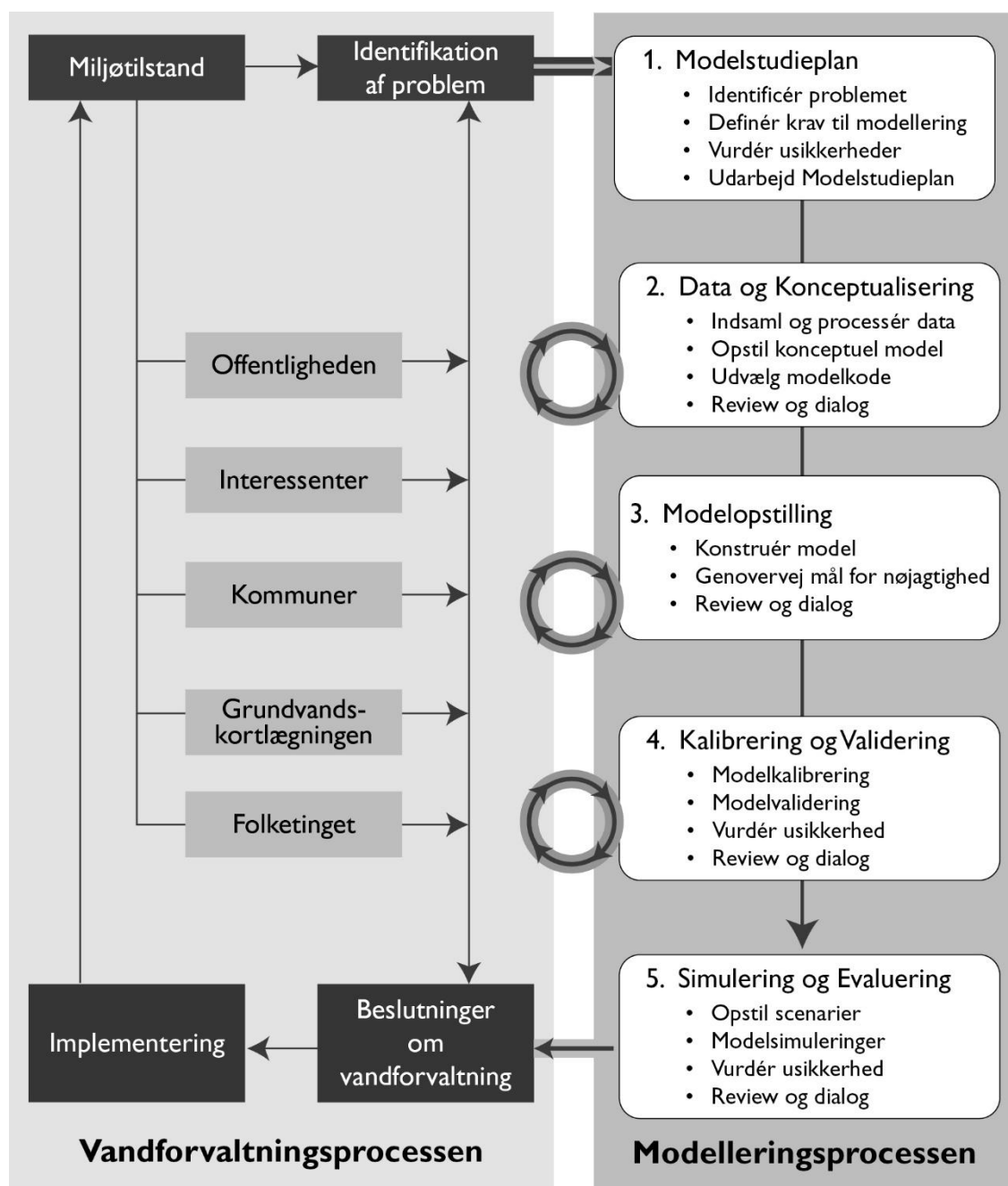
4.1 Aktørerne og de fem trin i modelleringsprocessen

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.
- *Modellør*, som er ansvarlig for den tekniske gennemførelse af den givne modelleringsopgave. Modelløren er ofte fra et rådgivende firma.
- *Reviewer* er en person som gennemfører et eksternt review af modelleringsstudiet. Revieweren skal have forståelse for opgavens formål, indsigt og erfaring med modellering. 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 landbrug, vandselskaber og miljøorganisationer. En interessent kan vælge at lade sig bistå af en rådgiver.

Modelleringsproces kan opdeles i følgende fem trin (Figur 2):

- *TRIN 1: Model studieplan.* 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. 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. 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: Model opstilling.* Det indebærer at transformere den konceptuelle model til en numerisk model ved hjælp af den valgte model kode. Det kræver ofte omfattende data håndteringsopgaver. 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 2: 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 med fremhævelse af de anvendelsesområder, hvor modellen er dokumenteret via tests at kunne opnå en given nøjagtighed, og de områder, 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.

Bemærk at de sidste fire Trin afsluttes med en rapportering og et eksternt review samt en dialog (møde) mellem Vandressoruceforvalteren, 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. Endvidere er angivet, hvilke aktører der er hovedansvarlige for de forskellige opgaver. Endelig er der konkrete henvisninger til yderligere vejledning, afsnittene 5.1 – 5.15, 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.

Et væsentligt element i 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 feltdata som fx trykniveauer og koncentrationer i grundvandsmagasinerne eller vandføringer. I sådanne tilfælde aktiveres feed-back loops. 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 en kontrakt. I den forbindelse kan det være en god ide at indbygge en mulighed for tilkøbsydelse i kontrakten med Modelløren.

4.2 Trin 1 – Model studieplan

Tabel 1 Opgaver under Trin 1. Håndbog refererer til Sonnenborg og Henriksen (2005).

Opgave	Typiske aktiviteter	Ansvarlige	Vejledningsmateriale
1.1 Beskriv problemstilling 1.2 Definer formål 1.3 Identificer data tilgængelighed	- Hvad er de samfundsmæssige rammebetingelser? - Hvor kompliceret er geologien – kan der forventes problemer? - Hvor kompliceret er vandudvekslingen til overfladevand – kan der forventes problemer? - Hvor store interesser står der på spil? - Er modelanvendelse en god ide i den konkrete sag? Hvorfor? - Ønsker til tidlig og rumlig diskretisering - Beskrivelse af området - Udarbejd interessant involverings plan, foretag interessant analyse - Udarbejd kommunikationsstrategi - Beskriv opgavens formål - Hvilke spørgsmål skal modelstudiet svare på? - Hvilke anvendelser (scenarier) skal modellen bruges til? - Opstil et foreløbigt budget - Lav en oversigt over de nødvendige data (systemdata, procesparametre, initial- og randbetingelser, tidsserier, scenarie data, data til kalibrering af statisk eller dynamisk model)	Vandresourceforvalter	- Håndbog Kapitel 2 Afsnit 5.1 Afsnit 5.11 Afsnit 5.15
1.4 Specifikationer til modelleringen	- Hvad er kravene til usikkerhed af modellen? Hvor nøjagtige skal resultaterne være? - Indledende specifikation af nøjagtighedskriterier - Vurder interessenterne ekspertise og ønsker - Revurder budgettet - Krav til kommunikation, rapportering og dokumentation - Krav til modelanvendelser - Interessenterne synspunkter om model specifikationerne - Vurder de væsentligste usikkerhedskilder og deres betydning	Vandresourceforvalter + Interessenter	Afsnit 5.5 Afsnit 5.7 Afsnit 5.13 Afsnit 5.14
1.5 Udarbejd udbudsbetingelser	Lav dokumenterne til udbud	Vandresourceforvalter	
1.6 Tilbudsgivning 1.7 Kontraktforhandlinger	- Inviter rådgivere til at give tilbud (Vandressourceforvalter) - Lav tilbud (Rådgiver) - Udvælg det bedste tilbud og identificer nødvendige ændringer til kontraktforhandlinger - Bliv enige om teknisk indhold og budget - Kvalitetssikringsplan	Vandresourceforvalter + Modellør + Reviewer	

4.3 Trin 2 – Data og konceptualisering

Tabel 2 Opgaver under Trin 2. Håndbog referer til Sonnenborg og Henriksen (2005).

Opgave	Typiske aktiviteter	Ansvarlige	Vejledningsmateriale
2.1 Beskriv system og data tilgængelighed 2.2 Indsaml og processer rådata 2.3 Er der tilstrækkelige data?	- Hvilke processer skal med i modellen og hvilke datakrav har de? (er det et urbant område?) - Hvilke data kræves for at vurdere model outputs? - Vurder data tilgængelighed - Indsaml, processer og evaluer de nødvendige rådata - Vurder om der er tilstrækkelige data til at gennemføre modelstudiet med de specificerede formål (både input data og data til kalibrering og validering) - Indgår der en eller flere eksisterende modeller der skal genanvendes?	Modellør	Afsnit 5.11 Afsnit 5.12 Afsnit 5.15
2.4 Model struktur og processer 2.5 Modelparametre 2.6 Resumer konceptuel model og forudsætninger 2.7 Behov for alternative konceptuelle modeller	- Analyser systemet (fysisk udstrækning, vandbalance, rumlig og tidslig diskretisering, systemets dynamik, randbetingelser, mv.) - Opstil geologisk forståelsesmodel - Opstil hydrologisk forståelsesmodel - Opstil rumlig geologisk/hydrostratigrafisk model - Vurder hvilke parametre der med fordel kan fastsættes ved kalibrering hhv. ved brug af standard- eller litteraturværdier - Hvordan skal parametrene tilknyttes strukturelle elementer (zonering, mv.) - Beskriv den konceptuelle model med tekst og figurer - Vurder om der er så stor usikkerhed på den konceptuelle model at der er behov for at opstille alternative konceptuelle elementer	Modellør	- Jørgensen et al. (2008) - Håndbog Kapitel 4, 7, 8, 10 Afsnit 5.2 Afsnit 5.3 Afsnit 5.12
2.8 Processer model struktur data	- Opstil hydrostratigrafisk model - Processering af øvrige data	Modellør	Jørgensen et al. (2008)
2.9 Vurder troværdighed af konceptualiseringen (intern KS)	- Giver den konceptuelle model mening? Er den konsistent med alle data? - Kan formålene med modelstudiet forventes opnået med den konceptuelle model? - Indeholder den konceptuelle model spekulative elementer?	Modellør	Afsnit 5.2
2.10 Vælg model kode (software)	- Vurder hvilke mulige koder (softwareprogrammer) der er velegnede til denne opgave - Check hvorvidt koden er verificeret (testet og dokumenteret) til den type opgaver den skal bruges til her - Vurder hvilken support som kodeudvikleren/leverandøren kan give - Vælg den kode der skal benyttes	Modellør	
2.11 Rapportering	- Rapportering af Trin 2 aktiviteter - Reviderede planer for Trin 3 aktiviteter	Modellør	Afsnit 5.10
2.12 Review	- Eksternt review - Beslutninger af på hvilke betingelser Trin 2 kan godkendes - Revurdering af opgave plan for Trin 3	Reviewer + Vandressourceforvalter + Modellør	- Håndbog Kapitel 23 Afsnit 5.4

4.4 Trin 3 – Model opstilling

Tabel 3 Opgaver under Trin 3. Håndbog referer til Sonnenborg og Henriksen (2005).

Opgave	Typiske aktiviteter	Ansvarlige	Vejledningsmateriale
3.1 Opstil model 3.2 Gennemfør de første testkørsler	• Processer alle input data til det format den valgte model kode kræver og med den valgte diskretisering i tid og rum • Lav en log til modelkørsler • Få modellen til at køre uden numeriske problemer med alle data • Kontroller via simple testkørsler at der tilsyneladende ikke er grove fejl i modelsetuppet	Modellør	• Afsnit 5.11 • Afsnit 5.12
3.3 Specificer og opdater kalibrerings- og valideringsmål og nøjagtighedskriterier	• Revurder nøjagtighedskravene (opgave 1.4) – er de realistiske? • Vurder mængde og kvalitet af observationsdata • Udarbejd en detaljeret plan for kalibrering og validering med nøjagtighedskriterier og grænser for målopfyldelse	Modellør	• Afsnit 5.5
3.4 Rapportering	• Rapportering af Trin 3 aktiviteter • Reviderede planer for Trin 4 aktiviteter	Modellør	• Afsnit 5.10
3.5 Review	• Eksternt review • Beslutninger af på hvilke betingelser Trin 3 kan godkendes • Revurdering af opgave plan for Trin 4	Reviewer + Vandressourceforvalter + Modellør	• Afsnit 5.4

4.5 Trin 4 – Kalibrering og validering

Tabel 4 Opgaver under Trin 4. Håndbog referer til Sonnenborg og Henriksen (2005).

Opgave	Typiske aktiviteter	Ansvarlige	Vejledningsmateriale
4.1 Kalibreringsstrategi 4.2 Vælg kalibreringsmetode 4.3 Definer stopkriterium 4.4 Udvælg kalibreringsparametre 4.5 Parameter estimering 4.6 Er kalibreringen afsluttet?	• Processer kalibreringsdata • Udarbejd detaljeret kalibreringsstrategi • Vælg objektivfunktion • Vælg optimeringsmetode og værktøj • Fastsæt stopkriterier • Udvælg kalibreringsparametre • Sensitivitetsanalyse • Gennemfør kalibrering • Er kalibreringen OK og parametrene troværdige?	Modellør	• Håndbog Kapitel 13+14 • Afsnit 5.6
4.7 Vurder troværdigheden af kalibreringen	• Er modelresultaterne i overensstemmelse med det forventede? • Er parameterværdierne indenfor anbefalinger? • Indeholder modellen spekulative elementer? • Skal nogle af de alternative konceptuelle modeller forkastes? • Er mindst en af de geologiske modeller tilstrækkelig?	Modellør	• Håndbog Afsnit 14.8
4.8 Model validering	• Lav en plan for valideringstests • Gennemfør valideringstest	Modellør	• Håndbog Kapitel 15 • Afsnit 5.8
4.9 Vurder troværdigheden af valideringen (intern KS)	• Giver testresultaterne mening? • Er modelsimuleringerne som forventet? • Skal nogle af de alternative konceptuelle modeller forkastes? • Er mindst en af de geologiske modeller tilstrækkelig?	Modellør	
4.10 Usikkerhedsanalyse af kalibrering og validering	• Usikkerhed på inputdata, randbetingelser og parameterværdier • Usikkerheder på modelstruktur • Usikkerhed på planlagt modelanvendelse	Modellør	• Håndbog Kapitel 19 • Afsnit 5.7
4.11 Modellens dokumenterede anvendelsesområde	• Hvad er modellens dokumenterede anvendelsesområde? • Hvor kan modellen måske anvendes, selv om det ikke er dokumenteret med valideringstest? • Hvad kan modellen ikke anvendes til?	Modellør	• Håndbog Kapitel 16 • Afsnit 5.9
4.12 Rapportering	• Rapportering af Trin 4 aktiviteter • Reviderede planer for Trin 5 aktiviteter	Modellør	• Afsnit 5.10
4.13 Review	• Eksternt review • Beslutninger af på hvilke betingelser Trin 4 kan godkendes • Revurdering af opgave plan for Trin 5	Reviewer + Vandressourceforvalter + Modellør	• Håndbog Kapitel 23 • Afsnit 5.4

4.6 Trin 5 – Simulering og evaluering

Tabel 5 Opgaver under Trin 5. Håndbog refererer til Sonnenborg og Henriksen (2005).)

Opgave	Typiske aktiviteter	Ansvarlige	Vejledningsmateriale
5.1 Opstil scenarier	• Omsæt specifikationerne til modelanvendelse (Opgave 1.4) til ændringer i model-setup • Vurder om modellens setup er tilstrækkelig til beskrivelse af de ønskede anvendelser • Processer scenarie data til brug i model kørsler	Vandres-sourceforvalter + Interessenter + Modellør	
5.2 Simuleringer	• Lav model kørsler (fx indvindingsoplande og grundvandsdanelse mv) • Check om beregningsresultaterne indeholder uventede resultater eller numeriske fejl • Analyser resultaterne og vurder om de svarer på de spørgsmål de skal	Modellør	• Afsnit 5.13 • Afsnit 5.14
5.3 Check simuleringer			
5.4 Analyser og fortolk resultaterne			
5.5 Vurder troværdigheden af simuleringerne (intern KS)	• Giver simuleringresultaterne mening? • Er resultaterne tilstrækkelige?	Modellør	
5.6 Usikkerhedsanalyse af simuleringer	• Usikkerhed på inputdata, randbetingelser og parameterværdier • Usikkerheder på modelstruktur • Usikkerhed på scenarie data	Modellør	• Afsnit 5.7
5.7 Er scenarieberegninger afsluttede?	• Er modelkørslerne gennemført så de der kan svares på de spørgsmål der skal besvares i henhold til opgaven (Opgave 1.4)?	Modellør	
5.8 Rapportering	• Rapportering af Trin 5 aktiviteter	Modellør	• Afsnit 5.10
5.9 Review	• Eksternt review • Beslutninger af på hvilke betingelser Trin 5 kan godkendes	Reviewer + Vandressourceforvalter + Modellør	• Håndbog Kapitel 23 • Afsnit 5.4
5.10 Er der behov for post audit?	• 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 være især være ønskelig, hvis usikkerhederne på modelsimuleringerne er store på områder som er kritiske for den beslutning der skal tages	Vandres-sourceforvalter + Interessenter	• Afsnit 5.15
5.11 Lukning af opgaven	• Sikre at resultater er arkiverede, bl.a. i www.geus.dk/modeldb • Sikre at resultater og værktøj er overført til ordregiver eller interessenter, hvis det er aftalt • Sikre evt. service hvis modelløren overføres til ordregiver eller interessenter, hvis det er aftalt	MC + Modellør + Interessenter	

4.7 Nødvendige rammebetingelser

Som det fremgår af de foregående afsnit i Kapitel 4 er hydrologiske 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, som er afhængige af mellemresultaterne undervejs. 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 modelleringsekspertise, 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 kan der være behov for en løbende vedligeholdelse eller efteruddannelse af kompetencer/viden vedr. hydrologisk modellering hos interessenter/medarbejdere der ikke arbejder med modellering i det daglige.

5. Vejledning i udvalgte opgaver

Som det fremgår af Tabellerne 1-5 henvises der for hovedparten af den konkrete vejledning til eksisterende materiale, først og fremmest Håndbog i Grundvandsmodellering (Sonnenborg og Henriksen, 2005), litteratur samt vejlednings afsnittene 5.1 – 5.15. Nedenfor følger de 15 vejledningsafsnit og anbefalinger og med henvisninger til baggrundslitteratur i hvert afsnit.

5.1 Valg af forskellige modeltyper til forskellige formål

Før modelopgaven påbegyndes, skal Vandressourceforvalteren beslutte, hvad formålene med modelstudiet er. I forbindelse med grundvandskortlægningen er grundvandsmodeller fx velegnet til at beregne indvindingsoplande, indvindings- og klimascenarier, grundvandsdannelse, grundvandets alder og grundvandets strømningsveje. Udover disse formål findes der eksempler på modellering som har fokus på vandløbspåvirkning, og påvirkning af vådområder (som følge af vandindvinding) samt stoftransport (fx punktkilder). Som en introduktion til den lidt bredere vifte af formål, er i Tabel 6 foretaget en opdeling 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.
- *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. En *Dynamisk urban hydrologisk model* er en numerisk overfladevands-grundvandsmodel, som er opstillet med særlig fokus på geologi og afstrømningsforhold i byer til at vurdere effekten af LAR og af afværge oppumpninger på grundvandsforhold (se afsnit 5.12).
- *PT*: Particle tracking model
- *AD*: Reaktiv stoftransport model, der beregner advektion, dispersion og kemiske/mikrobiologiske reaktioner.
- *Koblet hydrologisk-afløbs model*: Kobling af overfladevands-grundvandmodel og model til beregning af afstrømning i regnvandssystemer i byer, som fx en koblet MIKE SHE/MIKE URBAN.

De første tre modeltyper, som kan anvendes til beregning af vandstrømninger og trykniveauer, er anført i en rækkefølge af stigende kompleksitet (som specialiserede former for den dynamisk integrerede model, for beskrivelse af vandbalance forhold og grundvand i byer, kan fremhæves den dynamiske urbane hydrologisk model, der kan benyttes, mens koblede hydrologiske-afløbsmodeller kan benyttes til design af afløbssystemer og real-tids kontrol i bymæssige områder, hvor der er betydelig interaktion mellem det øvre grundvand og rørsystemerne). Den fjerde modeltype, PT benyttes typisk til beregning af indvindings- og grundvandsdannende oplande (se afsnit 5.13 og 5.14), 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.

Valg af ambitionsniveau

Ambitionsniveauet skal vælges så den svarer til opgavens formål. I denne Geo-Vejledning omtales fire forskellige ambitionsniveauer med følgende begreber:

- *Forskningsbaseret modellering.* En sådan modellering benyttes i situationer, hvor der ønskes udviklet nye modelleringsmetoder og/eller udnyttelse af nye datatyper. Her er der behov for en eksperimenterende tilgang samt ekstra grundig dokumentation af resultaterne. Forskningsbaseret modellering har et potentiale til, men ikke på forhånd nogen garanti for, at opnå mere nøjagtige resultater end eksisterende metoder. Eftersom tingene skal foregå på nye måder er en grundig peer review process samt involvering af slutbrugere (fx kommuner eller vandselskaber) ekstra vigtig.
- *Detailmodellering.* En sådan modellering benyttes i situationer, hvor der skal implementeres nye tiltag af stor samfundsmæssig betydning, samt i planlægningssituationer, hvor meget betydelige samfundsmæssige og/eller private interesser står på spil for en eller flere interessenter. Her benyttes state-of-the-art metoder som muliggør bedst mulig udnyttelse af eksisterende data. Ofte indsamles nye feltdata, for at sikre en ønsket høj nøjagtighed af model simuleringer.
- *Overslagsberegning.* En sådan modellering benyttes i situationer, hvor der skal planlægges nye mulige tiltag af samfundsmæssig betydning. Her benyttes simple state-of-the-art metoder, som sikrer hurtige og relativt billigere beregninger på baggrund af eksisterende data. Nøjagtighedskravene er lempeligere end ved detailmodellering.
- *Screening.* Det er det laveste ambitionsniveau, som benyttes i situationer, hvor der ønskes en grov vurdering af i hvilke tilfælde det er nødvendigt at lave mere nøjagtige beregninger.

Begreberne screening, overslagsberegning og detailmodellering svarer til ambitionsniveauerne i de projektfaser, der i anlægs- og udviklingsprojekter ofte benævnes præ-feasibility, feasibility og projektering. I grundvandskortlægningen benyttes som regel et ambitionsniveau svarende til detailmodellering.

Ambitionsniveau og datatilgængelighed

Tabel 6 indeholder de to mellemste ambitionsniveauer for nogle af de angivne opgavetyper. Valg af højere ambitionsniveau indebærer mere komplekse og derfor som regel også mere datakrævende modeller. Før starten af en modelleringsopgave er det derfor nødvendigt at vurdere, hvorvidt der er et tilstrækkeligt datagrundlag til at opfylde det ønskede ambitionsniveau. I modsat fald skal der enten indsamles flere data eller slækkes på ambitionsniveauet. En sådan vurdering bør foretages i et samarbejde mellem modelløren, vandressourceforvalteren og de vigtigste interessenter.

Ved vurderingen af, om der er tilstrækkelige data, er det vigtigt at være opmærksom på, at datatilgængeligheden ikke sætter nogen begrænsning på valget af modeltype, men kun på ambitionen om nøjagtighed. Desuden vil en mere kompleks modeltype i nogle situationer kunne give mere nøjagtige resultater, selv om der er et mangelfuldt datagrundlag. Et eksempel herpå er anvendelsen af en dynamiske model i områder uden vandføringsdata (fx Rambo, 2014). Her var det ikke muligt at kalibrere modeller mod vandføringsdata, men ved at

benytte tidsserier af pejlinger, og andre data fx kloriddata, blev modellerne alligevel testet dynamisk, hvilket øgede troværdigheden af den beregnede grundvandsdannelse, som har en afgørende indvirkning på de beregnede indvindings- og grundvandsdannende oplande.

Stationær eller dynamisk model?

Spørgsmålet om hvorvidt, der skal vælges en stationær eller en dynamisk model er vanskeligt at besvare generelt. Såfremt en opgaves formål inkluderer bestemmelse af tidsvarierende vandføringer og trykniveauer, er en dynamisk model selvfølgelig nødvendig, fordi en stationær model ikke kan levere sådanne resultater. Spørgsmålet er, hvorvidt en dynamisk model giver mere nøjagtige estimater af forhold, som en stationær model også kan beregne, som fx placeringen af et indvindingsopland. Det findes der meget få undersøgelser om. De tre væsentligste aspekter, som skal vurderes, er:

1. *Simulering af indvindingsoplande, når der benyttes samme hydrauliske parameter-værdier i stationære hhv. dynamiske modeller.* Iversen et al. (2010) gennemgik den internationale litteratur og lavede sammenligninger af partikelbanesimuleringer af tre oplande med stationært hhv. dynamisk trykniveaubilleder. De konkluderede, at afvigelserne i oplandsareal typisk udgør mindre end 10%, men i enkelte tilfælde op til 20%, og at det derfor i de fleste tilfælde er rimeligt at benytte stationære partikelbanemodeller. De store afvigelser opstod ved komplekse geologiske forhold.
2. *Bestemmelse af hydrauliske parametre i stationære, hhv. dynamiske modeller.* Sonnenborg et al. (2003) opstillede og kalibrerede en dynamisk og flere stationære modeller for Sønderjylland. De benyttede samme konceptualiseringer af geologi, vandløb og dræn (fra DK-modellen) for alle modellerne, så forskellene mellem de stationære modeller var alene, om de var kalibreret mod lave, gennemsnits eller høje vandføringer og trykniveauer. De sammenlignede resultaterne fra de stationære model med den dynamiske model og konkluderede, at i) en stationær model der kun kalibreres mod trykniveauer, men ikke vandføringer, giver markant forskellige resultater med hensyn til grundvandstrømninger; ii) en stationær model kan kun give realistiske resultater, såfremt den anvender gennemsnitlige nedsivningsdata og kalibreres mod gennemsnitlige trykniveauer og vandføringer; og iii) stationære modeller kan ikke benyttes til simulering af minimums- og maksimumsvandføringer.
3. *Konceptualisering af geologi, vandløb og dræn.* Stationære modeller indeholder ofte simplere konceptualiseringer af dræn og vandløb end dynamiske modeller, fordi der ikke er behov for simuleringer af tidsserier af vandføringer. Det kan medføre betydelige forskelle i kalibrerede parameter-værdier, specielt i moræneoplande hvor dræn og små vandløb her ofte er tørlagte i flere måneder om året. Tørlægningen, som sker når det øvre grundvandsspejl falder under niveauet for dræn/vandløbsbund, medfører ikke-lineære effekter i relationen mellem grundvandsspejl og vandløbsafstrømning. Det medfører (forsimplet sagt) et sæt parameter-værdier for en "stationær" vintersituation og et andet sæt parameter-værdier for en "stationær" sommersituation.

Dynamiske modeller er i stand til at udnytte flere af de eksisterende data som fx tidsserier med årstidsvariationer af pejlinger og vandføringer, end stationære modeller er. Det betyder også, at der findes flere data(typer) til model validering. En dynamisk model kan forekomme mere gennemskuelig, fordi den laver direkte beregninger i stedet for kritiske forudsætninger om konceptualisering af tidsvarierende forhold, som kan være vanskelige at vurdere. En stationær model kan eksempelvis ikke, i modsætning til en dynamisk model, tage hensyn til at

omfordelinger af nedbør på terrænoverfladen (overfladeafstrømning) kan påvirke grundvandsdannelsen. Det betyder alt i alt, at dynamisk model kan være mere nøjagtig end en stationær model, samt at det er nemmere at dokumentere dens gyldighedsområde ved hjælp af passende valideringstest (se afsnit 5.8). Hvis følgende tre forhold er opfyldt, vil det dog til nogle formål 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 afvigende 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, hvilket betyder, at det er problematisk at anvende stationære modeller i sådanne områder (fx moræneområder der typisk er kunstigt drænedede).
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 eller indvindingsoplande, i områder hvor udprægede år til år variationer i vandindvindingen medfører ikke stationære forhold i såvel trykniveau som vandløbspåvirkning.
3. *Stationære forhold i oplandet*. Dvs. at væsentlige forhold som fx klimatiske forhold, grundvandsindvinding og arealanvendelse ikke må udvise signifikante ændringer.

En partikelbanemodel til bestemmelse af indvindings/grundvandsdannende oplande kan således som regel godt køres som en stationær model, dvs. baseret på et stationært trykniveaubillede. Det mest kritiske er, hvorvidt den stationære partikelbanemodel er baseret på en underliggende model, der er kalibreret dynamisk. Såfremt modelparametrene er kalibreret med en stationær model, er der betydelig risiko for at de opnåede resultater er behæftet med stor usikkerhed. Som beskrevet i afsnit 5.11 er det vigtigt, at nedsivningen til den stationære model (grundvandsdannelsen) bestemmes ved hjælp af en dynamisk model (fx DK-modellen) og ikke indgår som en parameter i en kalibrering.

Andre forhold

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

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. Hvis der

tilmed er en stærk urbaniseringsgrad, kan det være påkrævet at vælge en model der adresserer den særlige urbane kompleksitet fx LAR systemer og anthropogen geologi (se 5.12).

Anbefalinger

- Før modelleringsopgaven påbegyndes bør modellør, vandressourceforvalter og interessenter i fællesskab afklare om der er tilstrækkelig data til det ønskede ambitionsniveau.
- Ved valg af modeltype bør den simplest mulige model vælges, 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 anvendelse af en stationær model er tilstrækkelig for problemstillingerne anbefales det at teste, om de to krav til linearitet og tidsskala kan opfyldes.
- Den samme modeltype bør anvendes til alle delformål i en opgave. Det vil være en fordel både økonomisk og for at sikre en god faglig sammenhæng i opgaveløsningen. Det vil i praksis sige at det formål der kræver den mest omfattende modeltype vil være specifikationssættende for en given opgave.
- I kalibreringsprocessen kan det evt. være nødvendigt at arbejde med en grovere version af modellen (fx 200x200 m i stedet for 100x100 m der anvendes til produktionskørsler), med henblik på at optimere afviklingshastighed i forhold til det nødvendige antal modelkørsler (fx automatisk kalibrering og usikkerhedsanalyser).

Referencer

Iversen CH, Troldborg L, Møller RR, Christensen S (2010) Dynamiske og stationære oplandsberegninger udført med tre semi-syntetiske modeller (Delprojekt 2 om oplande). GEUS

Rambøll (2014) Hydrologisk model for Hindsholm kortlægningsområde. Udarbejdet for Naturstyrelsens grundvandskortlægning.

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

Baggrundsliteratur

Refsgaard JC, Henriksen HJ (2004) Modelling guidelines – terminology and guiding principles. *Advances in Water Resources*, 27(1), 71-82.

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

Formål (opgavetype)		Ambitionsniveau	Modeltype	Typisk diskretisering ²	Kommentarer
Teste geologisk model		Overslagsberegning	Stationær grundvandsmodel	200 – 500 m	Evt data fra koncentrationer af CFC og andre miljøtracere
		Detailmodellering	Dynamisk integreret model		
Fastlægge indvindings/grundvandsdannende opland		Overslagsberegning	Stationær grundvandsmodel + PT	50 – 100 m	PT kan køres stationært, men modellen bør kalibreres dynamisk
		Detailmodellering	Dynamisk integreret model + PT		
Vandbalance			Dynamisk integreret model	200 – 500 m	
Grundvandsindvindings effekt på vandføring i vandløb	Hedeslette, helårsindvinding	Overslagsberegning	Analytisk eller stationær grundvandsmodel	50 – 200 m	
		Detailmodellering	Dynamisk integreret model		
	Hedeslette, markvanding				
	Moræneområde				
Grundvandsindvindings effekt på vandstand i vådområder og søer		Overslagsberegning	Stationær model	50 – 200 m	
		Detailmodellering	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. Strømningsmodel kalibreres dynamisk
	Koncentrationer af stoffer der nedbrydes i grundvandszonen		Stationær model + dynamisk AD	1 – 200 m	Dynamisk AD kildestyrke ofte nødvendig. Strømningsmodel kalibreres dynamisk. 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, Vandløb, Grundvand, Forurening		Samme modeltype som beskrevet ovenfor under oplande, vandbalance, grundvandsindvinding og stoftransport		
Grundvand i byer	Grundvandsdannelse og LAR		Dynamisk urban hydrologisk model	10 – 100 m	LAR scenarier kræver fin diskretisering
	Vandaflledning i byer		Koblet hydrologisk-afløbs model	10 – 50 m	

² Den angivne typiske diskretisering gælder referencemodel (samt alternative scenarie modeller) der benyttes til validering og produktionskørsler. I kalibreringsprocessen kan det være nødvendigt at anvende en grovere model af hensyn til projektets tids- og ressourceramme (fx en 200 m model, hvis der sigtes på en 100 m model til validerings- og produktionskørsler).

5.2 Opstilling af konceptuel model

Hvad er en konceptuel model?

En konceptuel model er en arbejdsbeskrivelse af karakteristika og dynamik i grundvandssystemet, 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, 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 parameterværdier
- 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 selve 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? Se f.eks. afsnittet om parametrisering nedenfor.

Voxel model

Geologiske modeller er traditionelt lavet som lagbaserede modeller. Det gør tolkningen lettere og medfører at den efterfølgende numeriske model bliver beregningsmæssigt hurtigere.

En alternativ måde er at benytte voxels i stedet for geologiske lag. Herved kan en større del af den heterogenitet der findes i naturen introduceres i en geologisk model. Det vil give en mere korrekt beskrivelse af vandets strømningsveje, hvilket kan have stor betydning for beregning af indvindings- og grundvandsdannende oplande. Voxels er blevet testet i forskningsprojekter (He et al., 2014b; He et al., 2015; Marker et al., 2015) som grundlag for partikelbanesimuleringer og vurderinger af betydningen af geologisk usikkerhed og heterogenitet på strømningsveje. Voxels er velegnede til at repræsentere geologisk heterogenitet, fx i en moræneforekomst. Samme grad af heterogenitetsbeskrivelse med en lagbaseret tolkning ville kræve anvendelse af et utal af lag og små linser.

Geofysiske data er i grundvandskortlægningen op til 2015 primært blevet benyttet til at identificere laggrænser, hvorimod information om geologisk heterogenitet indenfor lag oftest negligeres. Med anvendelse af voxels er det muligt direkte at udnytte information om geologisk heterogenitet fra geofysiske data. Stokastiske geologiske metoder som TProGS (He et al., 2014a) og Multipoint-statistics (He et al., 2014b), som ofte anvendes i vurderinger af geologisk usikkerhed, benytter voxels.

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 moræneleret, 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-dimensional 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 parameterværdier i alle modelgrids. Det ville resultere i tusindvis af forskellige parameterværdier, som vi aldrig vil kunne fremskaffe feltdata til at estimere. For at undgå overparametrisering er det derfor nødvendigt at opdele modeldomæner i strukturelle elementer, indenfor hvilke parameterværdierne 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 parameterværdier, der kan fastlægges ud fra feltdata eller erfaringsværdier, 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 parameterværdier med tilstrækkelig nøjagtighed. Nye kalibreringsmetode med anvendelse af pilot points og regularisering åbner dog for introduktion af væsentlig flere parameterværdier og dermed en større grad af heterogenitet – se afsnit 5.6 om kalibrering.

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. Vandløb kan også visse steder udgøre en randbetingelse, som dog kan være problematisk, hvis der i dybere-liggende geologiske lag kan strømme vand på tværs af vandløbet. Hvis sådanne randbetingelser ikke kan opnås i umiddelbar nærhed af interesseområdet, kan det være nødvendigt at flytte randen længere væk, så indflydelsen af evt. unøjagtige randbetingelser reduceres. Randbetingelser er specielt 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.

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.

Test af den konceptuelle model – benyt vandkemi og aldersdateringer

En konceptuel model skal testes (Refsgaard og Henriksen (2004) benytter terminologien ”confirmation of conceptual model”). Eftersom en konceptuel model er kvalitativ kan den, i

modsætning til en kvantitativ numerisk model, ikke udsættes for valideringstest som beskrevet i afsnit 5.8. Den mest oplagte metode til test af en konceptuel model er at få andre eksperter vurderinger, dvs. ved internt og eksternt review. En anden god metode er at sammenholde den konceptuelle model med data for vandkemi aldersdateringer. Hvis de data er konsistente med den konceptuelle model giver det et positivt test. Hvis vandkemi og aldersdateringer derimod er i modstrid med den konceptuelle model, bør den konceptuelle model genovervejes. Såfremt den konceptuelle model i et sådant tilfælde ikke revideres, så den bliver konsistent med data, skal det fremhæves i rapporten, og det skal vurderes i hvilket omfang fejlen på den konceptuelle model kan forårsage usikkerhed på modelberegningerne.

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

- Den geologiske modellering og den hydrologiske modellering bør gennemføres i samme opgave, hvor der sikres mulighed for feedback fra den hydrologiske model til den geologiske model. Såfremt geologisk og hydrologisk modellering foretages i to særskilte opgaver, skal der sikres mulighed for at revidere den geologiske model efter feedback fra den hydrologiske model.
- Det vurderes, om den konceptuelle model skal baseres på en voxel baseret geologisk tolkning.
- 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 mindre modeller bør det overvejes at benytte randbetingelser genereret af en regional model.
- Den konceptuelle model bør vurderes i review og testes mod tilgængelige data for vandkemi og aldersdateringer.
- Modellørens forståelse af det hydrogeologiske system inkl. strømningsveje og vandbalancer i området bør beskrives som et vigtigt led i den konceptuelle model.

Referencer

He X, Koch J, Sonnenborg TO, Jørgensen F, Schamper C, Refsgaard JC (2014a) Transition probability based stochastic geological modeling using airborne geophysical data and borehole data. *Water Resources Research*, 50, 4, 3147-3169, WR014593.

- He X, Sonnenborg TO, Jørgensen F, Jensen KH (2014b) The effect of training images and secondary data integration with multiple-point geostatistics in groundwater modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(8), 2943-2954.
- He X, Højberg AL, Jørgensen F, Refsgaard JC (2015) Assessing hydrological model predicting uncertainty using stochastically generated geological models. *Hydrological Processes*, 29(19), 4293-4311.
- 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.
- 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.
- Marker PA, Foged N, He X, Christiansen AV, Refsgaard JC, Auken E, Bauer-Gottwein P (2015) Performance evaluation of groundwater model hydrostratigraphy from airborne electromagnetic data and lithological borehole logs. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 3875-3890.
- Refsgaard JC, Henriksen HJ (2004) Modelling guidelines – terminology and guiding principles. *Advances in Water Resources*, 27(1), 71-82.
- Sonnenborg TO, Henriksen HJ (2005) Håndbog i Grundvandsmodellering. GEUS rapport 2005/80, 305 sider.

Baggrundsliteratur

- 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.

5.3 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 model-usikkerheder i forhold til observationsdatas tæthed og kvalitet og i forhold til forventet effekt på modellens resultat.

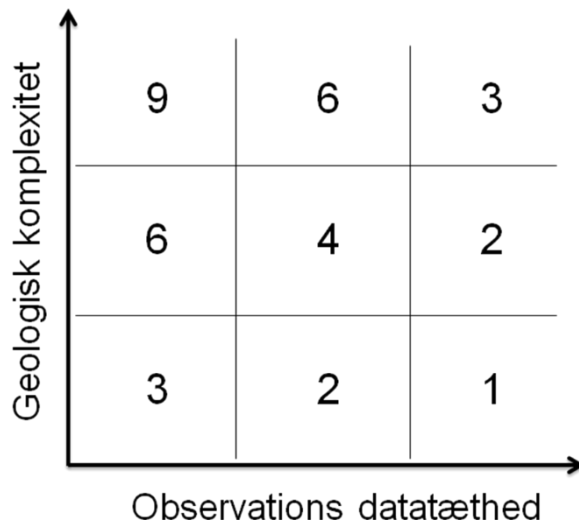
Usikkerhedsvurdering af delelementer i den konceptuelle model

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 3.

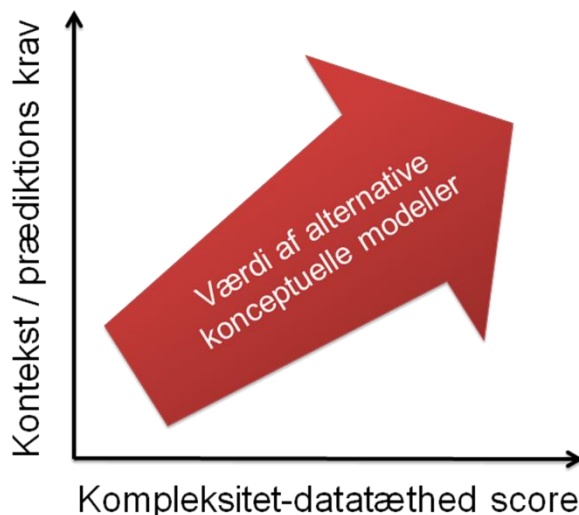
Anden del af usikkerhedsvurderingen har til formål at afdække behovet for alternative konceptuelle modeller. I modelleringskonteksten handler det om, hvor robust en beslutning, der skal træffes, er over for usikkerhed på konceptuel model, og hvor meget står der på spil - hvad er risikovilligheden? Afhængigt af hvilke krav der stilles til prædiktionssevne, og i hvor høj grad modellen skal bruges udenfor kalibreringskontekst, vil betydningen af usikkerhed på den konceptuelle model og manglende observationsdata være styrende for behovet for alternative konceptuelle modeller figur 4.

Betydningen af konceptuel og geologisk usikkerhed

Erfaringerne fra en række forskningsprojekter viser, at usikkerheden forbundet med den konceptuelle model i nogen grad kan undertrykkes af kontekstspecifik kalibrering (Harrar et al., 2003; Højberg and Refsgaard, 2005; Trolborg et al., 2007; Seifert et al., 2012; Refsgaard et al., 2012; Sonnenborg et al., 2015). 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 seks forskellige geologiske modeller af et område omkring de store kildepladser ved Lejre nogenlunde ens resultater, når det drejer sig om simulering af vandføringer og grundvandstrykniveauer for samme indvindingsniveau som i kalibreringssituationen, mens de samme seks modeller giver vidt forskellige resultater for prædiktion af påvirkninger fra ændringer i vandindvinding samt for bestemmelse af indvindings- og grundvandsdannende oplande. Resultaterne tyder på at den geologiske usikkerhed som regel er den dominerende usikkerhedskilde når det drejer sig om bestemmelse af indvindings- og grundvandsdannende oplande (Refsgaard et al., 2012; Sonnenborg et al., 2015).



Figur 3 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 indenfor den kontekst, hvori modellens prædiktioner skal anvendes. Scoren anvendes i anden del af usikkerhedsvurderingen.



Figur 4 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 3.

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, input data 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.

Betydningen af geologisk usikkerhed kan undersøges på mange måder. Afhængig af ambitionsniveau, og de dertil hørende ressourcer, kan en af følgende tre metoder benyttes:

- a) *Følsomhedsanalyser med varianter af geologiske modeller (lavt ambitionsniveau).* Her benyttes én geologisk model, hvor der laves nogle variationer i lokalområder, hvor der er størst tvivl om den geologiske tolkning. Det kan fx dreje sig om ændringer af begravede dale (bredde, dybde, fyld, forløb) eller "vinduer" mellem akvifer lag. Resultatet er én geologisk referencemodel og fx 3-4 varianter.
- b) *Usikkerhedsanalyser med flere alternative, manuelt tolkede geologiske modeller (mellem ambitionsniveau).* Her udvikles flere (fx 3-4) ligeværdige geologiske modeller. De valgte geologiske modeller skal alle være plausible, og de skal være så forskellige, at de tilsammen bedst muligt udspænder udfaldsrummet af plausible geologiske modeller. Geologiske modeller fra GEUS' modeldatabase, herunder den Nationale Vandressource Model, kan evt. benyttes som nogle af de alternative modeller. Resultatet er 3-4 geologiske modeller, som er indbyrdes mere forskellige end varianterne under a).
- c) *Usikkerhedsanalyser med stokastiske geologiske modeller (højt ambitionsniveau).* Her genereres et antal mulige geologiske modeller ved hjælp af stokastiske geologiske værktøjer som fx TProGS (He et al., 2014a) eller Multipoint-statistics (He et al., 2014b). Resultatet er et stort antal (fx 10 eller 100) plausible geologiske modeller, som erfaringsmæssigt har en større indbyrdes variation end de manuelt tolkede modeller (Trolborg, 2004).

For hver af de geologiske modeller under a), b) og c) skal den hydrologiske model kalibreres (He et al., 2015). Eftersom kalibreringen af den hydrologiske model kan automatiseres, ligger den største ekstra arbejdsmængde i selve formuleringen af flere geologiske modeller. Ambitionsniveauet afspejler, hvor stor en del af den geologiske usikkerhed, der er sandsynlighed for at belyse med den pågældende metode. Hvis vi forestiller os, at de mulige geologiske tolkninger (vi kender ikke den sande tolkning) svarer til en fodboldbane, gælder det om, at de geologiske modeller er spredt så meget som muligt inden for banen. Her vil følsomhedsanalysen a) svare til nogle punkter med forholdsvis kort indbyrdes afstand et sted på banen, mens de manuelt tolkede, og i endnu højere grad de stokastisk genererede, geologier vil sprede sig over større dele af banen. Der vil således være en tendens til at de simple følsomhedsanalyser underestimerer betydningen af den geologiske usikkerhed, mens de stokastiske geologiske modeller vil kunne fange mere (men ikke al) geologisk usikkerhed.

Anvendelse af flere manuelt tolkede geologiske modeller (ambitionsniveau b) kan gennemføres med den eksisterende viden blandt rådgivere i dag. Der vil dog være behov for at vurdere, hvorledes resultater skal præsenteres (et kort/flere kort, usikkerhedsbånd, mv.) og anvendes administrativt. Anvendelse af stokastiske metoder (ambitionsniveau c) er mere kompliceret end de hidtil anvendte stokastiske metoder, hvor parameterusikkerhed er blevet analyseret. Der findes betydelig viden i forskningsinstitutionerne og hos enkelte rådgivere, så der er mulighed for at afprøve metoden og opnå erfaringer. Men der vil formentlig være behov for erfaringsopsamling og vejledning, før metoden er parat til anvendelse som standard i alle opgaver.

Anbefalinger

- Der bør gennemføres en usikkerhedsvurdering af delelementer i den konceptuelle model for at overveje dens svagheder i forhold til prædiktionskrav, så det kan afklares, om/hvordan der skal udvikles alternative konceptuelle modeller.
- Betydningen af væsentlige usikkerheder omkring randbetingelser, inputdata, processligninger og lignende (se afsnit 5.2) bør i forbindelse med modelopstilling og –kalibrering undersøges ved følsomhedsanalyser, fx ved at sammenligne to modelkørsler med to forskellige randbetingelser. Såfremt modellen er meget følsom overfor nogle af disse usikkerhedskilder, bør de indgå som en alternativ konceptuel model.
- Den geologiske usikkerhed skal inddrages ved vurderinger af usikkerhed på indvindings- og grundvandsdannende oplande. Det bør gøres ved mindst at vælge ambitionsniveau b) med opstilling af flere alternative geologiske tolkninger.

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), 536–47.
- He X, Koch J, Sonnenborg TO, Jørgensen F, Schamper C, Refsgaard JC (2014a) Transition probability based stochastic geological modeling using airborne geophysical data and borehole data. *Water Resources Research*, 50, 4, 3147–3169, WR014593.
- He X, Sonnenborg TO, Jørgensen F, Jensen KH (2014b) The effect of training images and secondary data integration with multiple-point geostatistics in groundwater modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(8), 2943–2954.
- He X, Højberg AL, Jørgensen F, Refsgaard JC (2015) Assessing hydrological model predicting uncertainty using stochastically generated geological models. *Hydrological Processes*, 29(19), 4293–4311.
- Højberg AL, Refsgaard JC (2005) Model Uncertainty - Parameter uncertainty versus conceptual models. *Water Science and Technology*, 52(6), 177–186.
- 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.
- Refsgaard JC, Christensen S, Sonnenborg TO, Seifert D, Højberg AL, Trolborg L (2012) Review of strategies for handling geological uncertainty in groundwater flow and transport modelling. *Advances in Water Resources*, 36, 36–50.
- Seifert D, Sonnenborg TO, Scharling P, Hinsby K (2008) Use of alternative conceptual models to assess the impact of a buried valley on groundwater vulnerability. *Hydrogeology Journal*, 16, 659–74.
- Seifert D, Sonnenborg TO, Refsgaard JC, Højberg AL, Trolborg L (2012) Assessment of hydrological model predictive ability given multiple conceptual geological models. *Water Resources Research*, WR011149.

- Sonnenborg TO, Seifert D, Refsgaard JC (2015) Climate model uncertainty vs. conceptual geological uncertainty in hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 3891-3901.
- Troldborg L (2004) The influence of conceptual geological models on the simulation of flow and transport in Quaternary aquifer systems. PhD thesis. Geological Survey of Denmark and Greenland Report 2004/107, GEUS, Copenhagen, Denmark.
- 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.

Baggrundsliteratur

- Refsgaard JC, Henriksen HJ (2004) Modelling guidelines – terminology and guiding principles. *Advances in Water Resources*, 27(1), 71-82.
- Sonnenborg TO, Henriksen HJ (2005) Håndbog i Grundvandsmodellering. GEUS rapport 2005/80, 305 sider.

5.4 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.

Tekniske vejledninger i hydrologisk modellering er nyttige men er ikke i sig selv en garanti for god kvalitet i lighed med 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, 5, 4.9 og 5.5 (Tabellerne 2, 4 og 5). 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 modelleringstrin. Eksterne reviews er Vandressourceforvalterens sikkerhed for en god kvalitet.

Kan Vandressourceforvalteren selv gennemføre eksternt review?

Såfremt der i Vandressourceforvalterens organisation er en stærk modelleringsenhed kan Vandressourceforvalteren i princippet godt selv gennemføre eksterne reviews. For at opnå en god teknisk kvalitet og sikre state-of-the-art niveau kræver det dog, at modelleringsenheden består af flere modellører med flere års erfaring i modellering, og som i dag har hydrologisk modellering som hovedbeskæftigelse. Udover 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 kan det være 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. Det er ligeledes vigtigt at revieweren er bekendt med de stillede vilkår for modellen, da disse vilkår jo ofte har en rolle i valg af model og løsninger. 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 modellerings erfaring. 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 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 faglige 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 i størrelsesorden 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 udover 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.

Anbefalinger

- Der skal gennemføres eksterne reviews i modelleringsopgaver baseret på ovenstående principper. Som ekstern reviewer vælges en erfaren modellør, som er uafhængig af parterne i model studiet.
- 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).

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
Model appraisal: gennemføres af fagmand (ikke nødvendigvis modelleringsekspert) Peer review: gennemføres af modelekspert Model audit: gennemføres af modelekspert				

Referencer

Refsgaard JC, Henriksen HJ (2004) Modelling guidelines – terminology and guiding principles. *Advances in Water Resources*, 27(1), 71-82.

Sonnenborg TO, Henriksen HJ (2005) Håndbog i Grundvandsmodellering. GEUS rapport 2005/80, 305 sider.

Baggrundsliteratur

BDMF (2000) Protocols for Water and Environmental Modeling. Bay-Delta Modeling Forum. Ad hoc Modeling Protocols Committee. California.

- Black D, Wallbrink P, Jordan P, Waters D, Carroll C, Blackmore J (2011) Guidelines for water management modelling: Towards best-practice model application. eWater Cooperative Research Centre. Australia.
- Middlemis H (2000) Murray-Darling Basin Commission. Groundwater flow modelling guidelines. Aquaterra Consulting Pty Ltd., South Perth. Western Australia, Project no. 125.
- Pascual P, Stiber N, Sunderland E (2003) Draft guidance on the development, evaluation, and application of regulatory environmental models, US - EPA, Council for Regulatory Environmental Modeling, Washington D.C., Washington, D.C., 60 pp.
- 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.
- Scholten H, Refsgaard JC (2010) Quality assurance in model-based water management: Better modelling practices. In: Vanrolleghem PA, Modelling Aspects of Water Framework Directive Implementation Volume 1. IWA Publishing, London, UK, 1-91.

5.5 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 (Sonnenborg og Henriksen, 2005):

- Valg af kvalitative og kvantitative kriterier
- Numeriske mål for nøjagtigheden (fx talværdi for størrelsen af RMS, NSE, Fbal mv.)

Kriterier og mål vil variere fra opgave til opgave bl.a. afhængig af model, krav til nøjagtighed, områdets karakteristika (fx trykniveauvariation indenfor 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 (Refsgaard og Henriksen, 2004; Black et al., 2011; Anderson et al., 2015).

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 grundvandsskel, hydrograf- og vandstandsdynamik, forureningspåvirkning).

Udover 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

Kriterium 1 - Middelfejlen (ME). Her beskrives den generelle bias (ME) i forhold til samtlige trykniveauobservations. Selv om ME samlet set er lille, kan det dække over store positive og negative afvigelser, der opvejer hinanden. En lille værdi af ME indikerer dog om modellen 'overordnet set' "rammer trykniveauet" for modellen som helhed (for alle observationer, eller for observationer i hvert modellag). En variant af middelfejlen er den såkaldte MAE (middel absolut error) hvor den absolutte værdi af residualer benyttes. Herved sikrer man, at fx betydelige positive og negative residualer ikke "ophæver hinanden". I tilfælde hvor observationer konsekvent simuleres for højt i et område og for lavt i et andet område, kan ME være tæt på nul. MAE vil afsløre fejl af denne type og kan derfor være et vigtigt supplement til ME i vurderingen af den gennemsnitlige fejl.

Kriterium 2 – RMS. RMS, som beregnes ud fra kvadratroden på gennemsnittet af de kvadrerede residualværdier på trykniveau, er det hyppigst anvendte kriterie. Hvis middelfejlen ME = 0 vil RMS være lig standardafvigelsen på residualerne, mens den vil være større end standardafvigelsen i tilfælde hvor ME er forskellig fra nul. RMS vil altid være større end MAE, fordi store residualer (inklusive 'outliers') får relativ stor vægt på grund af kvadreringen af residualer.

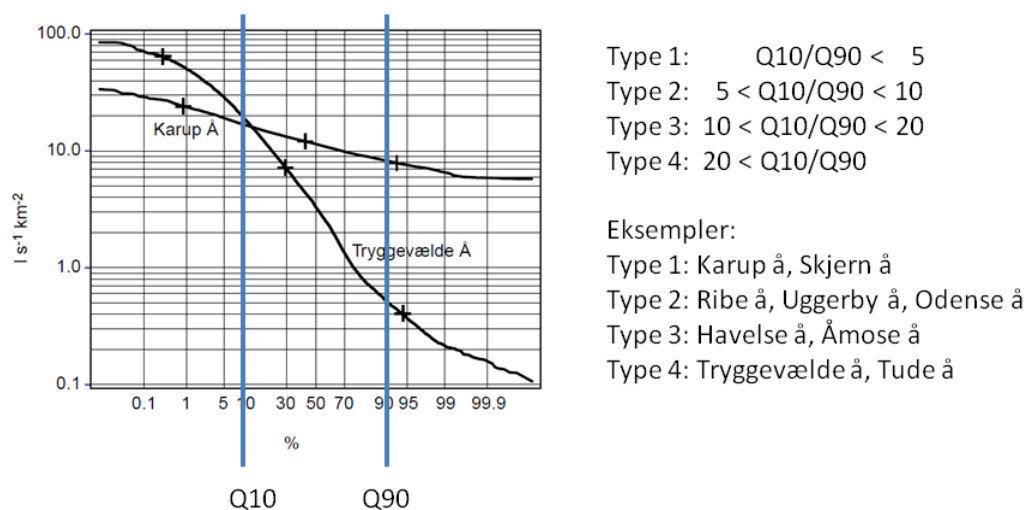
Kriterium 3 – SE. SE er et direkte mål for modellens evne til at reproducere de observerede data, med en vægtning af observationer (varierende usikkerhed på obs).

Tabel 8 Kvantitative nøjagtighedskriterier

Kriterium 1. Trykniveauekriterium med udgangspunkt i middelfejlen. Middelfejl på potentialerne (ME), relateres til den maksimale variation i de observerede potentialer indenfor de enkelte delmodeller: $ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\psi_{obsi} - \psi_{simi})$	$\frac{ ME }{\Delta h_{\max}} \leq \beta_1$
Kriterium 2. Trykniveauekriterium, der relaterer RMS til standardafvigelsen på observationerne (S_{obs}), Sonnenborg og Henriksen 2005. Kriteriet forudsætter en konkret vurdering for såvel stationær som dynamisk kørsel (idet ikke stationaritet typisk vil påvirke den samlede S_{obs}). $RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\psi_{obsi} - \psi_{simi})^2}$	$\frac{RMS}{S_{obs}} \leq \beta_2$
Kriterium 3. 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. $SE = \sqrt{\frac{1}{n-P} \sum_{i=1}^n w_i (\psi_{obsi} - \psi_{simi})^2}$ w_i er vægtningen af observationsdata nr. i og P er antallet af kalibreringsparametre. Hvis vægtene w_i specificeres til reciprokke værdi af variansen fås: $SE = \sqrt{\frac{1}{n-P} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\psi_{obsi} - \psi_{simi}}{S_{obs,i}} \right)^2}$	$SE \leq \beta_2$
Kriterium 4. Trykniveauekriterium der tager udgangspunkt i variationen i potentialerne for modelområdet ($\Delta h_{\max}$). RMS, se Kriterium 2.	$\frac{RMS}{\Delta h_{\max}} \leq \beta_3$
Kriterium 5. Vandføringskriterium der udtrykker modellens evne til at simulere dynamikken i afstrømning baseret på NSE-værdien (Nash and Sutcliffe, 1970). Højere NSE værdi kan forventes fra store oplande med stor årstidsvariation i vandføring (variation fastlægges ud fra Q10/Q90). $NSE = \frac{\sum (\psi_{obs} - \bar{\psi}_{obs})^2 - \sum (\psi_{obs} - \psi_{sim})^2}{\sum (\psi_{obs} - \bar{\psi}_{obs})^2}$ Der kan evt. anvendes NSE_{iQ} beregnet på invers transformeret flow ($= 1/(Q_i + \epsilon)$) i stedet for NSE på Q_i. I såfald er det nødvendigt at fastsætte en ϵ, dvs. en lille størrelse, der tillægges så man undgår at dividere med 0 hvis vandløb er tørlagte i sommerperioden (kan fx vælges som 1/100 af Q_{mid}; Pushpalatha, 2012). Kan anvendes ved studier der har fokus på baseflow og påvirkning af baseflow som følge af vandindvinding (da der ikke er ret mange erfaringer med dette indeks er der ikke opstillet kravværdier til NSE_{iQ} i tabel 10)	$NSE = f(Q_{var}) < \beta_4$ (~ 4 typer defineret af variation i afstrømnings-regime $Q_{var}=Q_{10}/Q_{90}$)
Kriterium 6. Vandbalancekriterium baseret på vandbalancefejlen på middelvandføringen. $Fbal = 100 \frac{\bar{Q}_o - \bar{Q}_s}{\bar{Q}_o}$	$ Fbal = f(Q_{mid}) < \beta_5$ (~ 4 typer defineret af middelvandføringens størrelse Q_{mid})
Kriterium 7. Vandbalancekriterium baseret på vandbalancefejlen på sommervandføringen. Svarer til Fbal jf. kriterium 5, men opgjort for juni-juli-august, i det følgende benævnt Fbal-S	$ Fbal = f(Q_{\min}) < \beta_6$ (~ 4 typer defineret af minimumsvandføring: $Q_{\min}$)

Kriterium 4 – RMS. Svarer til kriterium 2 blot med vurdering i forhold til trykniveauvariationer for observationsdata i modelområdet (Δh_{max}) i nævneren, i stedet for S_{obs} .

Kriterium 5 – NSE. Det såkaldte Nash-Sutcliffe kriterie (NSE), som ofte benævnes model effektivitet, er det mest anvendte kriterie til dynamiske tidsserier som fx vandføringer. I Figur 5 vist et eksempel på de fire oplandstyper, der benyttes ved fastlæggelse af NSE krav jf. variationen i vandføring over året (Q_{var}). NSE udtrykker hvor stor en del af den totale variation i observationsdata der bliver forklaret af modellen (NSE kan maksimalt blive 1). NSE kriteriet er meget afhængig af afvigelser på de store afstrømninger samt evt. vandbalancefejl. Der findes i litteraturen (Rushpalatha et al., 2012) en række varianter bl.a. log transformeret og invers transformeret flow mm. versioner af NSE, som vægter baseflow højest, som fremadrettet bør overvejes i stedet for/som supplement krav til NSE, Fbal og Fbal-S. NSE på invers flow (NSE_{IQ}) vurderes som det bedst anvendelige kriterium i forhold til baseflow og dermed grundvandsafstrømning til vandløb, fordi dette kriterium i modsætning til NSE og log-transformeret NSE ikke er følsomt overfor store afstrømninger. Der vil altid, selv med kvantitative nøjagtighedskriterier, være et væsentligt element af subjektiv vurdering, når man skal tolke opnåede resultater på nøjagtighed (ME, RMSE, NSE, Fbal osv.) i forhold til nøjagtighedskriterier (Anderson et al., 2015; Fienen, 2013).



Figur 5 Klassificering i oplandstyper (Q_{var}) i forbindelse med Kriterium 5 (NSE).

Kriterium 6 - Fbal. Fbal er et mål for afvigelsen mellem observeret og simuleret vandføring for en simuleringsperiode. Opgjort på årsværdier skelnes der mellem fire grupper af årlige middelvandføringer (Q_{mid}): a) meget små Q_{mid} (< 100 l/s eller 3 mio. m^3 pr. år), b) små Q_{mid} (100 - 500 l/s eller 3 - 15 mio. m^3 pr. år), c) mellem store Q_{mid} (500 - 2000 l/s eller 15 - 60 mio. m^3 pr. år) og d) store (> 2000 l/s eller 60 mio. m^3 pr. år).

Kriterium 7 - Fbal-S. Ved sommerværdier af vandbalancen skelnes der mellem fire grupper (Q_{min} ~ 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 Valg af kvantitative nøjagtighedskriterier afhængigt af modelformål (parentes: kan evt. inddrages)

Kriterium	ME/ dh _{max}	RMS/ S _{obs} eller SE ¹⁾	RMS/ dh _{max} ³⁾	NSE	F _{bal} År	F _{bal-S} , Sommer
Modelformål	1	2/3	4	5	6	7
Teste konceptuel model	X	X	(X)	X	X	X
Fastlægge indvindings-oplande og grundvandsdannende oplande	X	X	(X)		X	
Vandbalance					X	X
Grundvandsindvindings effekt på terrænnært grundvandsspejl og vandføring i vandløb ²⁾	X	X	(X)	X ⁴⁾	X	X
Diffus forurening	X	X	(X)		X	
Effekter af klimaændringer ⁴⁾	X	X	(X)	X	X	X

1): Hvis der er variabel usikkerhed på de inkluderede observationsdata (jf. S_{obs}) anvendes kriterium 4 (baseret på SE) i stedet for kriterium 3 (baseret på RMS/dh_{max}), se også Appendix A Metoder.

2): Effekt af vandindvinding på økologisk flow forudsætter at modellen er i stand til at simulere grundvands-overfladevandsinteraktionen (og terrænnært grundvandsspejl) korrekt, både før og efter ændret stresspåvirkning. Vigtigt at teste et bredt spektrum af kriterier dvs. NSE (Nash-Sutcliffe), F_{bal} og F_{bal-S}, samt kriterier i forhold til grundvandsspejl (ME/dh_{max}, RMS/S_{obs} eller SE) med særlig fokus på terrænnært grundvandsspejl. Evt. kan man supplere med variable der indgår i empiriske formler for DVFI, DFFVa og DVPI fx base flow index (BFI).

3) Kriterium 4 kan evt. anvendes men er erfaringsmæssigt sværere at opfylde end kriterium 2/3, så derfor anbefales det at analysere S_{obs} (Sonnenborg og Henriksen, 2005) og enten anvende kriterium 2 eller 3 afhængigt af om S_{obs} bør differentieres i forskellige typer observationsdata, med forskellige fejlkilder (usikkerhed).

4) Ved vurdering af baseflow kan evt. anvendes NSE beregnet for invers transformeret flow (NSE_{IQ}). Behov for flere erfaringer!

5) Effekter af klimaændringer på grundvand og hydrologi kan i sagens natur kun testes for nuværende klima og evt. historiske data. Det er vigtigt at fokusere nøjagtighedskriterier lidt afhængigt af det specifikke modelformål til fx at have fokus på nøjagtighed i forhold til simulering af terrænnært grundvandsspejl, ekstreme afstrømninger (oversvømmelser og tørke), temperatur mv. Derfor kræves der også her et bredt spektrum af nøjagtighedskriterier.

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. Forslagene er angivet som kravværdier til β_1 - β_6 for tre forskellige ambitionsniveauer. 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 modelleeringsopgave. Der foreligger efterhånden et godt grundlag for vurdering af de forskellige hjælpestørrelser og beta værdier, specielt for lidt større oplande fx fra DK model (NSE, F_{bal} og F_{bal-S}) og kortlægningsmodeller (NSE og F_{bal}).

Dynamiske modeller

De opstillede kvantitative nøjagtighedskriterier (Tabel 8) kan umiddelbart anvendes for dynamiske (transiente) modeller med den diskretisering der er valgt, fx på basis af daglige værdier for afstrømning for NSE, SE, F_{bal} og F_{bal-S} og tidsserier med trykniveau observationer ved beregning af ME og RMS. Hvis der benyttes fx uge- eller månedsværdier i en transient model, beregnes indikatorer på det grundlag. De opstillede numeriske mål for nøjagtighed nedenfor i Tabel 10 gælder for daglige vandføringer og tidsserier for trykniveau når der anvendes dynamiske modeller.

Stationære grundvandsmodeller

Når der anvendes stationære grundvandsmodeller vil der være et ekstra bidrag til usikkerheden, der skyldes at man ikke kan tage høj for sæsonvariation i trykniveau i sammenligningen af simuleret og observeret trykniveau (den usikkerhed vil indgå i vurderingen af S_{obs} og dermed nøjagtighedskriterie 2 for RMS/S_{obs}). For stationære grundvandsmodeller er det ikke muligt at vurdere F_{bal-S} , med mindre man laver en dynamisk valideringstest, og stationære grundvandsmodellers performance i forhold til simulering af grundvandsdannelse kan dermed ikke vurderes kvantitativt. I stedet kan man evt. vælge en kvalitativ nøjagtighedsvurdering, som evt. kan indbefatte en sammenligning af grundvandsudstrømning til vandløb, sammenligning af simuleret afstrømning med fx median min Q og/eller middelfastrømningen i vandløb, samt en eller anden form for tracer test (eller aldersdatering), fx baseret på partikelbanesimulering eller en anden type kvalitativ nøjagtighedsvurdering.

Eksempler på kvalitative nøjagtighedskrav anvendt til stationære modeller:

- Aldersdatering i tre borer, gradient/vandkemi/kalk og gammelt potentialebillede fra 1934, samt tættere net af pejledata fra Gammel Rye (Aarhus Vest, 17/12-2013).
- Validering mod grundvandsalder og sammenligning af parametre med Staby-Vildbjerg og Herning-Ikast (Kibæk, 1/3 2013).
- Semi kvantitativ metodik (magasinspecifikke residualer) plottet mod observeret trykniveau (Lindved, november 2011).
- Valideret i forhold til resultater af prøvepumpningsforsøg (T-værdier i 4 borer foretaget efter at kalibreringen er afsluttet i i alt 16 filtre) (Padborg-Gråsten, april 2015).

Små vandløbsoplande (5-30 km²)

Der er endnu kun i meget begrænset omfang erfaringer med NSE, F_{bal} og F_{bal-S} for små oplande (< 30 km²). Erfaringer fra DK model viser, at mens 76 % af stationerne kan leve op til krav til NSE for alle vandløb, så kan 53 % af de små stationer opfylde dette nøjagtighedskrav i DK modellens kalibreringsperiode fra 2000-2006, og for valideringsperioden 1996-1999 hvor datagrundlaget er bedst. For små vandløb < 30 km² kunne man derfor i stedet for 75 % kriteriet (jf. Tabel 10), arbejde med et lempet kriterie, der hedder, at mindst 50 % af stationerne (i stedet for 75 % af stationerne) skal opfylde kravene til NSE kriterier i Tabel 10. For små oplande (størrelsesorden ~ 10 km²) kan formentlig kun en mere begrænset del af stationerne opfylde kravene til NSE jf. Tabel 10. For meget små vandløb (~10 km²) vil man i bedste fald kunne opnå NSE værdier på 0,5 for ca. 50 % af stationerne, for en screeningsmodel (0,6 for overslags- og 0,7 for detailmodel). Det samme gælder den nøjagtighed man kan opnå for valideringsperioder efter 2006 (her kan man med DK model for valideringsperioden 2007-2010 kun opnå krav til NSE for 50 % af alle stationer). For F_{bal} er kriterier rimelige selv for små oplande, men det er vigtigt at sommervandbalancen systematisk inddrages i kortlægningsmodellerne, specielt når de anvendes til øvrige formål såsom nye indvindings-tilladelser og vandløbspåvirkning.

Det er en god ide at teste om nøjagtighedskrav fx til ME og RMS er opfyldte, ikke bare for modellen som helhed, men også for de enkelte magasiner (og modellag), og at bruge enten kriterium 2 (RMS/S_{obs}) eller 3 (SE), afhængigt af om observationsdata har samme eller forskellig usikkerhed (datakvalitet).

Tabel 10 Numeriske mål for nøjagtigheden (kravværdier til beta)

	Screening	Overslags-be-regning	Detailmodellering
Kriterium 1 β_1 (ME/dH _{max})	0,05	0,025	0,01
Kriterium 2 og 3 β_2 (RMS/S _{obs} – Se Appendix A)	2,6	2	1,65
Kriterium 4 β_3 (RMS/dH _{max})	0,1	0,05	0,025
Kriterium 5 (75 % af stationerne skal overholde kravværdien ¹⁾) β_4 (NSE) 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 $20 < Q_{10}/Q_{90}$	 0,55 0,60 0,65 0,70	 0,65 0,70 0,75 0,80	 0,75 0,80 0,85 0,90
Kriterium 6 (75 % af stationerne skal overholde kravværdien) β_5 (Fbal, år) Type 1 $Q_{mid} < 100$ l/s Type 2 $100 \text{ l/s} < Q_{mid} < 500$ l/s Type 3 $500 \text{ l/s} < Q_{mid} < 2000$ l/s Type 4 $2000 \text{ l/s} < Q_{mid}$	 40 25 15 10	 25 15 10 5	 15 10 5 3
Kriterium 7 (75 % af stationerne skal overholde kravværdien) β_6 (Fbal, sommer) Type 1 $Q_{min} < 10$ l/s Type 2 $10 \text{ l/s} < Q_{min} < 50$ l/s Type 3 $50 \text{ l/s} < Q_{min} < 200$ l/s Type 4 $200 \text{ l/s} < Q_{min}$	 80 50 30 15	 40 25 15 10	 25 15 10 5

¹⁾ NSE kriteriet er meget følsomt i forhold til kvaliteten af nedbørsinput og kan generelt ikke opfyldes efter 2007 pga. for få nedbørsstationer i DMIs klimagrid (her opfylder typisk kun 50 % af stationerne kravværdien).

Kalibrerings- og valideringsresultater for NSE (Nash-Sutcliffe) < 0,5 kan anses som "ikke tilfredsstillende" mens resultater > 0,8 anses for at være "meget gode" (Moriassi et al., 2015) for store og små oplande.

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 hjælpestørrelser, der indgår i de enkelte kriterier, vurderes nøje, fx dHmax, Sobs (Sonnenborg og Henriksen, 2005) samt hvilken klasse de enkelte vandføringslokaliteter repræsenterer jf. Qvar, Qmid og Qmin.
- Endelig vurderes hvilke numeriske mål, der skal opfyldes for de enkelte kriterier. Her kan beta værdierne i Tabel 10 benyttes som vejledning. Der skal opnås enighed om kvantitative og kvalitative nøjagtighedsmål inden kalibreringen gennemføres.
- Kriterierne må gerne være lidt ambitiøse, så ikke alle kriterier er lette at opfylde for alle magasiner, typologier og/eller delområder af modelområdet. Det er med til at gøre modelperformance vurderingen til et aktivt dialogværktøj, som kan bidrage kommunikativt i modelprocessen og gøre modellen mere gennemsigtig for slutbrugere, i forhold til hvad den kan bruges til.

Referencer

- Anderson MP, Woessner WW, Hunt RJ (2015) Applied groundwater modelling. Simulation of flow and advective transport. Second Edition. Elsevier. 535 pp.
- Black DC, Wallbrink PJ, Jordan PW, Waters D, Carroll C, Blackmore, JM (2011) Guidelines for water management modelling: towards best practice model application. eWater Cooperative Research Centre, Canberra, Australia. September. Available at: <http://www.ewater.com.au>
- Fienen MN (2013) We speak for the data. Groundwater 51(2),157. <http://dx.doi.org/10.1111/gwat.12018>
- Moriasi DN, Gitay MW, Pai N, Daghgupati P (2015) Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. Transactions of the ASABE 2015, 58, 1763-1785.
- Pushpalatha R, Perrin C, Le Moine N, Andréassian C (2012) A review of efficiency criteria for evaluating low-flow simulations. Journal of Hydrology, 420-422, 171-182
- Refsgaard, JC og Henriksen, HJ. 2004. Modelling guidelines – terminology and guiding principles. Advances in water resources, 27, 71-82.
- Sonnenborg og Henriksen, 2005. Håndbog i grundvandsmodellering. GEUS rapport 2005/80.

5.6 Modelkalibrering

Under modelkalibrering skal der træffes en række valg og anvendes forskellige teknikker, og kalibreringen er en af de vanskeligste opgaver i modelleringen. Både selve kalibreringsprocessen og de grundliggende tekniske aspekter er beskrevet i Kapitlerne 13 og 14 i Håndbog i grundvandsmodellering (Sonnenborg og Henriksen, 2005). Nærværende afsnit indeholder ikke en komplet beskrivelse af kalibreringsprocessen, men behandler enkelte elementer, som ikke er beskrevet særligt dybdegående i Sonnenborg og Henriksen (2005). Foruden håndbog i grundvandsmodellering henvises til Hill og Tiedeman (2007) samt Anderson et al. (2015) for en yderligere beskrivelse af den samlede kalibreringsproces.

Invers eller manuel kalibrering?

Invers kalibrering har en række fordele fremfor manuel kalibrering, ikke mindst fordi metoden er mere objektiv, lettere at reproducere og fordi de inverse algoritmer giver en række afledte resultater, såsom usikkerhed på de estimerede parametre. Metoden kræver dog typisk langt flere modelafviklinger end den manuelle kalibrering, og da afviklingstiden for en dynamisk model generelt er væsentlig længere end for en stationær model, har invers kalibrering historisk primært været anvendt til kalibrering af stationære modeller. Den situation har ændret sig, så invers modellering nu benyttes som standard i næsten alle modelstudier, inklusive dynamiske modeller. I nogle tilfælde kan afviklingstiden ved invers kalibrering af dynamiske modeller dog være en barriere ved udførelse af standard modelleringsopgaver med en stram tidsplan.

PEST (Doherty, 2015, 2016a,b) er det mest anvendte værktøj til invers kalibrering indenfor 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 parameterværdier er overfor startværdier. 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.

Kalibreringsparametre

De hydrogeologiske egenskaber af undergrunden varierer kontinuert i naturen. I modeller er det imidlertid ikke muligt at indbygge denne detaljegrad, og der er behov for en simplificering, eller en parameterisering, hvorved det fysiske system kan beskrives med et mindre antal parametre. En gængs metode indenfor hydrologisk-/grundvandsmodellering har været anvendelse af en zonerings, hvor undergrunden opdeles i zoner, evt. lag, hvori de hydrauliske parametre antages at være homogene. Introduceres der mange zoner vil der være mange parametre, der skal estimeres under optimeringen og det risikeres, at der matematisk ikke

findes en entydig løsning til kalibreringen (se Sonnenborg og Henriksen, 2005 for yderligere info). Anvendelse af færre parametre er med til at sikre en entydig løsning, men samtidigt mistes muligheden for at beskrive den heterogenitet, der er i det naturlige system.

En metode til at introducere flere parametre til beskrivelse af heterogenitet og samtidigt sikre en matematisk løsning er anvendelse af pilot point kombineret med regularisering (Doherty et al., 2010). Den overordnede idé ved anvendelse af pilot points er, at opnå en kontinuert variation af en parameter. Dvs. fremfor at lade parameterverdier variere mellem afgrænsede zoner tillader man en glidende variation. I praksis indføres der en række punkter i rummet (pilot points), og for hvert af disse estimeres der en parameterværdi, eksempelvis en hydraulisk ledningsevne, hvorefter der foretages en interpolation mellem punkterne. Des flere pilot points der indføres, des større mulighed er der for at kunne opløse heterogeniteten.

Med flere kalibreringsparametre risikerer man imidlertid også, at kalibreringsproblemet matematisk bliver ikke-entydigt. Dette forekommer teoretisk, når der er for mange frihedsgrader i modellen, dvs. når antallet af kalibreringsparametre overstiger antallet af observationer. En metode til at løse dette problem matematisk, er ved at indføre en regularisering, eksempelvis gennem et "penalty" led, som er baseret på ekspertviden om det pågældende system. Filosofien bag dette er, at man kun tillader en ændring i parameterværdien, hvis dette er nødvendigt. Har man eksempelvis ikke kendskab til heterogeniteten i et område, kan man som startpunkt antage, at området er homogent (alle pilot points har samme værdi), eller at alle pilot points antager en forudbestemt værdi (f.eks. baseret på målinger). Under kalibreringen tillades der kun en ændring i værdien for de enkelte pilot points, hvis det giver en tilstrækkelig forbedring af modellens performance, dvs. at kalibreringen indikerer, at der skal indføres en heterogenitet i systemet for at kunne beskrive observationerne. Man indfører således en straf (penalty) i kalibreringen, og den store udfordring ligger så i at definere denne straf, dvs. hvor meget bedre skal model performance være før der tillades en ændring i parametrene. Dette kan der findes nogle guidelines for i Doherty and Hunt (2010), men i praksis vil der være behov for trial-and-error tests.

Anvendelsen af superparametre er en anden måde til at opnå en regularisering. Den overordnede tilgang i dette er, at der ikke foretages en kalibrering af de enkelte modelparametre, men derimod af superparametre, der hver især er lineære kombinationer (vektorer) af de oprindelige modelparametre. Superparametrene sammensættes, så de vil have varierende følsomhed og derved kan rangeres, så nogle har meget stor følsomhed, mens nogle vil have meget lille følsomhed. I lighed med en standard kalibrering, kan de mest følsomme parametre udvælges til kalibreringen. På denne måde kan antallet af modelparametre reduceres drastisk. Metoden er ikke helt simpel, og man mister den fysiske mening af parametrene, da der ikke længere er en parameter for eksempelvis vandløbslækage og den hydrauliske ledningsevne af sand, men kun nogle parametre, der er kombinationer af disse. Det tillader derimod, at der kan introduceres en stor grad af heterogenitet i det fysiske system, som kan være væsentligt for at opnå en god model performance. For yderligere beskrivelse og eksempler henvises til Anderson et al. (2015); Doherty et al. (2010); Doherty and Hunt (2010).

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 5.1. 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 databearbejdning. 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 5.5 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. Under kalibrering af den seneste version af DK-modellen (DK-model2014) blev der givet en lidt højere vægt til vandløbsafstrømningerne end potentialerne og indenfor de to observationstyper blev der opstillet flere observationsgrupper, hvor der eksempelvis blev anvendt alle tre kriterier for vandføringen (kriterium 5, 6 og 7 i Tabel 8). Vægtningen mellem observationsgrupperne indenfor én datatype blev bestemt på baggrund af nogle initiale test af, hvor følsom det endelige kalibreringsresultat var overfor de tildelte vægte. For en gennemgang af observationsgrupperne og deres individuelle vægte henvises til modelrapporterne for DK-model2014, der kan downloades fra www.vandmodel.dk.

Ud over en vægtning mellem forskellige datatyper og observationsgrupper, bør en vægtning af de enkelte observationer overvejes. Teoretisk skal observationerne tildeles en vægt, der er omvendt proportionalt med usikkerheden på målingen (Hill og Tiedeman, 2007) og i Håndbog i grundvandsmodellering er der givet eksempel på hvorledes denne usikkerhed kan estimeres. Et emne, der imidlertid ikke er diskuteret er håndteringen af pejlinger foretaget i indvindingsboringer. Disse pejlinger kan ofte være vanskelige at anvende i modelkalibreringen af flere årsager, som også diskuteret i Højberg og Juhler (2011). For det første er det ikke altid registreret om pejlingerne viser en "ro" eller indvindingssituation. Sænkning i en boring under indvinding vil sjældent kunne gengives i en model pga. skala samt det tryktab der sker over filtret, og pejlinger målt under drift udelukkes generelt fra kalibreringen. For ro-vandspejl er der usikkerheder mht. hvad målingen viser, dvs. om pumpen lige er blevet slukket og reelt viser en drift situation, om vandspejlet er nået tilbage til en upåvirket situation, eller en situation derimellem. Reflekterer målingen en ro-situation kan denne anvendes i kalibreringen, hvis den aktuelle tidsserie for indvindingen er registreret og kan indlægges i modellen, så modellen informeres om, at der ikke pumpes på det pågældende tidspunkt. Dette er normalt

ikke tilfældet, og der må anvendes en middel indvinding på eksempelvis års-, måneds-, eller ugeniveau. Ved inddragelse af pejlinger fra en indvindingsboring bør der således foretages en vurdering af, hvad denne observation reelt viser, og om modellen kan forventes at repræsentere dette. Er dette ikke tilfældet kan observationen udelades, eller alternativ tildeles en lav vægt. Ved sidstnævnte bibeholdes der noget information, som kan være nyttigt eksempelvis i områder med få observationer. Ved at tildele en observation en lav vægt sikres det, at kalibreringen ikke skævvrides, da objektivfunktionen er sammensat af de vægtede residualer. Ved beregning af de ikke-vægtede performancekriterier, til sammenligning med de opstillede nøjagtighedskriterier i afsnit 5.5, kan disse observationer imidlertid have stor indflydelse. Det bør derfor overvejes, om disse observationer skal udelades ved beregning af de ikke-vægtede performancekriterier.

I objektivfunktionen indgår kvantitative størrelser, der udtrykker et mål for residualen (forskellen mellem observerede og simulerede værdier). Udover disse mål, kan det være nyttigt at inddrage ”bløde” data, dvs. data der indeholder information om systemet, men som ikke kan kvantificeres. Dette kan eksempelvis være viden om oversvømmelse, mht. hvornår de har forekommet og i hvilke områder. Er modellen i stand til at simulere oversvømmelse i de pågældende områder på de rigtige tidspunkter, er det med til at styrke troværdigheden af modellen, uden at det nødvendigvis kan kvantificeres.

Anbefalinger

- 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 5.5).
- Hvis der benyttes en stationær strømningsmodel, bør det overvejes at kalibrere den for dynamiske situationer for bedre at kunne validere modellen. Samtidigt bør parameterfølsomheden overfor forskellige konceptualiseringer af stationære modeller undersøges.
- Vægtning af data til objektivfunktionen bør afspejle opgavens formål. Der bør foretages en følsomhedsanalyse med forskellige vægtekombinationer.
- Erfaringerne med anvendelse af pilot points og regularisering i danske rådgivningsopgaver er stadig begrænset. Det anbefales, at der sker en erfaringsopsamling, når metoden har været anvendt mere bredt.

Referencer

- Anderson M, Woessner W, Hunt R (2015) Applied groundwater modeling, 2nd edition, Academic Press, 630p., ISBN, 9780120581030
- Doherty J (2015) Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models. Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia. ISBN: 978-0-9943786-0-6.
- Doherty J (2016a) PEST: Model-independent Parameter Estimation. User manual part I: Pest, Sensan and global optimisers, 6th edition. Watermark numerical computing, Brisbane, Australia. <http://www.pesthomepage.org/Home.php>
- Doherty J (2016b) PEST: Model-independent parameter estimation. User manual part II: Pest Utility Support Software, 6th edition. Watermark numerical computing, Brisbane, Australia. <http://www.pesthomepage.org/Home.php>
- Doherty JE, Fienen MN, Hunt RJ (2010) Approaches to highly parameterized inversion: Pilot-point theory, guidelines, and research directions: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5168, 36 p.
- Doherty JE, Hunt RJ (2010) Approaches to highly parameterized inversion—A guide to using PEST for groundwater-model calibration: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5169, 59 p.
- 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.
- Hill MC, Tiedeman CR (2007) Effective Groudwater Model Calibration – With Analysis of Data, Sensitivities, Predictions, and Uncertainty. John Wiley & Sons, New Jersey, ISBN: 978-0-471-77636-9
- Højberg AL, Juhler RK (2011) Preliminary analyses of network for groundwater level monitoring. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Rapport 2011/140
- Madsen H (2000) Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. Journal of Hydrology, 235, 276-288.

5.7 Usikkerhedsanalyser

Usikkerhedsanalyser er nu standard i de fleste modeljob, men erfaringerne viser, at det er et vanskeligt emne at adressere i praksis. Udfordringen er generelt ikke relateret til selve udførelsen af analyserne (Trin 5 i modelleringsprocessen, Figur 2), men i højere grad til den forudgående opgave, hvor det besluttet hvilke usikkerhedskilder, der skal fokuseres på, og hvilken metode, der skal vælges til gennemførelse af usikkerhedsvurderingerne. Alle modelopgaver er unikke og vil generelt være associeret med forskellige usikkerhedskilder, hvis betydningen vil variere fra projekt til projekt. Der er derfor ikke én metode, der kan anvendes i alle opgaver.

Den optimale usikkerhedsanalyse er en integreret del af modelopgaven, der påbegyndes 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 bør fastsættes allerede i udbudsfasen. Da de enkelte usikkerhedskilder samt deres betydning for modelresultaterne ikke er kendt fra start kan det imidlertid ikke specificeres i udbudsfasen, hvilke usikkerhedsanalyser der skal gennemføres. 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 indenfor 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. Er dette tilfældet, 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 for usikkerhedsanalysen bør fremgå af udbudsmaterialet, ligesom de mulige problemstillinger beskrives (fx placering af forurenende virksomheder). Baseret på erfaringer fra tidligere projekter, afsættes der i udbudsfasen et beløb til usikkerhedsanalysen, der reflekterer ambitionsniveauet. Det endelige budget for usikkerhedsanalysen vil dog først kunne estimeres, når det er valgt hvilke usikkerhedskilder, der skal fokuseres på. Afsættes på forhånd et fast beløb til analysen, kan der modsat være behov for genforhandling af ambitionsniveauet.

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 usikkerheds-

kilder, der optræder i forbindelse med opstilling og kalibrering af modellen. Tabel 11 indeholder eksempler på typiske usikkerhedskilder, der kan optræde i forbindelse med kortlægningsmodeller.

Samtidigt med en identificering 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. Indenfor grundvandsmodellering er de største usikkerheder ofte forbundet med udvikling af den konceptuelle model (afsnit 5.2), hvor det kun i nogle tilfælde er muligt at karakterisere usikkerheden statistisk. For de øvrige usikkerheder kan de sandsynlige værdier af ukendt størrelse vurderes, som efterfølgende kan anvendes i en følsomhedsanalyse, se også afsnit 5.3 om behov for alternative konceptuelle modeller. Under karakterisering af usikkerheden afgøres endvidere, om det er muligt at reducere usikkerheden, eksempelvis ved indsamling af yderligere data.

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 et meget vigtigt redskab. En følsomhedsanalyse er standard forud for modelkalibreringen, hvor de mest følsomme størrelser udvælges til kalibreringen. Det kan imidlertid ikke garanteres, at de parametre, der er mest følsomme mht. kalibreringsdataene, ligeledes er de parametre, der er mest betydende overfor 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 eller grundvandsdannelsen. Udførelsen af en følsomhedsanalyse er ikke begrænset til en vurdering af parameterfølsomhederne, men kan 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 modelresultaterne. Herefter udvælges "værdierne" for følsomhedsanalysen, så de repræsenterer "yderpunkter" mht. effekten på de ønskede modelresultater. I Tabel 11 er der sammen med typiske usikkerhedskilder angivet nogle eksempler på, hvorledes en usikkerhedsanalyse kan gennemføres (se også afsnit 5.3).

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

Usikkerhedskilde	Følsomhedsanalyse
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	Varier størrelsen og/eller fordelingen
Hydrauliske egenskaber	Varier parameterværdi til min. hhv. maks. af realistisk interval
Model gridopløsning	Halvér 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 0)
Markvanding	Varier indvindingsmængde til eksempelvis tilladelse eller højere for belysning af situationen i tørre år
Dræn	Varierer dybde; anvend forskellige rumlige distribueringer, fx kun i landbrugsområder vs. hele arealet

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 indenfor 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. 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).

Usikkerheder relateret til datagrundlaget kan ligeledes analyseres ved anvendelse af modelsimulering, men i praksis vurderes dette som regel i starten og vil derfor generelt være baseret på en ekspertvurdering. I nogle tilfælde vil det være muligt at indsamle ekstra data i projektets forløb, f.eks. synkron pejlerunde i eksisterende borer. I andre tilfælde er dette ikke muligt, som hvis der eksempelvis først skal etableres en ny vandføringsstation. Her bør det overvejes, om der kan inddrages andre typer data, både i forhold til udvikling af den konceptuelle model og ved kalibreringen. Dette kan eksempelvis "soft data", der indeholder kvalitativ men ikke kvantitativ information. Et eksempel herpå er oversvømmelse, hvor der mange steder er information om hvor og hvornår, der er sket oversvømmelser, uden disse observationer nødvendigvis er kvantificeret mht. udbredelse, dybde og eksakt tidspunkt.

Selvom det i mange tilfælde ikke er muligt at indsamle ekstra data indenfor en igangsat modelopgave, bør der ved vurdering af modellens usikkerheder være fokus på, hvordan den

kan reduceres ved indsamling af supplerende data. Denne vurdering bør ligeledes dokumenteres klart, så der kan tages udgangspunkt heri, forud for en eventuel opdatering af modellen.

Praktisk gennemførelse

Til en systematisk identificering, gennemgang og prioritering af usikkerhedskilderne anbefales det at anvende en usikkerhedsmatrice som eksemplet i Tabel 12 og 13.

Tabel 12 Eksempel på usikkerhedsmatrice

Kilde				Usik.grad/ dækning	Vægt	Effekt	Redu- cerbar	Kvantifi- cerbar	Tiltag	Bemærkninger
DATA	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>				
MODEL	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>				
		Rand		<i>middel</i>	<i>lille</i>	<i>lille</i>				
MANAGEMENT SCENARIER	Kode			<i>lille</i>	<i>lille</i>	<i>lille</i>				
	Politiske forhold			<i>middel</i>	<i>lille</i>	<i>lille</i>				
	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>				

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 variablen. 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 variablen (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 dialog platform. Her kan evt. også refereres til en rapport, hvor usikkerheden er beskrevet mere detaljeret.

Matricen skal ikke benyttes slavisk, hvor alle felter nødvendigvis skal udfyldes og diskuteres, men skal benyttes som et værktøj til at få et samlet overblik og sikre en diskussion så der opnås enighed om hvilke usikkerhedskilder, der skal medtages i den videre analyse. Endvi-

dere fastlægges håndteringen af usikkerhederne. Til dette kan der hentes inspiration i Sonnenborg og Henriksen (2005); Refsgaard et al. (2007) og Matott et al. (2009), men afhængig af de aktuelle forhold kan der være alternative metoder, der er mere optimale og som det besluttet at anvende.

Det anbefales, at usikkerhedsmatricen og fastlæggelse af usikkerhedsanalysen foretages i forbindelse med reviewet, der afslutter Trin 2 i modelleringsprocessen, Figur 2. På dette tidspunkt er datagrundlaget gennemgået og der er opnået en forståelse af systemet via udviklingen af den konceptuelle model. Planen for gennemførelsen bør dog efterses og evt. justeres når kalibreringen er overstået og der er opnået en større indsigt i hvor godt modellen er i stand til at repræsentere virkeligheden og hvordan den responderer til de enkelte variable og parametre inkluderet i kalibreringen.

Anbefalinger

- Udbudsmaterialet bør ikke indeholde et prædefineret valg af hvilken usikkerhedsanalyse, der skal gennemføres.
- Ambitionsniveauet for usikkerhedsanalysen vurderes i udbudsfasen, og der reserveres et beløb, der reflekterer dette. Størrelsen af beløbet må bero på erfaringer fra tidligere studier, men der kan være behov for revidering heraf når planen for gennemførelsen af usikkerhedsanalysen er fastlagt.
- På review mødet der afslutter Trin 2 i modelleringsprocessen (Figur 2) anvendes usikkerhedsmatricen til en systematisk identificering og prioritering af usikkerhedskilderne. Baseret herpå udvælges 3-5 kilder, der inddrages i usikkerhedsvurderingen og det aftales hvordan usikkerhedsanalysen skal gennemføres.
- Til vurdering af betydningen af de enkelte usikkerhedskilder gennemføres systematiske følsomhedsanalyser
- Vurderes det, at modellens usikkerhed kan reduceres ved indhentning af supplerende data, udover det der har været muligt i den pågældende opgave, bør der være en klar anbefaling for indsamling af data forud for en fremtidig opdatering.

Referencer

- Doherty JE, Hunt RJ, Tonkin MJ (2010) Approaches to highly parameterized inversion: A guide to using PEST for model-parameter and predictive-uncertainty analysis: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5211, 71 p.
- Matott LS, Babendreier JE, Purucker ST (2009), Evaluating uncertainty in integrated environmental models: A review of concepts and tools, Water Resources Research, 45, W06421, doi:10.1029/2008WR007301.
- 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.

5.8 Model validering

Definitioner og formål

Følgende terminologi fra Refsgaard and Henriksen (2004) benyttes 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 eller til simulering af andre variable end dem der er kalibreret imod. 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 til, hvorvidt der er tale om menneskeskabte ændringer (oppumpning, ændret arealanvendelse, klimaændring, mv.) i oplandet, og har ikke noget at gøre med om der anvendes en stationær eller dynamisk model.

- *Split-sample (SS) 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 (PB) 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'). Princippet kan også benyttes til at vurdere hvor god en model er til at simulere vandføringer eller trykniveauer for oplande og borer, som ikke er benyttet til kalibrering. En sådan intern validering kan laves enten, hvis der findes stationer/boringer med data for valideringsperioden, hvorfra der ikke er data i kalibreringsperioden, eller ved simpelt hen ikke at inddrage alle stationer/boringer i kalibreringen. Eftersom der ikke er behov for en model til at beskrive tilstanden i punkter med målinger, er en models nøjagtighed specielt interessant i punkter, hvor der ikke er kalibreret. Derfor er en blindtest via intern validering vigtig.

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 felldata. Performance fra 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 indenfor 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 indenfor 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 indenfor 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 Eggeslevmagle området på Vestsjælland. Fire forskellige hydrologiske modeller, baseret på fire forskellige geologiske 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.

- *Differential split-sample (DSS) 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 (ændret oppumpning): 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 grundvand-sindvindingerne 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 test data fra det opland, hvor modellen skal anvendes til sit egentlige formål. Ved at teste modellen i fx to andre oplande (eller interne valideringspunkter) 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 (eller interne valideringspunkter) benyttes kan de forskellige test resultater benyttes til at vurdere et sandsynligt interval inden for hvilket modellens nøjagtighed kan forventes at være.

Det er vigtigt at indskærpe, at principperne i de tre typer test skal tilpasses modelleringsformål og datatilgængelighed i de enkelte opgaver. De konkrete tests vil således variere fra opgave til opgave. Ofte vil det være muligt at kombinere flere tests i en samme modelkørsler.

Eksempel SS_PB_DSS_PB-DSS (intern validering i situation med ændret oppumpning): En hydrologisk model ønskes anvendt til at simulere effekten på trykniveauer som følge af ændret grundvandsoppumpning. Der findes data fra perioden 1990-2015, heriblandt vandføringsdata og trykniveauejlinger fra et antal borer med tidsserier. Oppumpningerne i området er ændret signifikant gennem perioden 2005 – 2009. I dette tilfælde kalibreres mod data fra 1992 – 1999 (1990-1991 benyttes som opvarmningsperiode) og der foretages valideringstest for to perioder 2000 – 2004 og 2010 – 2015. Ved at trække nøjagtighedskriterier ud for forskellige typer af borer er det nu muligt at lave fire forskellige tests:

- Split-sample (SS) test: Resultater for perioden 2000-2004 for borer, som indgår i kalibreringen.
- Proxy-basin (PB) test: Resultater for perioden 2000-2004 for borer, som ikke indgår i kalibreringen. Det kan fx være ny borer der ikke fandtes eller ikke blev pejlede i kalibreringsperioden.
- Differential split-sample (DSS) test: Resultater for perioden 2010-2015 for borer som indgår i kalibreringen.
- Proxy-basin, differential split-sample (PB-DSS) test: Resultater for perioden 2010-2015 for borer, som ikke indgår i kalibreringen.

Test for simulering af indvindings- og grundvandsdannende oplande

Når en hydrologisk model skal benyttes til at bestemme indvindings- og grundvandsdannende oplande er de traditionelle valideringstest rettet mod simulering af trykniveauer og vandføringer ikke tilstrækkelige. En god simulering af vandbalancen (årlig vandløbsafstrømning) er en indikator på, at den simulerede grundvandsdannelse og dermed størrelser af de grundvandsdannende oplande formentlig er nogenlunde korrekt, men det giver ingen indikation på, om oplandene er korrekt placeret. Placering og afgrænsning af indvindings- og grundvandsdannende oplande er bestemt af grundvandstrykniveauer. Men i og med at oplande bestemmes af retninger på trykniveaugradienter, er det mest anvendte nøjagtighedskriterium (kvadratroden af summen af de kvadrerede afvigelser mellem observerede og simulerede trykniveauer, RMS – Kriterium 3 Tabel 8) ikke i sig selv en tilstrækkelig indikator på, hvorvidt en model er god til at simulere et opland.

Der kan derfor være god grund til benytte mere målrettede tests. Afhængigt af det tilgængelige datamateriale kan sådanne test fx inkludere:

- Test om modellen kan simulere potentialkort fra forskellige magasiner, og om muligt fra forskellige årstider. Her skal der fokuseres på strømningsretninger, beliggenhed af grundvandsskel og retninger af gradienter over dybden.
- Test om modellen kan simulere årstidsvariationer i pejledata. Det vil fortælle noget om den årstidsafhængige dynamik beskrives godt af modellen.

- Test om modellen kan simulere pejledata og vandføringer fra stationer/boringer, der ikke er medtaget i kalibreringen, jfr. ovenstående eksempel med PB-test.

Brug af bløde data i valideringstest

Udover de sædvanlige datatyper vandføringer og trykniveauer, som anvendes til modelkalibrering, er det muligt at benytte andre datatyper som fx CFC aldre og vandkemi til validering. Sådanne data kan her betragtes som bløde³, fordi modellen typisk ikke simulerer sådanne variable og en direkte sammenligning derfor ikke umiddelbart er mulig. Ved at sammenholde de bløde data med aldre fra partikelbaneberegninger samt med data om vandtyper er det muligt at lave et "konsistenstjek" af modellen. Herved vurderes om alle de bløde data kan betragtes som værende konsistente med modellen.

Specielle forhold ved stationære grundvandsmodeller

En stationær model kan vanskeligt testes ved en split-sample test, fordi den ikke simulerer dynamiske forhold. Den kan dog simulere forskelle i gennemsnitsforhold mellem to perioder og et valg af to forskellige perioder til kalibrering og validering med hver deres gennemsnitsdata for grundvandsdannelse og vandføringer/trykniveauer være en split-sample test, selvom det er markant svagere end en tilsvarende test for en dynamisk model. Endvidere kan vandbalance og grundvandsdannelse ikke umiddelbart testes ved hjælp af vandføringsdata. Derfor er det væsentligt at gennemføre både grundige proxy-basin test for trykniveauer og test til vurdering af modellens vandbalance. Elementer i sådanne test kunne være:

- *Proxy-basin test på trykniveauer.* 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 trykniveau-dataene. Hvis data skal udnyttes optimalt gennemføres det som en jackknifing test, hvor der kalibreres mod alle boringer bortset fra én der benyttes til validering, hvilket gentages indtil alle boringer har været anvendt til validering.
- *Test på strømningsretning.* Ved en sammenligning af det observerede potentialekort (hvis gode data ikke findes skal der laves en synkronpejling) med modelsimuleringer testes om strømningsretninger og grundvandsskel er sammenfaldende.
- *Vandbalance.* Den stationære models vandbalance, herunder simulering af vandføring og grundvandsdannelse sammenlignes med resultater fra en dynamisk model der er valideret mod vandføringsdata,
- *Strømningsforhold.* Der gennemføres test af grundvandsalder mod dateringer fra CFC og andre miljøtracere. Såfremt der ikke findes tilstrækkelige miljøtraceredata, skal nye data indsamles. Endvidere vurderes om eksisterende vandkemidata er konsistente med modellen.

Disse tests kan tilsammen give indikationer på modellens evne til at simulere indvindingsoplande.

³ Begrebet bløde data er inspireret af litteraturen hvor begrebet hedder "soft data". Her tales der fx om at en model kan sammenlignes mod hårde data eller bløde data, hvor de bløde er dem hvor der ikke kan forventes en 1:1 sammenligning, men som alligevel har et væsentligt informationsindhold og derfor skal man ikke tvinge modellen til at ramme dem fuldstændig, men snarere benytte dem i en kvalitativ/subjektiv vurdering af om modellen leverer resultater som er konsistente med (plausible) de bløde data.

Anbefalinger

- I modelleringsopgaven skal der eksplicit lægges vægt på gennemførelse af valideringstest baseret på ovenstående principper. Det kræver følgende arbejdsdeling mellem de forskellige aktører:
 - *Vandressourceforvalteren*, evt. med input fra interessenterne i den konkrete opgave, 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* og efter konsultation med involverede *slutbrugere* - 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 *Vandressourceforvalteren* med støtte fra *Revieweren* (Tabel 4, opgave 4.13).
- Den hydrologiske model bør i videst mulig omfang udsættes for et "konsistentstjek" ved anvendelse af bløde data. Resultatet herfra skal kommunikeres i form af konklusioner om graden af modellens troværdighed.
- Til grundvandskortlægningsopgaver bør der gennemføres følgende tests:
 - Proxy-basin test af modellens test til at simulere i punkter, hvor der ikke er kalibreret. Det kan fx gennemføres via "intern validering"
 - Split-sample test (for dynamiske modeller).
 - Differential split-sample test, hvis modellen skal anvendes til at vurdere ændringer i oppumpning eller arealanvendelse.
 - Test mod bløde data i form af bl.a. CFC aldre, vandkemi og potentialkort. Dette er specielt vigtigt for stationære grundvandsmodeller, fordi det her ikke er muligt at teste vandbalanceforhold. Såfremt tilstrækkelige bløde data ikke findes bør der ved anvendelse af stationære modeller gennemføres ekstra dataindsamling.

Referencer

- Klemes V (1986) Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31, 13-24.
- Refsgaard JC (1997) Parametrisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 198, 69-97.
- Refsgaard JC, Henriksen HJ (2004) Modelling guidelines – terminology and guiding principles. *Advances in Water Resources*, 27(1), 71-82.
- 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.

Baggrundsliteratur

- Refsgaard JC, Madsen H, Andreassian V, Arnbjerg-Nielsen K, Davidson TA, Drews M, Hamilton DP, Jeppesen E, Kjellström E, Olesen JE, Sonnenborg TO, Trolle D, Willems P, Christensen JH (2014) A framework for testing the ability of models to project climate change and its impacts. *Climatic Change*, 122(1), 271-282.

- Doherty, J.E., Hunt, R.J., and Tonkin, M.J., 2010, Approaches to highly parameterized inversion: A guide to using PEST for model-parameter and predictive-uncertainty analysis: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5211, 71 p.
- Matott, L. S., J. E. Babendreier, and S. T. Purucker (2009), Evaluating uncertainty in integrated environmental models: A review of concepts and tools, *Water Resour. Res.*, 45, W06421, doi:10.1029/2008WR007301.
- 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.

5.9 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 5.8) 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 borer 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 borer, 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.

Eksempler på beskrivelse af model gyldighed i model rapport:

- Tæt ved sydlige rand vil oplande kunne være påvirket af randeffekter, hvorfor der for 3 vandværker ikke er beregnet oplande (i stedet indeholdt i Odense vest model). To vandværker ligger i et område hvor potentialet er usikkert bestemt (ks3), men da det er små vandværker (ca. 50.000 m³/år), er udbredelsen af oplandet beskeden, og usikkerheden på bestemmelsen af mindre betydning (Se Appendix A Lessons learned – model 1 Nordfyn/Orbicon)
- Dokumenteret velegnet til simulering af trykhøjder i grundvandsmagasiner på detailniveau- og overslagsniveau). Dokumenteret velegnet til beregning af indvindings- og grundvandsdannende oplande på detail - og overslagsniveau incl. vandskel og strømretninger. Velegnet til beregning af grundvandsdannelse med troværdig rumlig fordeling. Ikke dokumenteret velegnet til simulering af effekter på vådområder, vandføringer i vandløb og påvirkning af vandføring ved indvinding (Se Appendix A Lessons learned – model 10 Langeland/Rambøll)
- God til meget god til grundvandspotentialer i sandmagasiner. For Lellinge grønsand nogenlunde. God til at simulere grundvandsdannende oplande. Jo dybere magasin, dybere transportvej, jo mindre sikkert fastlægges det grundvandsdannende opland. Indvindingsoplande vurderes til at være god for de to sandmagasiner og nogenlunde for Lellinge grønsandkalk. Overordnede vandbalance er vurderet at være god. Meget god til vandløbsafstrømning i forhold til middelfaststrømning, og god i forhold til minimum og maksimum (Se Appendix A Lessons learned – model 11 Sorø-Stenlille/Rambøll)

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, og om muligt kvantificeret, med hensyn til geografiske områder, typer af modelanvendelser og tilhørende model nøjagtighed, samt konkretisere hvilke typer simuleringer fx indvindingsoplande, gradient- eller trykniveauforhold/fordelinger for magasiner og/eller vandløbsafstrømninger, som er særligt usikkert bestemt fx på grund af randbetingelses effekter eller andre specifikke kilder til modelusikkerhed.

Referencer

- Anderson MP, Woessner WW, Hunt RJ (2015) Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport. Second ed. 2015. Elsevier.
- Doherty J (2011) Modeling: Picture perfect or abstract art? Groundwater, 49 (4) 455. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2011.00812.x>
- 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, Henriksen HJ (2004) Modelling guidelines – terminology and guiding principles. Advances in Water Resources, 27(1), 71-82.
- Reilly TE, Harbaugh AW (2004) Guidelines for evaluating ground-water flow models. <https://pubs.usgs.gov/sir/2004/5038/PDF/SIR20045038part2.pdf>

5.10 Dokumentation af model

Behov for dokumentation

Både for Vandressourceforvalteren, Modelløren og eksterne interessenter, herunder slutbrugere (fx 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 model dokumentationen af afgørende betydning for slutbrugere og 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. En model rapport vil typisk have et teknisk indhold, men indeholder derudover et resumé og en konklusion og anbefalinger, der har en bredere målgruppe.

Typer af dokumentation

Dokumentation af modelleringsprocessen skal indeholde følgende elementer:

- Dokumentation af geologiske model og resultat
- Dokumentation af hydrogeologiske model og resultat
- Dokumentation af hydrologiske model leverancer (for kortlægningsmodeller modelrapport samt indvindingsoplande og grundvandsdannelser)
- Indberetning til Model- og Rapportdatabasen (modelarkivering)
- Evt. referencer til Den nationale Vandressourcemodel

Modelrapport

Modelrapporten skal indeholde en beskrivelse af resultaterne af modelleringsforløbet i de sidste fire modeltrin (se Tabel 14). Et forslag til strukturering og indhold af modelrapporten er givet i Tabel 14. I tabellen er endvidere anført hvilke dele af rapporten, der 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 fx efter hvert af trinnene 2-4 være opmærksom på, at de skal kunne forstås og "stå alene" og samtidig sættes i relation til de øvrige rapporter i modelleringsforløbet (incl. referencer til særskilte kortlægningsrapporter). Rapporterne er således typisk en serie af dokumentationer, hvor det væsentlige er at de er indbyrdes refererede.

Dokumentation af geologiske modeller

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

Dokumentation af hydrologisk model

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 rekvisitent, navn på rådgivningsfirma/institution, der udfører modelleringen inkl. navne på de personer, der konkret har udført modelleringen.		
Indholds-fortegnelse	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. Beslutninger og begrundelser, der er truffet i forbindelse med modelprojekt (fx ved modelreviews eller interessentmøder) <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	• Elementer af opgaverne 1.1–1.4 (Tabel 1) • Afsnit 5.1 • Usikkerheds-matrix, Afsnit 5.7
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	• Geo-Vejledning 3 (Jørgensen et al., 2008)
Kapitel 4 Øvrige data	De øvrige (udover geologi) tilgængelige data beskrives og vurderes i forhold til den konkrete modelopgave (samt evt. om der er sket genanvendelse af eksisterende modeller). En del af databeskrivelsen kan med fordel placeres i appendices eller, i tilfælde af indsamling af nye data, udgøre selvstændige datarapporter. Klima, arealanvendelse og grundvandsindvinding, pejlinger/potentialeforhold, afstrømningsmålinger, vandløbsnet, spildevand, dræn, LAR mm. <i>Omfang: 10-20 sider plus eventuelle appendices/datarapporter</i>	TRIN 2	• Tabel 2, opgaverne 2.1-2.3 • Afsnit 5.11 • Afsnit 5.12 • Afsnit 5.14 • Afsnit 5.15
Afsnit i rapport	Indhold	Godkendes	Emner fra vejledningen som skal rapporteres her

Kapitel 5 Konceptuel model og usikkerheds- vurdering	Her beskrives de(n) opstillede stedspecifikke konceptuelle model(ler) herunder klima og hydrogeologisk setting. Begrundelse for simplifikationerne mht. geologisk model, strømningsligninger, mv. Planer for parametriseringer, randbetingelser. Evt. genanvendelse af eksisterende hydrologiske modeller beskrives, og problemstillinger knyttet hertil. Konceptuel model beskrives ved et snit (hydrostrategi) og diagrammer (fx tidsserier af observationer, vandbalance mv.). Evt. alternative konceptuelle modeller visualiseres eller skitseres, med tydelig angivelse af hvordan de adskiller sig fra den primære (tilgrundliggende) konceptuelle model. <i>Omfang: ca. 3-6 sider.</i>	TRIN 2	• Tabel 2, opgaverne 2.4-2.9 • Afsnit 5.2 • Afsnit 5.3 • Afsnit 5.11 • Afsnit 5.12 • Afsnit 5.14 • Afsnit 5.15
Kapitel 6. Numeriske model- værktøjer og metodik	Her gives en beskrivelse af den modelleringsmetodik, der er benyttet. Hvilken modeltype er anvendt? Hvilken model kode og version er anvendt og begrundelse herfor? Hvad er den overordnede metodik ved parametrisering, kalibrering, validering, modelanvendelser, og usikkerhedsanalyser? Hvordan er modellen diskretiseret i tid og sted? Hvordan påtænkes den numeriske model kode tilpasset den konceptuelle model? Indledende planer herom vil typisk være indeholdt i Modellørens tekniske tilbud, men bør formuleres mere konkret ved udgangen af Trin 2. <i>Omfang: ca. 1-3 sider.</i>	TRIN 2	• Tabel 2, opgave 2.10 • Afsnit 5.1 • Afsnit 5.5 • Afsnit 5.6 • Afsnit 5.7 • Afsnit 5.8
Kapitel 7. Modelopstilling af alternative kon- ceptuelle modeller	Beskrivelse af modelområde, diskretisering, hydrauliske parametre, input og output til vandbalancen, randbetingelser og den udførte databearbejdning for alternative (hydrostratigrafiske/konceptuelle) modeller, såfremt sådanne har været anvendt. <i>Omfang: 10-20 sider.</i>	TRIN 3	• Tabel 3, opgaverne 3.1-3.2 • Usikkerheds-matrix, Afsnit 5.7 • Afsnit 5.12 • Afsnit 5.14
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? Beskriv observationsdata der indgår i kalibrering og validering. <i>Omfang: 3-6 sider.</i>	TRIN 3	• Tabel 3, opgave 3.3 • Afsnit 5.5 • Afsnit 5.6 • Afsnit 5.8 • Afsnit 5.11 • Afsnit 5.12
Afsnit i rapport	Indhold	Godkendes	Emner fra vejledningen som skal rapporteres her

Kapitel 9 Kalibrering	Beskrivelse af resultater af kalibreringsprocessen incl. usikkerheder på parameter estimer, samt objektivfunktion, følsomhedsanalyse, kalibreringsmål, udvalgte kalibreringsparametre, kalibrerings-resultat med hensyn til simulerede versus observerede variable, opnåede parameterverdier med tilhørende konfidensgrænser og en vurdering af, hvor godt kalibreringsresultatet er, i forhold til nøjagtighedskriterier (ME, RMS, R2, Fbal, Fbal-S osv.). Resultater fx residualer i trykniveau eller afstrømningsperformance skal visualiseres på kort, tabeller og figure og medtages for udvalgte stationer (tidsserier) i rapport, mens mere detaljerede resultater kan medtages i Appendices og bilag. Derudover skal kalibreringsprocessen (evt. kalibreringslog) beskrives kortfattet, med fokus på den læring der er opnået fra manuel eller in-vers kalibrering. Evt. anvendt parameterestimerings værktøj (og version) skal beskrives. Hvis der anvendes pilot points metoder skal en grafisk illustration af antal og fordeling inkluderes. <i>Omfang: 10-15 sider.</i>	TRIN 4	• Tabel 4, opgaverne 4.1-5 • Afsnit 5.5
Kapitel 10 Validering og usikkerheds-analyse	Beskrivelse af resultater fra modelvalideringen og den efterfølgende brug af kalibrerings- og valideringsresultaterne til at lave en usikkerhedsvurdering, herunder vurdering af usikkerheder på planlagte modelanvendelser. Det er i forbindelse med valideringen vigtigt at vurdere såvel kvantitativt som kvalitativt, hvor fornuftigt og konsistent den validerede model beskriver strømningsforhold sammenholdt med observationsdata og generel hydrogeologisk viden fra området. <i>Omfang: 5-10 sider.</i>	TRIN 4	• Tabel 4, opgaverne 4.8-4.10 • Afsnit 5.5 • Afsnit 5.7 • Afsnit 5.8
Kapitel 11 Modellens dokumenterede anvendelses-område	Beskrivelse af hvilke anvendelser (geografiske områder, typer af beregninger, nøjagtighedsniveau) referencemodellen 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, herunder den dokumenterede usikkerhed på referencemodeller. <i>Omfang 1-2 sider.</i>	TRIN 4	• Tabel 4, opgave 4.11 • Afsnit 5.9
Kapitel 12 Scenarie-opstillinger	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 (Referencemodel). Vurdering af usikkerheder på simuleringresultater. Målgruppen vedr. scenarier er bred og omfatter slutbrugere, beslutningstagere, administratorer og andre interessenter, der måske har begrænset viden om modellering og usikkerhedsvurdering. Det er vigtigt at kommunikationen er så klar og forståelig som muligt, herunder med en beskrivelse af hvor sandsynlige resultaterne er <i>Omfang: 3-6 sider.</i>	TRIN 5	• Tabel 5, opgave 5.1 • Afsnit 5.13 • Afsnit 5.14
Afsnit i rapport	Indhold	Godkendes	Emner fra vejledningen som skal rapporteres her

Kapitel 13 Simulerings-resultater	Resultater og vurderinger, inkl. usikkerhedsanalyser, af modelberegningerne for de opstillede scenarier. Der henvises til beskrivelser i afsnit 5.13 vedr. indvindingsoplande og 5.14 vedr. grundvandsdannelse. Der udarbejdes desuden plot af resultater jf. administrationsgrundlag. <i>Omfang: 10-20 sider.</i>	TRIN 5	• Tabel 5, opgaverne 5.2-5.7 • Afsnit 5.7 • Afsnit 5.13 • Afsnit 5.14 • Administrationsgrundlag
Diskussion 14	Diskussionsafsnittet skal kort evaluere simulerings-resultater i forhold til modelformål. Det skal vurderes om modelformål er blevet opfyldt. Styrker og svagheder af den konceptuelle model (evt. alternative konceptuelle modeller) skal beskrives. Forslag til hvordan nøjagtighed kan forbedres fx gennem nye feltdata beskrives. <i>Omfang: 1-2 sider.</i>		
Kapitel 15 Konklusioner og anbefalinger	Resultaterne af modelarbejdet sammenfattes. Anbefalinger vedr. scenarier og andre resultater af modelarbejdet. <i>Omfang: 1-2 sider.</i>	TRIN 5	
Kapitel 16 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 Raportdatabase

Formålet med arkivering af modellen er at sikre at resultater kan reproducere og genanvendes i fremtiden, enten af modellører eller andre interessenter/slutbrugere (Reilly and Harbaugh, 2003). Et modelarkiv skal have tilstrækkelig information til at det er muligt at udføre en postaudit af modellen af tredjepart (ASTM, 2013), og sådan at fremtidig genanvendelse af modellen er muligt (jf. afsnit 5.e).

Alle de hydrologiske modeller og rapporter, der udarbejdes i forbindelse med den nationale grundvandskortlægning skal indberettes af rådgiver til offentligt tilgængelige databaser:

- **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. Link til modeldatabasen og den seneste vejledning i anvendelse af Modeldatabasen samt databladet findes på <http://www.geus.dk/modeldb/>.
- **Rapportdatabasen.** Her lagres modelrapporter. Rapportdatabasen findes på <http://geus-kort.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 som udgangspunkt referere til beregningslagene i Den nationale Vandressourcemodel. Det er en del af den dokumentation, der skal

fremgå af databladet i Jørgensen et al. (2009). Det er derfor vigtigt at kommunikere hvorvidt en model har givet anledning til en ændring i tolkning af den 'landsdækkende' hydrostrategi der ligger til grund for Den Nationale Vandressourcemodel, og på hvilken måde denne evt. er ændret.

Referencer

- Anderson M, Woessner W, Hunt, R (2015) Applied groundwater modelling. 2nd Edition. Simulation of flow and advective transport. 630 pp.
- ASTM (2013) Standard guide for documenting a groundwater flow model application. D5718-13. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 6p
- Henriksen HJ, Iversen CH, Wernberg T (2011) Usikkerheder på indvindings- og grundvandsdannende oplande (Delprojekt 3 om oplande). Særudgivelse. 44 pp.
- Jørgensen F, Kristensen M, Højberg AL, Klint KES, Hansen C, Jordt BE, Richardt N, Sandersen P (2009) Opstilling af geologiske modeller til grundvandsmodellering. Geovejledning 3.
- Reilly TE, Harbaugh AW (2004) Guidelines for evaluating groundwater-flow models. US Geological Survey Scientific Investigations Report 2004-5038, 30p. <http://pubs.usgs.gov/sir/2004/5038/>
- Sonnenborg TO, Henriksen HJ (2005) Håndbog i grundvandsmodellering. GEUS rapport 2005/80.

5.11 Datatilgængelighed, diskretisering og parameterisering

Datatilgængelighed og diskretisering

Valget af modeldiskretisering eller gridopløsning er et væsentligt element af enhver distribueret modelopsætning. I integreret oplandsmodellering af grundvand og overfladevand arbejder man typisk med gridopløsninger på mellem 25-1000 m afhængigt af oplandets størrelse, den konkrete anvendelse, overkommelig beregningstid samt datatilgængelighed i bred forstand, både tidsligt, rumlig og hvilke variable der er tilgængelige. Hvad angår datatilgængeligheden vil de primære begrænsende data for den rumlige opløsning typisk være knyttet til den geologiske model samt nedbørsdata. Disse data er dels, sammen med topografien, de væsentlige for simuleringen med den integrerede model og samtidigt nogle af de data som typisk har den laveste rumlige opløsning i DK-modellen. Generelt vil den rumlige opløsning af andre modelinput som arealanvendelse, jordparametre i den umættede zone og vandløbslækage have en sekundær betydning for modelresultater på oplandsarealer over ca. 20 km² (Højberg et al. 2012). Grid opløsningen er et valgt der tages som et kompromis mellem beregningstid, datatilgængelighed og de antagelser og forsimplinger som modelkonceptet er baseret på. Den nationale vandressource model (DK-modellen) er baseret på en gridopløsning på 500 m medens der i grundvandskortlægning ønskes ofte en finere diskretisering, typisk omkring 100 m.

En finere gridopløsning vil i sagens natur udelukkende have en effekt på modelresultaterne hvis et eller flere af de væsentlige model-input er til rådighed i en finere opløsning. Dette er tilfældet for den topografiske højdemodel som typisk er tilgængelig med stor præcision i en opløsning på meter skala. En finere diskretisering af model-topografien har størst betydning for de overfladenære processer som overfladisk afstrømning, drænastrømning, grundvand-overfladevands interaktion. Dette bevirker, at der typisk kan opnås en bedre simulering af baseflow, sommervandføring samt oversvømmede arealer (Højberg et al. 2012). Derimod vil afledede modelresultater som grundvandsdannelse og indvindingsoplande typisk ikke ændres væsentligt, ligesom middel- og maksimal-vandføringer ikke nødvendigvis forbedres.

Det er dog væsentligt at pointere at en forbedring af gridopløsningen baseret på en finere højdemodel kan møde begrænsninger, hvis ikke andre model input som f.eks. den geologiske model forfines tilsvarende. Dette kan opnås ved indsamling af nye data og lokalt geologisk kendskab som i forbindelse med grundvandskortlægningen.

Desuden kræver en forfining af gridopløsningen overvejelser om modelkonceptets fortsatte gyldighed. En væsentlig finere opløsning kan f.eks. have betydning for konceptualiseringen af dræn (drændybde), overfladisk afstrømning, routing metode for vandføring samt valg af umættet zone koncept. I tilfælde hvor en eksisterende grov model genanvendes med en finere gridopløsning vil dette typisk kræve en re-kalibrering, da parametrene i en model kalibreret med en grovere opløsning vil være tilpasset denne opløsning. Typisk vil en model baseret på DK-modellens opsætning og datagrundlag med fordel kunne forfines til ca. 100 m hvis der ønskes en bedre beskrivelse af de overfladenære processer. Har man desuden adgang til bedre lokale data og forståelse til en detaljering af den geologiske model vil man forventeligt ligeledes kunne opnå en bedre beskrivelse af den mættede strømning.

Almindelig datatilgængelighed

Nedenstående Tabel 16 indeholder en oversigt over den typiske datatilgængelighed ift. tidslig og rumlig dækning, samt den typiske kilde til data. For nogle datatyper varierer datatætheden meget, dette gælder særligt, information om geologi samt pejledata som begge er baseret på boringsdata.

Tabel 16: Tabeloversigt over opløsning i tid og rum samt datakilde for de grundlæggende input data til hydrologisk modellering.

Input data	Tid	Rum	Kilde
Klimavariabel			
Nedbør	1-24 timer	10 km	DMI
Reference fordampning	24 timer	20 km	DMI
Temperatur	1-24 timer	20 km	DMI
Nettonedbør (stationær kørsel)	konstant	500 m	DK-model
Topografi			
	konstant	1,6 m	Kortforsyningen
Vandløbsdata			
Vandløbstema	konstant	1:10.000	Top10DK
tværsnitsbeskrivelser	konstant	-	DK-model
Umættet zone parametre			
	konstant	250-500 m	DCA
Mættet zone parametre			
	konstant	varierende	Jupiter/GERDA/DK-model
Vegetationsparametre			
Arealanvendelse	år	1:50.000	AIS
Afgrødefordeling	år	Amts-niveau	Danmarks Statistik
LAI	måned	500 m	GEUS notat
Rodzonedybde	måned	500 m	GEUS notat
Valideringsdata			
Vandføring	24 timer	varierende	ODA
Trykniveau	24 timer-årlig	varierende	Jupiter

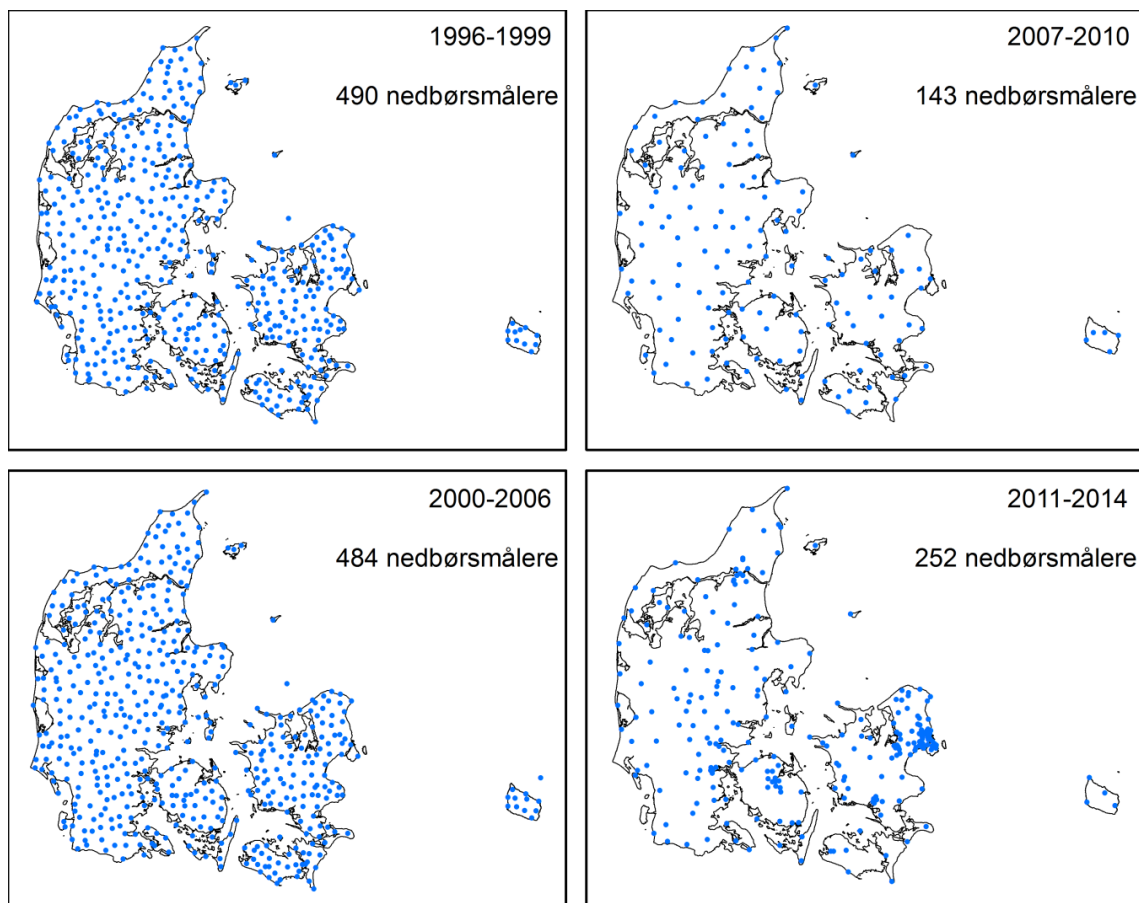
De tre væsentligste betingelser for at kunne etablere en robust vandbalance model er: gode nedbørsdata, nedstrøms vandføringsmålinger og korrekte randbetingelser for grundvandsstrømning. Disse tre komponenter vil sikre en fornuftig beskrivelse af inflow og outflow fra modelområdet. Særligt nedbørsdata kan være kilde til meget varierende model performance, da datagrundlaget varierer voldsomt i rumlig dækning. Typisk anvendes DMIs 10 km grid data til modellering, hvilket er praktisk, da der er fuldstændig rumlig og tidslig dækning. Modellerer skal dog være opmærksomme på, at datagrundlaget bag interpolationen til 10 km grid datasættet har varieret meget over de sidste 20 år. Figur 6 illustrerer, hvor mange nedbørs stationer, der har mere end to års data i fire forskellige perioder. Det fremgår tydeligt, at der efter en stabil periode 1996-2006 sker et voldsomt fald i datagrundlaget som følge af overgang til (færre) automatiske stationer og efterfølgende fokus på byområder. Det er derfor tilrådeligt, at man ved modelarbejde vurderer kvaliteten af de nedbørsdata, der anvendes eller evt. ligger bag 10 km grid datasættet. Desuden påvirker kvaliteten af nedbørsdata også valget af kalibrerings og validerings periode. Typisk er formålet med en validering at belyse, hvor god model performance er for en anden periode med evt. andet klima. Formålet er derimod ikke at belyse, hvordan modellen performer med en anden data kvalitet. Derfor er det tilrådeligt at anvende samme eller bedre datakvalitet i validering som i kalibrering. Baseret på Figur 6, kunne man f.eks. anvende 1996-1999 og 2000-2006 til kalibrering og validering, men undgå at anvende perioderne 2007-2010 og 2011-2014 til validering. Det skal dog præciseres, at der kan være andre data end nedbør der kan være afgørende for valg af kalibrerings-validerings periode, f.eks. vandførings data, pejle tidsserier eller synkronpejlinger.

Hvad angår vandføringsdata, er disse tilgængelige i ODA databasen. Denne database indeholder en lang række vandføringsstationer, som dog ikke alle vil være lige relevante for hydrologisk modellering. Det vil være nødvendigt at evaluere de enkelte stationer og deres tidsserier for at vurdere, om de er egnede til model kalibrering og validering. F.eks. vil nogle stationer være kraftigt påvirket af strukturer som dambrug, opdæmning og andet, som muligvis ikke er inkluderet i en given hydrologisk model. Til kalibrering af DK-modellen er ca. 200 vandførings stationer udvalgt som antages at repræsenterer naturligt flow for oplande større end 10 km². Miljøstyrelsen har i forbindelse med overvågningsprogrammet taget initiativ til at oprette ca. 190 nye vandføringsstationer, som fra 2017 vil være et signifikant bidrag til den eksisterende database.

Med ønsket om at opfylde kravene til en robust vandbalance model vil det ofte være hensigtsmæssigt at definere modelranden efter beliggenheden af tilgængelige vandføringsstationer, optimalt med en vandføringsstation som nedstrøms randbetingelse. Desuden vil interne vandføringsstationer opstrøms kunne anvendes til at validere den interne vandbalance. Opfyldelsen af disse krav vil dog variere med oplandets størrelse og placering, men det er værd at pointere, at selv en kort tidsserie af vandføring kan være meget informativ i forhold til modellens vandbalance og dynamik.

Generelt bør performance kriterier ikke justeres efter datatilgængeligheden, men det kan være nødvendigt at acceptere en model med en lavere performance for perioder eller områder med lav datakvalitet, da ændringer i koncept eller parametrisering ofte ikke vil være nok til at opnå et ønsket kriterium. I sådanne tilfælde må modellens anvendelighed vurderes i henhold til det specifikke formål og muligheder for alternative værktøjer. I nogle tilfælde vil en model baseret på det bedst tilgængelige datagrundlag og modelkoncept være det mest velegnede værktøj på trods af at opstillede performance kriterier ikke kan overholdes. Erfaringerne fra DK-modellen viser, at modellens performance på vandføringsdynamik (NSE) var tilfredsstillende både i kalibreringsperioden (2000-2006) og i den foregående valideringsperiode (1996-1999), mens den var utilstrækkelig i valideringsperioden med få nedbørsstationer (2007-2010).

Modellens performance på vandbalance indikatorer F_{bal} og $F_{bal,sommer}$ var sammenlignelig for de forskellige perioder. Baseret på Figur 6 og analyser af nedbørs statistik for de forskellige perioder antages det, at den primære årsag til faldet i performance skyldes faldet i antallet af nedbørsstationer. Derfor kan modellen ikke forkastes, da valideringen ikke er baseret på et sammenligneligt datagrundlag. Med andre ord, kan modellen kalibreret på perioden 2000-2006 sandsynligvis sagtens anvendes til forskellige scenarie beregninger baseret på perioden 1996-2006 på trods af at den har dårligere performance på vandføringsdynamik (NSE) i den efterfølgende periode.



Figur 6. Antal stationer, med mere end to års data i en given periode, som indgår i DMIs 10 km grid nedbør (antallet af klimastationer med fordampning er ikke vist, men er væsentligt færre).

Ved valg af stationære modeller vil nettonedbøren være af afgørende betydning for modelresultaterne, og den bør baseres på en dynamisk simulering for samme modelområde og tidsperiode. Dette kunne f.eks. være baseret på et udtræk fra DK-modellen eller en dynamisk kalibreret og valideret oplandsmodel. Desuden bør modelrapporten tydeligt angive, hvordan nettonedbøren er beregnet.

Parameterisering

Mættet zone:

De væsentligste parametre for den mættede zone er oftest de hydrauliske ledningsevner tilknyttet den hydrostrategrafiske model. Generelt er det vanskeligt at basere modellering på målte hydrauliske ledningsevner, da disse vil være knyttet til enten meget små samples (laboratiormålinger) eller få pumpetests. Derfor vil estimering af hydrauliske ledningsevner typisk være baseret på en model kalibrering, hvor effektive parameterverdier bestemmes for en konkret modelopsætning. Dette er dog ikke ensbetydende med at alle estimerede værdier er lige realistiske, og det vil derfor være nødvendigt at begrænse parameterintervaller og foretage et post-kalibrerings tjek. Der bør f.eks. opstilles realistiske parameter intervaller for hver geologisk enhed forud for kalibrering. Disse intervaller vil typisk dække 2-3 størrelsesordener men samtidigt sikre en adskillelse af markant forskellige geologiske enheder. Nedenstående tabel viser de omtrentlige intervallerne for effektiv hydraulisk ledningsevne og

andre mættet zone parametre for de dominerende geologiske enheder i Danmark baseret på erfaringer fra 20 GKO modeller samt DK-modellen og kan, sammen med erfaringer fra tidligere modeller i området, anvendes som en ledesnor for realistiske parameterintervaller. Falder parameter værdierne i en given model udenfor disse intervaller, vil det være tilrådeligt at reflektere over årsagen, hvad enten den peger på kalibrering, den konceptuelle model eller den hydrogeologiske model. Desuden indeholder modelrapport vedr. DK model (vandmodel.dk) en fuldstændig oversigt over alle parametre anvendt for hvert modelområde i DK-modellen. Denne oversigt kan være interessant til vurdering af parameterintervaller for lokale modeller.

Tabel 17: Tabeloversigt over typiske parameterintervaller for mættet zone parametre. Bemærk at den hydrauliske ledningsevne er angivet vertikalt (z) og horisontalt (x) for hhv. ler og sand enheder. Parameter intervaller for hhv. specifik ydelse og effektiv porøsitet er angivet i separat tabel i afsnit 5.13.

Parameter	Estimeret parameter interval		enhed
Moræneler, Kz	1.0E-09	1.0E-07	m s ⁻¹
Opsprækket Moræneler, Kz	1.0E-08	1.0E-06	m s ⁻¹
Kvartær sand, Kx	1.0E-05	1.0E-03	m s ⁻¹
Prækvartær ler, Kz	1.0E-10	1.0E-07	m s ⁻¹
Prækvartær sand, Kx	1.0E-05	1.0E-03	m s ⁻¹
Kalk, Kx	1.0E-06	1.0E-03	m s ⁻¹
Tørv, Kx	1.0E-07	1.0E-05	m s ⁻¹
Dræn tidskonstant	1.0E-08	1.0E-06	s ⁻¹
Vandløbslægekoefficient	1.0E-09	1.0E-05	s ⁻¹

Umættet zone:

Til parametrisering af den umættede zone anbefales Georegionskortet udarbejdet af DCA (Børgesen et al., 2009), se Figur 7. Dette kort inddeler Danmark i 50 enheder og 3 horisonter iht. jordbundens karakteristika, baseret på 5 overordnede georegioner. Desuden er der til hver enhed knyttet en række jordfysiske parametre, som muliggør bestemmelse af de nødvendige inputparametre til den umættede zone i en hydrologisk model. De parametre, som er knyttet til 2-layer UZ modulet i MIKE SHE er listet i og desuden kan teksturdata samt detaljerede van Genuchten parametrisering for hver enhed rekvireres. De jordfysiske parametre for den umættede zone kan have stor betydning for det simulerede vandindhold i rodzonen og derfor for den simulerede fordampning. Men da datagrundlaget for den umættede zone vurderes at være ganske godt, og da parameter variationen mellem forskellige enheder er lille, vurderes det at kalibrering af umættet zone parametre typisk ikke er tilrådeligt. Ofte vil en sådan kalibrering resultere i urealistiske kombinationer af parametre på tværs af enheder, og der vil typisk kunne opnås mere robuste vandbalance resultater ved kalibrering af andre (mere usikre) parametre som f.eks. rodzonedybden.

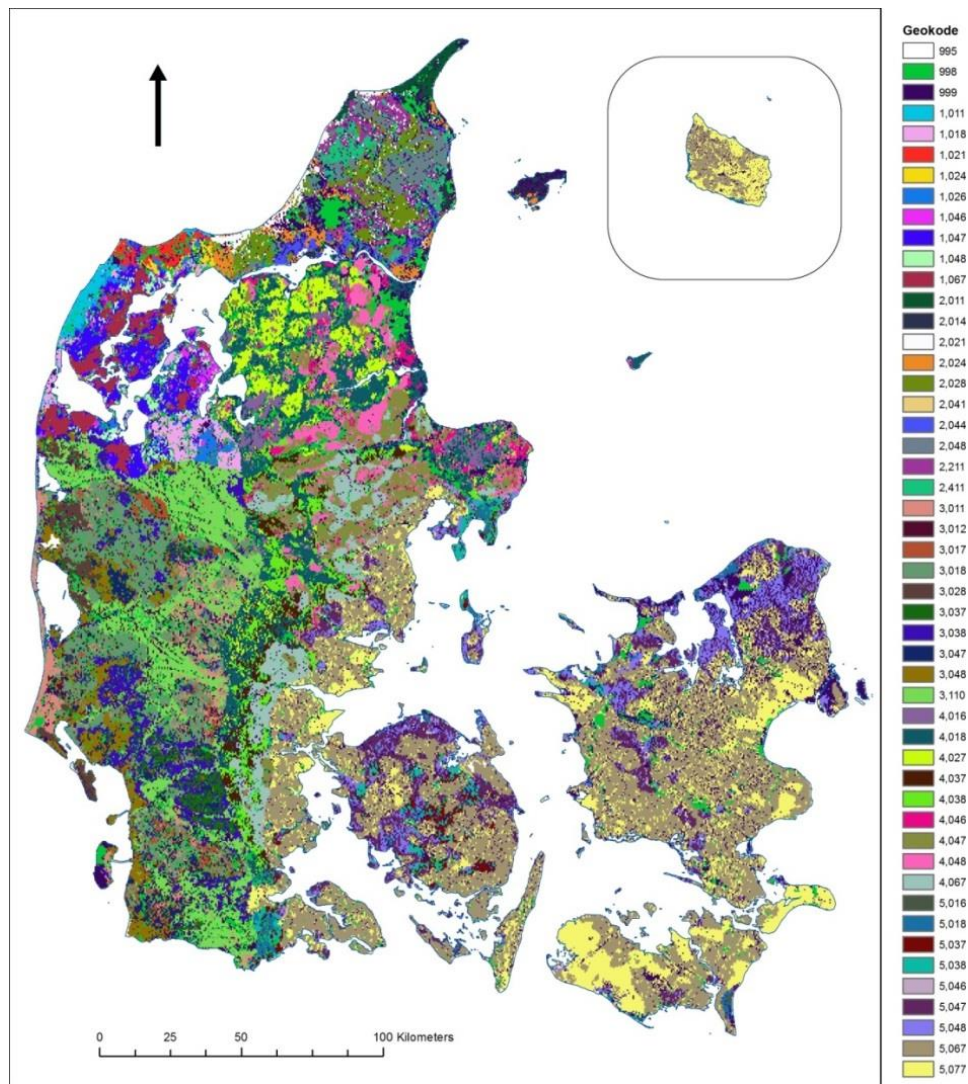


Fig 7. Georegionskortet som anvendt i DK-modellen. Grid opløsningen er 500 m for Jylland, Sjælland og Fyn og 250 m for Bornholm. Kortet er udarbejdet af Aarhus Universitet (Børgesen et al., 2009).

Vegetations parametre:

Parametrisering af vegetation er særligt vigtigt for dynamiske modeller, hvor årstidsvariationen har betydning for fordampningen. I Vandbalance anbefalingerne (Refsgaard et al., 2011) skitseres en metode til beskrivelse af vegetationsdynamik, hvor hver arealanvendelse og afgrødetype tildeles en årsvariation som derpå gentages for hvert år af simuleringen. Dette muliggør, at man kan have forskellig dynamik for f.eks. løvskov og nåleskov samt vinterafgrøder og vårafgrøder. De væsentligste vegetationsparametre er bladarealindekset (LAI), rodzonedybden samt afgrødekoeficienten (Kc). Typisk vil LAI udelukkende anvendes til beregning af interceptionstabet, og den vurderes at være den mindst afgørende af de tre. Rodzonedybden (RZD) er bestemmende for hvilken dybde planterne er i stand til at trække vand fra til transpiration og sammen med de jordfysiske parametre (markkapacitet (fc) og visnepunkt (wp)) udgør rodzonedybden den tilgængelige vandmængde (RZC).

$$RZC = RZD * (fc - wp)$$

Hvis de jordfysiske parametre ikke inkluderes i kalibrering, er det derfor oftest nødvendigt at inkludere rodzonedybden for at justere fordampningen og dermed vandbalancen, og man skal derfor betragte denne dybde som en effektiv parametrisering som muligvis kompenserer for andre modelbegrænsninger. Markstudier har vist, at rodzonedybden er stærkt afhængig af jordtypen, idet lerede jorde har større rodzonedybde end sandede jorde, hvorimod variationen mellem forskellige afgrøder er meget lille. Dette bør der tages højde for i parametrisering af rodzonedybde, således at der sikres et realistisk forhold mellem rodzonedybden på forskellige jorde. Typisk vil rodzonedybden på en sandjord være halv så stor som for en lerjord, med værdier omkring 50-100 cm for sandjorde og 100-200 cm for lerjorde, se evt. tabel 12 i modelrapport vedr. DK model (vandmodel.dk).

Afgrødekoefficienten (K_c) er en faktor som ganges direkte på den klimabaserede referencefordampning for at opnå den potentielle fordampning, og den har derfor direkte betydning på den simulerede fordampning. K_c korrigerer for, at nogle vegetationstyper varierer fra den reference vegetation (10 cm højt, vandet græs) som referencefordampningen er baseret på. Værdien af K_c ligger typisk mellem 1,05-1,10 for markafgrøder i vækstsæsonen (med værdien 1 resten af året), mens den kan ligge noget højere for skov (1,1-1,5).

Data for arealanvendelse inkluderer typisk ikke afgrødespecifik information, og information om afgrøde fordeling må derfor indhentes separat. For små modelområder vil det muligvis være muligt at indhente specifik information om afgrødefordeling på mark eller markblok niveau, mens det for større modelområder er tilrådeligt at basere fordelingen på statistik for et givent område. Alternativt kan man benytte den afgrødefordeling som ligger i DK-modellen og er baseret på Danmarks Statistiks tal på amtsniveau. Den statistiske afgrødefordeling er i DK-modellen implementeret ved en tilfældig afgrødeplacering indenfor arealanvendelsen landbrugsafgrøder, som samtidig sikrer en korrekt statistisk fordeling af afgrøder for hvert delområde.

Ændringer i arealanvendelse og afgrøderotation er typisk svær at parametrisere i hydrologiske modeller og vanskeligt at indhente data for. Har man denne information, og vurderer man, at det er afgørende for simuleringerne (typisk for et lille modelområde med store ændringer i arealanvendelse) vil det naturligvis være tilrådeligt at implementere i parametriseringen, evt. som et forsimplet skift fra én dominerende fordeling til en anden.

Modeludvikling ifht. data og parametrisering af fordampning fra rodzonen

Fremadrettet vil det være interessant at arbejde hen imod en overgang fra fordampningsmodeller baseret på en referencefordampning til energibaserede fordampningsmodeller. Fordelen ved de energibaserede fordampningsmodeller er, at de dels inkluderer en beskrivelse af døgnvariationer i fordampning (i modsætning til middelbetragtninger) og at de honorerer den totale energibalance, hvilket er fysisk mere korrekt end anvendelsen af afgrøde koefficienter. Ulempen ved de energibaserede fordampningsmodeller er, at de kræver en høj grad af parametrisering, dels af vegetations og overfladeparametre som f.eks. albedo, vegetationshøjde, bladbredde, ruhed osv. og dels en høj tidslig opløsning (1-3 timer) af en række klimavariabeler som f.eks. vindhastighed, global stråling, relativ luftfugtighed og temperatur (Stisen et al. 2011). Pt. står disse udfordringer muligvis ikke mål med almindelig anvendelse af hydrologiske modeller, men i forskningssammenhæng og til nogle særlige anvendelser som dynamisk kobling til klimamodeller og dataassimilering og integration med satellit data vil det være relevant (Larsen et al. 2016).

Anvendelse af satellit data er en anden relevant udvikling indenfor hydrologisk modellering, særligt ifht. parametrisering og etablering af rumlige kalibrerings og validerings datasæt. Særligt på vegetations-siden kan tidsserier af f.eks. bladareal index (LAI) og albedo være en ny måde at parametrisere modeller med en hidtil uopnåelig kombination af tidslig og rumlig opløsning. Typisk vil man kunne producere landsdækkende tidsserier af LAI med en tidslig og rumlig opløsning på hhv. 8 dage og 1 km (Stisen et al. 2011). Tilsvarende kan remote sensing metoder til bestemmelse af fordampning baseret på satellitbilleder af overfladetemperatur under skyfri forhold kunne give hidtil uopnåelig information om den rumlige fordeling af aktuel fordampning på tværs af landet.

Anbefalinger

- Opløsningen af de begrænsende data for diskritisering, hvilket typisk er nedbørs-data og geologi, bør vurderes inden valg af gridopløsning
- Tilgængeligheden og kvaliteten af de væsentligste input data til en robust vandbalance model (nedbør, nedstrøms vandføring og gode SZ randbetingelser), bør vurderes inden valg af modelrand og kalibrerings og validerings periode.
- De angivne typiske parameterintervaller for mættet zone parametre bør anvendes som en ledesnor for modelparametrisering og kalibrering
- Standard UZ og rodzone parametrisering bør anvendes, hvis ikke bedre lokale data forefindes.
- Kalibrering af en vandbalancemodel bør inkludere en UZ/rodzone parameter som direkte påvirker fordampning, denne bør være den effektive rodzonedybde
- Ved valg af stationære grundvandsmodeller skal det tydeligt fremgå af modelrapporten hvordan nettonedbøren er beregnet.

Referencer

- Børgesen CD, Petersen JW, Iversen TM, Grant R, Jacobsen B, Elmholt S (2009) Midtvejsevaluering af Vandmiljøplan III, Hoved- og baggrundsnotater. DJF Rapport Markbrug 142. Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet, Aarhus Universitet.
- Højberg AL, Olsen M & Henriksen HJ (2012) Simulering af ekstremvandføring og grundvandsbetinget oversvømmelse – Analyse af muligheder for optimering af DK-model (Horsens Fjord opland), Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2012/115.
- Refsgaard JC, Stisen S, Højberg AL, Olsen M, Henriksen HJ, Børgesen CD, Vejen F, Kern-Hansen C, Blicher-Mathiesen (2011) Vandbalance i Danmark - Vejledning i opgørelse af vandbalance ud fra hydrologiske data for perioden 1990-2010, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2011/77.
- Stisen S, McCabe MF, Refsgaard JC, Lerer S, Butts, MB (2011) Model parameter analysis using remotely sensed pattern information in a multi-constraint framework. Journal of Hydrology 409(1-2), 337-349.
- Larsen MAD, Christensen JH, Drews M, Butts MB, Refsgaard JC (2016) Local control on precipitation in a fully coupled climate-hydrology model. Scientific Reports 6.

5.12 Hydrologisk modellering i det urbane rum

Hydrologisk modellering af det urbane rum bliver fortsat mere aktuell, da det fysiske omfang af både de største byer men også af de mindre byer øges. Derudover er kompleksiteten af det urbane vandkredsløb også væsentligt ændret. Tidligere bestod den afgørende hydrologiske forskel mellem det åbne land og byområder i introduktionen af befæstede områder og de deraf afledte effekter på det hydrologiske kredsløb. Dvs. forøget overfladisk afstrømning, reduceret fordampning og grundvandsinfiltration. En øget kompleksitet er siden introduceret via forhold som separerede kloak og regn-afledningssystemer, forskellige adaptive tiltag som Lokal Afledning af Regnvand (LAR) ved forceret infiltration, eller tiltag der afleder regnvand ved forøget evapotranspiration, som grønne tage, regnbæde m.m. Desuden er forhold som antropogen urban geologi og dennes effekt på hydrogeologien også synliggjort i de seneste år, samt effekten af utætte kloakrør, der interagerer med omgivende jord og grundvand. Et opland skal betragtes som urban, når lokale menneskelige (antropogene) påvirkninger ændrer de hydrologiske flukse væsentligt.

Afsnittet om hydrologisk modellering i det urbane rum vil være rettet mod forhold, som er afgørende for grundvandsdannelsen under byområder. For at opnå en korrekt beskrivelse af denne, må hele vandets kredsløb i og under det urbane rum analyseres. Det skal her fremhæves, at hydrologisk modellering af det urbane rum ikke metodisk adskiller sig fra modellering af det åbne land, eller generelt modellering af vandressourcen. Betænkninger og anbefalinger fremført i dette afsnit erstatter derfor ikke generelle forhold beskrevet i den øvrige del af vejledningen omkring hydrologisk modellering, der vedvarende er gældende. Afsnittet er derimod ment som en hjælp til ordregiver, modellør og andre involverede i modelleringsprocessen, og en påpejning af hydrogeologiske forhold for det urbane rum.

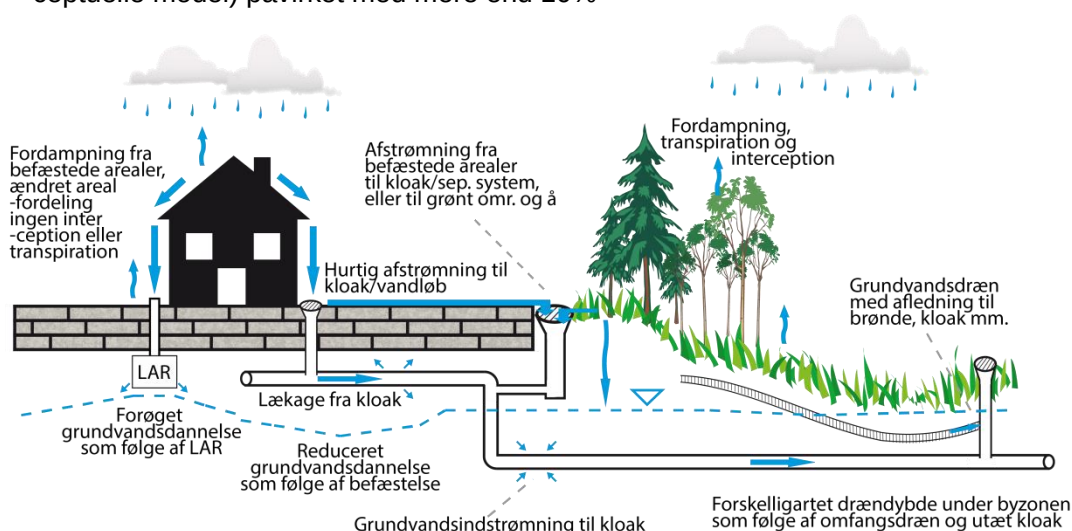
Konceptuel model for byområdet

Før en egentlig modellering igangsættes skal urbane elementer, som kan påvirke det urbane vand-kredsløb, erkendes og analyseres, således at de afgørende vandflukse identificeres. Vandløbene i det urbane rum kan modtage bidrag fra regnvandsafledning, rensed spildevand, overfladisk afstrømning samt grundvand. Før modelopsætning, skal kompleksiteten af den samlede afstrømning analyseres. Fælles, eller separat kloakering vil eksempelvis påvirke afstrømningen, hvor regnvandsafstrømning i separat kloakering typisk løber tilnærmelsesvis direkte til recipient, mens rensningsanlæg vil modtage regnvandsafstrømning ved fælleskloak. Antagelser om, hvor stor en del af vandforbruget, som efter rensning ender i afløbssystemet, kan have større indflydelse for en urban modellering end for modellering af det åbne land. Opstilling af en nøjagtig vandbalance er ikke nødvendig i den indledningsvise kredsløbsanalyse, men et overslag af de ovennævnte bidrag er nødvendig for at identificere de væsentligste modelkomponenter, som sidenhen skal inkluderes i modellen. Valg af modelkode, afgøres bl.a. ud fra kodens evne til at inkludere de væsentligste strømningskomponenter fundet ved opstilling af den konceptuelle model for byområdet. Herunder hører også kodens evne til at kunne opløse de enkelte modelkomponenter på en distribueret eller ikke distribueret måde, alt afhængigt af hvad analysen af den konceptuelle model udpeger som væsentligt. Valg af stationær eller dynamisk model bør bero på formål, datamængde og ambition. Fx vil en stationær model kunne forudsige gennemsnitstrykniveauer, mens en dynamisk kan forudsige maksimum eller minimum situationer. Mens en ren grundvandsmodel, som en MODFLOW version uden rodzone, umættet zone og fordampnings beskrivelse, ikke kan simulere grundvandsdannelse fra den umættede zone til den mættede zone, kan en

hydrologisk model (med beskrivelse af det fulde vandets kredsløb) bruges til beregning af grundvandsdannelse til den mættede zone. Figur 4.8 beskriver de enkelte elementer som kan inkluderes i modelleringen.

Hvornår skal urbane elementer inkluderes i modelleringen:

- Befæstelsen skal detaljeres og inkluderes hvis den vurderes til at påvirke grundvandsdannelsen, eller afstrømning (afhængigt af modelformål). Ned til 10-20 % procent af befæstelse kan være nok til at påvirke hydrologiske flukse. Med under 10 % befæstelse kan detaljering udelades.
- Utætte kloaker kan påvirke grundvandsdannelsen og det øvre grundvandsspejl under urbane områder. Estimering af grundvandsbidrag til kloaksystemer, dvs. en vurdering om kloakken er utæt, er ofte foretaget af det lokale forsyningsselskab. Hvis grundvandsbidraget er signifikant, større end 20% af afstrømningen skal det overvejes, om kloakdybden skal indlægges som drændybde i modellen.
- LAR skal inkluderes i modelleringen hvis grundvandsdannelsen vurderes (i den konceptuelle model) påvirket med mere end 10%



Figur 8 Hydrologiske flukse ved befæstede og grønne områder af byen og de elementer som forårsager de forskellige strømninger. Elementer kan inkluderes/ekskluderes i modelleringen. Figur modificeret fra Kidmose et al. (2015).

Rumlig og tidslig modelopløsning

Afvikling af de hydrologiske processer i det urbane rum er ofte forskellige fra det åbne land. Eksempelvis er afstrømningen fra urbane oplande mere intensiv efter en nedbørhændelse end i det åbne land. Det er en følge af henholdsvis: i) Mindre modstand fra afstrømningsoverflader (reduceret Manningtal), ii) forøget overfladisk afstrømning i forhold til infiltration til grundvandet, som følge af befæstelse, iii) en reduktion af små-skala fordybninger i terrænet i det urbane miljø. Et andet eksempel kunne være rumlig opløsning af LAR scenarier, hvor en opløsning på 10-50 m vil være rimelig. Selvom det er fristende med finere opløsning, evt. i forbindelse med indlæggelse af faskiner, som typisk er mindre end 10x10m, skal det erindres, at anvendte modeldata ikke forefindes med en sådan fin opløsning (se fx nedenstående beskrivelse af geologiske modeldata).

Afhængigt af formålet med modellen, kan det være rimeligt at inkludere processer med en tidslig fin opløsning, men i andre tilfælde vil en grovere tidslig opløsning være tilstrækkelig.

Styrende for valg af tidslig opløsning, udover formål med modellen, må være datatilgængelighed af både klimavariabel (model forcing), men også af observationsdata med en tilpas tidslig opløsning. Et eksempel kunne være modellering af strømmingsektremer i forbindelse med afledning til LAR systemer. Den tidslige opløsning for processen vil her være minutter, eller timer, og til det skal forcing og afstrømningsdata på tilsvarende niveau benyttes. Modelkodens muligheder for at simulere de hydrologiske processer i det urbane rum er også afgørende for valg af tidslig opløsning og tilhørende ambitionsniveau. Som eksempel kan her gives afledning (routing) af vand fra befæstede overflader, som ofte simuleres med en fuld afledning til recipient (vandløb, hav) i samme tidsskridt som vandet på de befæstede overflader opstår. Det kan være en rimelig antagelse, hvis modellen har daglige tidsskridt, eller derover. Dvs. hvis den hydrologiske proces afvikles inden for modellens tidsskridt kan det være en rimeligt, at afstrømningen ledes væk i samme tidsskridt som den opstår. Hvis afledningen derimod forløber over flere efterfølgende tidsskridt er modellens konceptualisering, med den direkte afledning, ikke passende.

Befæstelsen i byområder er varierende, og påvirker i høj grad fordampning, grundvandsdannelse og afstrømning. Nye dataindsamlinger har medført forøget detaljeringsgrad af arealanvendelsen i byområder, således at arealanvendelsen for fx befæstelse kan opdeles i flere kategorier end tidligere. Merværdien ved brug af sådanne, rumligt højoyløselige data, kan eksempelvis være bedre simulering af grundvandsdannelsen.

Modsat arealanvendelsen, som nu kan beskrives med en øget rumlig diskretisering, og nu også inddeles i flere klasser end tidligere, er opløsningen af geologien under byområder generelt ikke finere end tidligere, selvom der findes tilfælde med en urban-geologisk opløsning på ned til 10m. På baggrund af en finere opløst arealanvendelse og topografi kan det derfor være fristende, at opsætte og køre en model i en gridstørrelse på ned til få meters opløsning. Er geologien i relevante lag ikke opløst på en tilsvarende fin skala, er det dog ikke nyttigt at modellere grundvandsstrømning i gridstørrelser på få meter. Relevansen af brug af højoyløselige geologiske data kan bestemmes ved at benytte flere konceptuelle modeller.

Afhængigt af modelformål og diskretisering, skal den overfladenære og antropogene geologi inkluderes i modellen. I områder, hvor overflade geologien udgøres af moræneler, kan den antropogene geologi have afgørende indflydelse på grundvandsstrømningen via sand/grus traceer i forbindelse med veje, kloaker og andre større, sammenhængende bygningsværker. Generelt er geologien dårligt kortlagt under byer. Jordartskort, som repræsenterer geologien 1 m under terræn, er ofte ikke tilgængelig i byområder. Beskrives den overfladenære geologi dårligt, kan det resultere i en fejlagtig beskrivelse af grundvandsdannelsen i modellen. Geologien under de øvre jordarter kan også være mangelfuld grundet ringe geofysisk dækning, da flere metoder ikke kan anvendes under urbane forhold.

Data og observationer

Relevante data for byer er normalt ikke samlet i et nationalt program eller en national database, men eksisterer ofte kun hos lokale interessenter med specielle interesser i eksempelvis afstrømning. Tætheden af indvindinger kan være større ved modellering af byområder, og det foranlediger en detaljeret indlægning af disse i den hydrologiske model, da differensen mellem grundvandsdannelse og indvinding kan være lille. Indlæggelse af indvindinger kan være en udfordrende proces grundet de mange forskellige aktører med indvindingstilladelser (se fx Kristensen et al. 2015). Indberetningen til Jupiter er desværre sjældent komplet.

Informationer og data om det urbane kredsløb fra anden type modellering, eller fra databaser, kan anvendes til bestemmelse af routning af drænvand og afstrømning fra befæstede arealer. Se eksempelvis bestemmelse af befæstelse fra anden modellering i Lund og Lønborg (2015). Under modellering af det urbane kredsløb anbefales det at have speciel fokus på, hvordan og hvortil drænvand og vand fra befæstede arealer afledes (se fx Kristensen et al. 2015). Med hensyn til drændybde anbefales det også, at en vurdering ud fra tilgængelige data foretages. Således kan afvigelse fra en standardiseret og ofte anvendt drændybde på omkring 1m være velbegrundet, se fx Lund og Lønborg (2015). Kloaker er i mange områder utætte og fungerer i realiteten som dræn, men med en mere varierende dybde end dræn i det åbne land. Tillige er omfangsdræn også meget anvendt til afdræning af et højt grundvandsspejl. Omfangsdræn kan ligge flere meter under terræn. Indlæggelse af drænforhold i den hydrologiske grundvandsmodel for et byområde skal derfor dække alle relevante afdræninger af det øvre grundvandsspejl. Databaser og hydrauliske modeller om kloakforhold kan være nyttige til stedlig distribuering af både drændybde og drænkonstant, hvilket ikke har været praksis for modellering af det åbne land.

Kalibrering og scenarier

Før modelopgavens start, skal et overblik over observationsdata skabe grundlag for modellens ambitionsniveau, og parametrisering skal ligeledes defineres ud fra observationsgrundlag, samt mulig indsamling af nye data. Proportionalitet mellem observationstilgængelighed, parametrisering og ambition for modellens prediktive niveau skal være til stede. Parametrisering skal som altid (jf. afsnit 5.a, Datatilgængelighed og parameterisering) defineres ud fra data-tilgængelighed. Hvis observationer ikke findes, kan de indhentes, ellers skal den del af parametriseringen sensitiv overfor eventuelt manglende observationer udelades. Hvis eksempelvis vandføringsdata ikke er tilgængelige, eller kun repræsenterer mindre dele af det urbane opland, anbefales det ikke at kalibrere parametre der erfaringsmæssigt er vigtige for vandbalancen, som vandføringen repræsenterer, hvilket kunne være roddybde eller andre fordampningsrelaterede parametre. En kalibrering af en urban hydrologisk model, bør også indeholde en test af befæstelsesgraden. Kalibreringen kunne også indeholde en test af alternative modeller for den overfladenære geologi. Sammenfattet kan sådanne følsomheds-test/usikkerhedsanalyser af forskellige dele af modellen delvist kompensere for manglende observationsdata. Hvis den opstillede model skal lave forudsigelser om det øvre grundvandsspejl, kan vandstand i søer og vådområder indlægges som observationsdata i kalibreringen, hvis disse vurderes i kontakt med det øvre grundvand.

Lund og Lønborg (2015) giver et eksempel på hvordan en objektivfunktion kan opsættes med alternative observationer, da kun trykniveauer og ikke vandføringsdata er tilgængelige for det modellerede urbane opland. Her anvendes i stedet data for mængder af afdrænet grundvand langs et vejtrace opgjort på årsniveau i en dynamisk modellering. Modellen har indlagt vejdrænet, og simulerede drænmængder sammenholdes med observerede som et led i objektivfunktionen, hvor almindelige pejletidsserier vægtes med 2/3, og afdræningen vægtes med 1/3 i objektivfunktionen.

For urbane områder kan scenarieafvikling være et afgørende formål med modellen, eksempelvis i forbindelse med klimatilpasning. Derfor skal en kalibrering planlægges således, at

modellen optimeres til håndtering af disse scenarier, og findes der observationer som modellen kan optimeres imod, der gør modellen mere velegnet til de valgte scenarier, skal de inkluderes i kalibreringen og valideringen af modellen.

Mulige scenarier som en urban modellering anvendes til og som betænkes i kalibreringen af denne kan være:

- Påvirkning af grundvandsdannelsen fra urbanisering/af-urbanisering (parker og lign.).
- Genetablering af tidligere vådområder og vandløb gennem det urbane område, modellering af det genetablerede urbane vandkredsløb (overfladevand – grundvand).
- Effekter af reduceret/forøget grundvandsindvinding på overfladenært grundvand, potentiel trussel mod infrastruktur og bebyggelse.
- Udveksling mellem kloak og regnvands-aflednings systemer og grundvandet.
- Klimaeffekter på overfladevand og grundvand.
- Klimatilpasningseffekter
 - Forceret infiltration på parcel skala eller samlet i større infiltrationsbassiner, afledning af regnvand fra veje og påvirkning af grundvandsspejl.
 - Grønne områder, effekter på vandets kredsløb.

Tabel 18 giver et synopsis af forskelle mellem hydrologisk modellering af det åbne land og byområder.

Anbefalinger

- Et opland skal betragtes som urban, når lokale menneskelige (antropogene) påvirkninger ændrer de hydrologiske flukse væsentligt, hvilket betyder, når befæstelse ændrer afstrømningsintensitet, fordampning, eller når rørlægning af vandløb eller LAR påvirker udveksling med grundvand. I den definition ligger også, at mindre byområder kan ændre et større oplands hydrologiske flukse.
- Der bør indhentes viden om geologi, afstrømningsnetværk (fysisk beliggenhed, koter, tværsnit) og befæstelse fra eksempelvis forsyninger, kommuner, regioner og rådgivere (udover de normale datakilder som fx Jupiter).

Tabel 18 Forskelle mellem hydrologisk modellering af det åbne land og byområder

	Det urbane område	Det åbne land
Overfladisk afstrømning og af regnvand afledning	Hurtig afstrømning efter nedbør, minut til time. Rørførte åsystemer Kunstig afledning til LAR, regnbede mm..	Afstrømning på dagsniveau. Delvist naturlige åsystemer
Grundvandsdannelse	Reduceret under befæstede arealer. Kan modvirkes ved LAR.	Almindelig grundvandsdannelse
Geologi	Kan være domineret af antropogen geologi, fyld materialer mm. Specielt hvor der ses kontrast mellem denne og oprindelig geologi	Antropogen geologi betyder typisk mindre
Geologisk kortlægning	Både overfladenær og dybere geologi kan være dårligt bestemt under byområder (svært at anvende geofysik)	Standard kartering af overflade og geofysisk kortlægning kan anvendes i det åbne land
Afdræning/ Grundvandsdræn	Både omfangsdræn og utætte kloaker skaber distribueret drændybde. Ligeledes distribueret drænkstanter og de to ovennævnte forhold.	Mere ensformig afdræning af Agerjord og mindre byers distribuerede afdræning betyder mindre for modelleringen af afstrømning og grundvandsstand
Fordampning	Befæstede områder. På 100% befæstede områder er der ingen transpiration og jordfordampning. Kun fordampning fra interception, dvs. fra våde overflader (Fx tag, vej)	Fordampning, transpiration, jordfordampning, interceptionstab.
Arealanvendelse	Urbane typer af grønne områder. Fx 35 % befæstede og 65 % delvist grønne områder	Agerjord med sæsonafgrøder

Referencer og baggrundslitteratur

- Elga S, Bronders J, Batelaan O. 2015. Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. *Journal of Hydrology* 529. 62-81.
- Levin, G., Jepsen, M.R., Blemmer, M. 2012. Basemap, Technical documentation of a model for elaboration of a land-use and land-cover map for Denmark. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy. Technical Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy No. 11. Tilgængelig: <http://www.dmu.dk/Pub/TR11.pdf>. [besøgt den 24. Januar 2016]
- Kidmose J, Trolborg L, Refsgaard JC, Bischoff N (2015) Coupling of a distributed hydrological model with an urban storm water model for impact analysis of forced infiltration. *Journal of hydrology*, 525, 506-520.
- Kristensen M, Hansen S, Lønborg MJ. 2015. Hydrologisk model Herlev Glostrup. Modeldokumentation. Rekvirent: Naturstyrelsen.
- Lund PG og Lønborg MJ. 2015. Hydrologisk Model Tårnby-Dragør. Tårnby-Dragør kortlægningsområde. Rekvirent: Naturstyrelsen.
- Christensen BSB. 2015. Smørum-Ballerup hydrologisk model. Rekvirent: Naturstyrelsen.

5.13 Modellering af indvindingsoplande

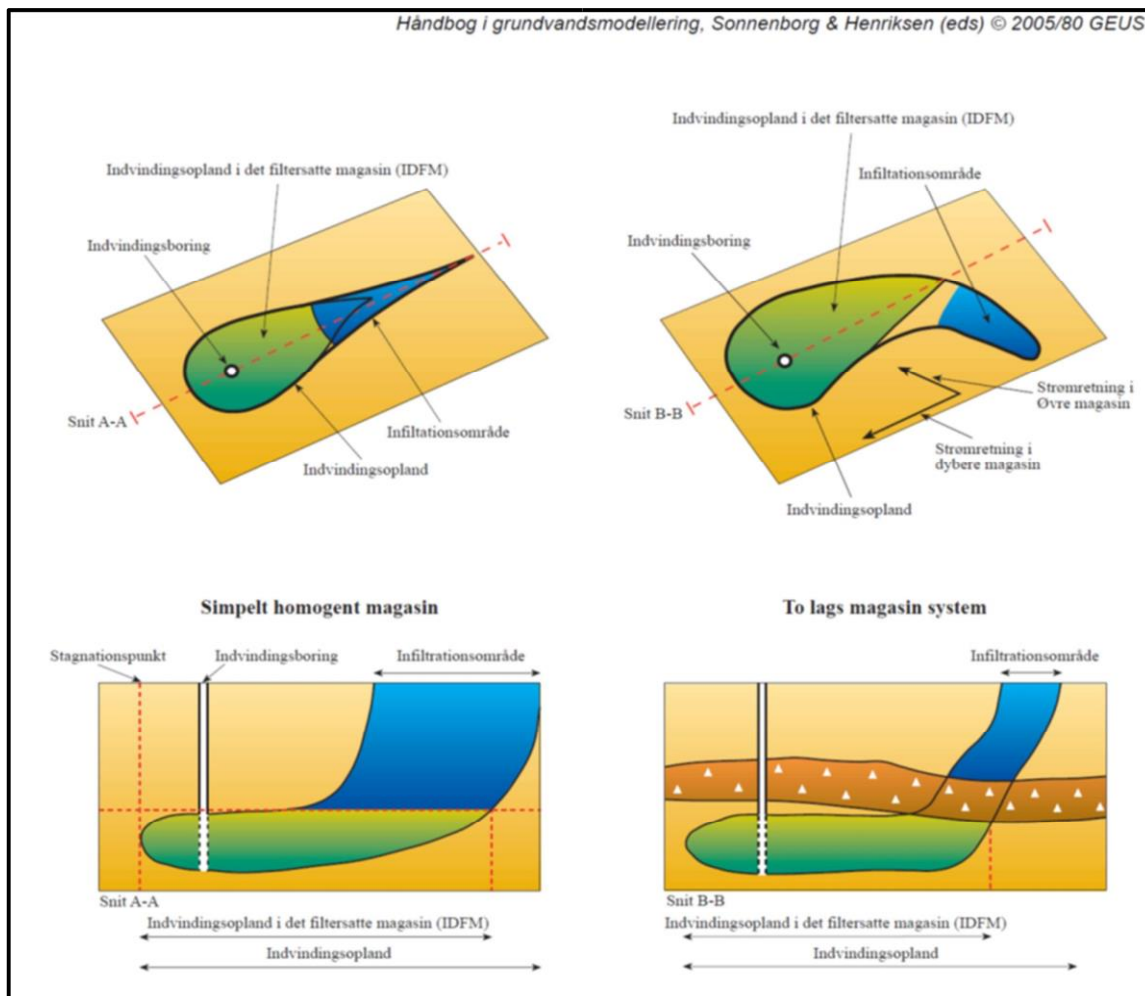
Definitioner

Indvindingsoplandet er defineret som det areal (2D) projiceret på jordoverfladen som udgøres af vandets strømningsveje (3D) fra grundvandsspejl til boringens filter svarende til definitionen benyttet i Håndbog i grundvandsmodellering (Sonnenborg og Henriksen, 2005). Traditionelt har indvindingsoplandet ofte kun være afgrænset af strømningsvolumenet i det filteratte magasin (IDFM), mens den nu anvendte definition er mere omfattende. IDFM er således kun en delmængde af indvindingsoplandet, og for at undgå forvirring om oplandsafgrænsninger anbefales det IDFM undlades af beregningerne/optegningerne (Figur 9).

Grundvandsdannende opland er defineret som det areal (2D) projekteret på jordoverfladen, hvor grundvandsdannelsen af det vand, som strømmer videre til boringens filter, pågår. Det grundvandsdannende opland er således en delmængde af indvindingsoplandet.

Såvel det grundvandsdannende opland som indvindingsoplandets form vil være påvirket af den geologiske heterogenitet, variabilitet i terræn og terrænnære strømnings- og vandspejlsvariationer, herunder tidlige variationer i nedbør, fordampning og afstrømning til dræn og vandløb. For simple problemstillinger kan der findes analytiske løsninger til afgrænsning af indvindingsoplandet, men generelt er det nødvendigt at opstille en tre dimensional strømnings- og partikelbanemodel, hvis der skal opnås realistiske estimater.

Tidsafgrænset indvindingsopland er defineret som den delmængde af indvindingsoplandet, hvor transporttiden til boringens filter er mindre end en given tidsgrænse. Et tidsbegrænset indvindingsopland er således en afgrænsning tæt ved boringens filter, hvis der anvendes en lille tidsgrænse, og nærmer sig hele indvindingsoplandet jo større tidsgrænse, der anvendes. Beregning af tidsafgrænset indvindingsopland er således udover de forhold, der påvirker afgrænsning af indvindingsoplandet, også påvirket af porøsiteten og dens heterogenitet. Afgrænsning af et tidsbegrænset opland er ikke ukompliceret, og bør derfor aldrig opgøres uden samtidigt at have opgjort hele indvindingsoplandet. Som støtte kan beregnede transporttider i et indvindings opland sammenlignes med vandkemi og andre informationer om grundvandets alder. Hvis der er afvigelse mellem grundvandstransporttid fra grundvandsdannelse til boringsfilter tolket på basis af grundvandskemi/datering og modelberegninger, bør de anvendte værdier for effektiv porøsitet genovervejes. Det skal bemærkes at dette ikke ukritisk udelukkende bør føre til en kalibrering af porøsiteten indtil transporttiden passer med grundvandskemi/datering, da mange andre ting end porøsiteten kan påvirke eventuelle afvigelser.



Figur 9. Definition af indvindingsopland og grundvandsdannende opland (infiltrationsområdet). IDMF, der vises med grøn, anbefales generelt ikke anvendt i oplandsafgrænsning arbejde. Det grundvandsdannende (infiltrationsområde) opland er markeret med blå farve, mens det samlede indvindingsopland er afgrænset med sort streg på figuren. (Gengivelse af figur 17.5 fra Sonnenborg og Henriksen, 2005)

Særlige modeltekniske opmærksomheds emner

For at modellere indvindingsoplande vha. partikelbane simulering på baggrund af en kalibreret 3D hydrologisk model skal der tages særskitl stilling til følgende elementer:

- Vurdering af den hydrologiske models egnethed ift. anvendelse til simulering af indvindings- og grundvandsdannende oplande
- Porøsitet, som ikke indgår i kalibrering af hydrologisk model
- Partikel registrerings afstand fra filter (delvist relateret til modelusikkerhed)
- Partikel intensitet - hvor mange partikler er det nødvendigt at anvende i modellen for at sikre en stabil løsning (i tid og rum)
- Vurdering af modelusikkerhed, hvilket også omfatter mulighed for vurdering af transport karakteristika mod vandkemiske / tracer data.

Vurdering af model egnethed

Det forventes at modellen generelt er opstillet og kalibreret efter anbefalingerne i denne rapport, men ift. beregning af oplande er det særligt vigtigt at forholde sig til vandspejlsgradienter

og vandbalance. Potentiale vurdering og de udfordringer, der er i den forbindelse, er udførligt beskrevet i Geovejledning 4 (Mielby et al., 2009). Specielt vandbalance problematikken gør, at det generelt må anbefales at anvende en dynamisk model under opstilling og kalibrering af den hydrologiske model (se afsnit 5.1).

Til gengæld kan det ikke altid forventes, at modellens diskretisering er optimal ift. alle relevante konceptuelle problemstillinger ifm. transport modellering. Specielt strømningsbilledet tæt ved indvindingsfiltreret kræver ideelt set meget små celler, men konceptuelt overkommes dette ved at antage, at vand som entrerer en beregningscelle med indvindingsfilter også havner i indvindingsfiltreret. Dette er principielt kun tilfældet ved balance mellem vandtilstrømning til cellen og indvindingens størrelse (også kaldet strong sink). Typisk er der to problemstillinger, der bør overvejes, dels om der er meget tykke beregningslag som enten kun er delvist filtersatte (eksempelvis kalklag eller beregningslag med grupper af kvartære og miocæne magasiner), og dels om der er beregningslag med præfentiel strømning (eksempelvis opsprækket del af kalk). De to problemstillinger er begge af konceptuel karakter og kan i praksis løses ved at underopdele det pågældende beregningslag i flere beregningslag, jo flere beregningslag des større chance for succes. Numerisk kan der være udfordringer med at underopdele magasinlag, hvis det ikke sikres at der er lige afstand mellem de enkelte flader, fordi store variationer i lagtykkelser kan give problemer med fejlagtige partikel flytninger (Sonnenborg & Henriksen 2005, Zheng 1994).

Porøsitet

Effektiv porøsitet er defineret som procenten af porevolumen hvor vand og andre væsker kan bevæge sig igennem en bjergart eller magasin. Effektiv porøsitet kan variere meget indenfor en bestemt bjergart eller et grundvandsmagasin, og det er ofte meget svært at estimere effektiv porøsitet for et givent modelområde. Effektiv porøsitet er typisk ikke en parameter som anvendes hverken til kalibrering eller validering af en model, eftersom den ikke påvirker simuleret potentiale, vandføring eller vandbalance.

Der er et stort naturligt spænd i værdier for porøsitet (Tabel 19). De værdier, der anvendes for effektiv porøsitet i en grundvandsstrømningsmodel kan have en stor betydning for de beregnede transporttider fra overfladen/vandspejl til en indvindingsboring. For dobbeltporøse magasiner, som opsprækkede kalkaflejringer, er effektiv porøsitet en blanding af den primære (matrixen) og den sekundære (sprækker) porøsitet. Generelt er den beregnede transporttid gennem grundvandsmagasiner ligefrem proportionalt med den effektive porøsitet, der benyttes i modellen. Dette er især af betydning, når man afgrænser indvindings- og grundvandsdannende oplande efter en bestemt transporttid (dvs. administrative oplande).

Tabel 19 Spænd for effektiv porøsitet i danske aflejringer

Geologisk lag	Specifik Ydelse (%)	Effektiv Porøsitet (%)
Ler	1 – 18	30 – 60
Moræneler	1 – 20	10 – 30
Silt (morænesilt)	5 – 20	35 – 50
Sand	10 – 30	25 – 40
Grus	15 – 30	20 – 35
Sand og grus (usorteret)	10 – 30	15 – 35
Kalk - primære (matrix)	0,5 – 5	5 – 30
Kalk – sekundære (sprækker)	0,1 - 5	0,1 - 5
Opsprækket Kalk (dobbeltporøse)	0,1 – 5	0,1 - 15
Sandsten	5 – 15	5 - 30

Partikel registrering

For at simulere grundvandsstrømningen helt tæt på indvindingsboringen korrekt, skal cellerne som nævnt ideelt set være meget små. Men hvor det i teorien måske er muligt at simulere den helt boringsnære sænkningstragt, så er det i praksis problematisk, fordi den geologiske tolkning sjældent inkluderer småskala heterogenitet (yderst sjældent under den typiske i grundvandskortlægnings sammenhæng anvendte model skala på 100 m). Generelt må det derfor antages, at alt vand der kommer i kontakt med en beregningscelle, hvor der er placeret et filter i modellen, potentielt vil kunne havne i filteret, uanset indvindingens størrelse.

I tilfælde med meget kraftig indvinding ift. celle størrelse må det endvidere forventes, at vand som entrerer celler tæt ved filter cellen også potententielt kan havne i filteret. Hertil kommer, at der i disse tilfælde formodentligt vil være kraftige gradienter i modellen, som derfor ikke vil være robust for så vidt angår partikelbane transport (meget små registrerings afstande / initial placeringer giver meget forskellige resultater). For disse tilfælde kan det være nødvendigt at udvide registrerings-/initialiserings zonen for at sikre en "stabil løsning".

Det skal bemærkes, at begge løsninger kan medføre, at der ikke nødvendigvis er sammenhæng mellem indvindingens størrelse og størrelsen af det grundvandsdannende opland (eller rettelig størrelsen af arealet gange nettotilstrømningen til grundvandsspejlet), hvilket må accepteres for meget små indvindinger eller observations filtre. For større indvindinger er det typisk kun ved meget tykke beregningslag, at det vil give problemer (ved 100 m skala). Antallet af ekstra beregningslag udvides, indtil der er nogenlunde overensstemmelse mellem indvindingsstørrelse og det grundvandsdannende opland.

Partikel intensitet

Det er vanskeligt at give præcise retningslinjer for hvor mange partikler, der skal anvendes i modellen for at sikre stabile løsninger, men stabiliteten kan testes ved at der gradvist tilføres flere og flere partikler i modellen (med partikler tilfældigt placeret på celle niveau). Ved for få tilførte partikler vil oplandene have en erratisk diskontinuert karakter, jo flere partikler der

tilføres des mere homogen løsning. Antallet af partikler må antages at være tilstrækkeligt, når oplandet ikke udvikler sig ved yderligere tilførsel af partikler. Dette gælder for så vidt både for tilførsel i rum og tid (i det tilfælde at der anvendes en dynamisk model), men under danske forhold er det i praksis primært partikel densiteten i rummet, som er interessant. Dette skyldes formodentligt at de tidslige variationer i modellen (gradient/potentiale/nettonedbør) typisk er meget mindre end transporttiden fra grundvandsspejl til filter (Iversen et al, 2011).

Transporttidsfordeling

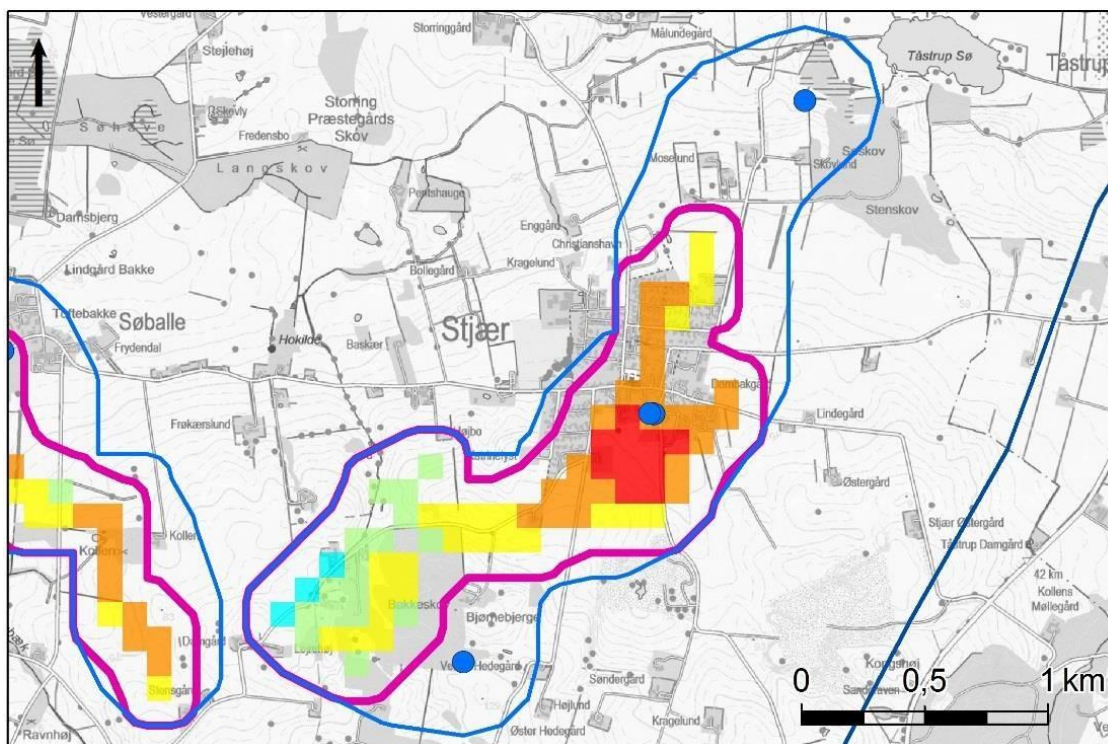
Ifølge GeoVejledning 6 (Hansen et al, 2009) er der flere parametre, der kan bruges til vurdering af grundvandsalderen. Blandt andet vandtype, sulfat indhold, ionbytningsgrad, fluorid indhold, magnesium/calcium forhold, og tilstedeværelse af pesticider kan bruges til at få en relativ vurdering af grundvandets alder. Disse parametre kan således bruges til at kvalitetssikre modellens beregning af partiklens alder på de partikler der ender i indvindingsboringen. Ofte kan der dog være udfordringer i denne type model-observations sammenligninger, idet udviklingen af stabile grundvandskemiske forhold i indvindingsoplandene potentielt kan tage lige så lang tid som de længste transporttider fra grundvandsspejl til filter, og samtidigt er det sjældent, at de hydrologiske forhold er upåvirkede over så lange perioder (Iversen et al., 2011). Eksempelvis er der typisk sket en udvikling i indvinding, udbygning af kildepladser eller lignende som vil påvirke strømningsbilledet relativt hurtigt, mens transporten i dette nye strømningsbillede kan tage dekader før den bliver stabil.

For at få et korrekt billede af transporttids fordelingen af vandet der potentielt strømmer til filteret er det desuden vigtigt enten, at antallet af partikler som starter i modellens øverste lag er proportionalt med infiltrationens størrelse eller at de enkelte partiklers transporttid der indgår i transporttidsfordelingen vægtes proportionalt med grundvandsdannelsens størrelse. Hvis formålet udelukkende er at afgrænse de grundvandsdannende områder så kan der derimod benyttes et fast antal partikler i modellens øverste lag.

I Figur 10 er vist et eksempel på visualisering af indvindingsopland, grundvandsdannende opland og transporttider.

Håndtering af model usikkerhed og scenarier

Henriksen et al. (2011) har lavet en opsummering af en række forskellige usikkerhedsaspekter i forbindelse med modellering af indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande. Særligt fremfører Henriksen et al. (2011) at kravene til en models nøjagtighed skal udformes som kvalitative og kvantitative kriterier i modelleringsprocessen, og at det skal ske i et samspil mellem modellør, vandressourceforvalter og interessenter.



Figur 10 Indvindingsopland (blå afgrænsning), grundvandsdannende opland (lilla) og transporttider (farvelagte grid) [figur modificeret fra <http://www.stjærvand.dk/index.php/grundvand> fra okt.2016]

Ofte er samspillet mellem modellør, vandressourceforvalter og interessenter en udfordring, som stiller særlige krav til visualiseringen. I det omfang at usikkerheder og scenarier beskrives kvantitativt er betydningen overfor oplandsafgrænsningen det centrale element. Det er en stor fordel, at kunne definere en reference modelkørsel således, at forskellige usikkerheds- og scenarie resultater kan visualiseres sammen med indvindings- og grundvandsdannende opland fra reference modelkørslen. Typisk er en polygon afgrænsning af reference modelkørselens indvindingsoplandet interessant, men alle modelresultater bør generelt visualiseres enten i modellens grid opløsning eller ved partikelbaner/partikel initialiserings punkter. Eksemplet fra Figur 10 indeholder en visualisering af transporttider og grundvandsdannende oplande sammen med optegning af indvindingsoplandet, men transporttiderne kunne i princippet ligeså godt have været realisations udfald af grundvandsdannende oplande fra en række scenarie- eller usikkerhedskørsler.

Anbefalinger

- Der bør anvendes en hydrologisk model hvor, der i kalibreringen er taget specielt hensyn til at modellen skal kunne anvendes til afgrænsning af grundvandsdannende oplande og indvindingsoplande.
- Alle partikler, som entrerer en beregnings celle med filter, skal registreres og medtages i beregningen af oplande til filteret for så vidt angår "forward" partikelbane simuleringer. Tilsvarende for "back-ward" partikelbane simuleringer anbefales det at frigive partikler langs filtercellens 6 vægge / alternativt tilfældigt indenfor filter cellen.
- Partikler intensiteten anvendt til oplandsafgrænsningen bør fastsættes via test med modellen, og i afrapporteringen skal angives hvilke overvejelser der er gjort omkring partikelintensiteten, f.eks. er minimumsantallet af partikler per celle bestemt ved at

ekstra tilførsel af partikler ikke ændre oplandets størrelse med mere end 5%. Det skal bemærkes at alle celler med mindst en registreret partikel skal medregnes i oplandets afgrænsning i denne analyse, hvor man administrativt kan vælge at lægge sig fast på et andet niveau (af antal partikler pr celle) i den endelige afgrænsning.

- Visualiseringen bør altid som minimum indeholde afgrænsning af indvindingsopland og grundvandsdannende opland og transporttidsfordelingen fra grundvandsspejl til filtercelle. Generelt anbefales det at benytte betegnelsen transporttidsfordeling frem for aldersfordeling for at undgå misforståelser.
- Partiklernes vægtede transporttider til indvindingsboringer bør sammenlignes med grundvandskemiske parametre fra de pågældende boringer. Hvis der ikke er overensstemmelse mellem de beregnede transporttider og miljøtracere (CFC, Tritium, Pesticid, Nitrat...), skal der redegøres for forskelle.
- Kvantitative usikkerheder på oplandsberegninger skal altid visualiseres sammen med indvindingsoplandet og det grundvandsdannende opland fra en reference modelkørsel. Generelt anbefales det, at modelresultater visualiseres enten i modellens grid opløsning (f.eks. usikkerheder) eller ved partikelbaner/partikel initialiserings punkter (f.eks. transporttider)

Referencer

- Hansen B, Mossin L, Ramsay L, Thorling L, Ernsten V, Jørgensen J, Kristensen M (2009) Geovejledning 6. Kemisk Grundvandskortlægning. GEUS Særudgivelse 112 pp
- Henriksen HJ, Iversen CH, Wernberg T (2011) Geovejledning 2, delrapport 3. Usikkerheder på indvindings- og grundvandsdannende oplande. GEUS Særudgivelse. 44 pp.
- Iversen CH, Troldborg L, Møller RR, Christensen S (2011) Geovejledning 2, delrapport 2. Dynamiske og stationære oplandsberegninger udført med tre semi-syntetiske modeller. GEUS Særudgivelse. 88 pp.
- Mielby S, Ditlefsen C, Olesen H (2009) Geovejledning 4, Potentialekortlægning, vejledning i udarbejdelse af potentialekort. GEUS særudgivelse 69 pp.
- Sonnenborg TO, Henriksen HJ (2005) Håndbog i grundvandsmodellering. GEUS rapport 2005/80.
- Zheng C (1994). Analysis of particle tracking errors associated with spatial discretization, Ground Water, 32(5), 821-828

5.14 Modellering af grundvandsdannelse til specifikke magasiner

Nærværende afsnit har fokus på modelbaseret bestemmelse og karakterisering af grundvandsdannende områder til et specifikt magasin⁴. Afsnittet indledes med definitioner, beskrivelser og udfordringer bl.a. i relation til stationære og dynamiske modeller, herunder beskrivelse af data, der kan understøtte 3D strømnings- og partikelbanesimulering ved brug af dynamiske, integrerede grundvands-overfladevandsmodeller, med henblik på vurdering af beskyttelsesindsatser i de mest sårbare områder vurderet i forhold til et specifikt magasin.

Definitioner og beskrivelse

Nettonedbør (NN) defineres som "forskellen mellem nedbør og aktuel fordampning, altså den vandmængde som samlet set tilgår det hydrologiske system til grundvandsdannelse og afstrømning"⁵.

Grundvandsdannelse (G_{SZ}) defineres som "det vand, der strømmer fra den umættede zone igennem vandspejlet til mættet zone" (dvs. fra umættet zone - UZ til mættet zone - SZ jf. Freeze and Cherry (1979); heri kan evt. være indeholdt bidrag fra overfladisk afstrømning - OL).

Vandudveksling ($VU_{x,x+1}$): defineres som "den vertikale flux" mellem to modellag i mættet zone (indicies x og $x+1$ angiver at der kan være et antal vertikale fluxe mellem ovenfor- og underliggende beregningslag i en flerlagsmodel).

Magasinspecifik grundvandsdannelse (MG_i) defineres som "grundvandsdannelse ved vandspejl (umættet $\rightarrow$ mættet zone), der bidrager til grundvandsdannelse til et specifikt magasin" (index i angiver et specifikt magasin fx KS2).

Vandbalanceforhold og dermed nettonedbør, grundvandsdannelse og vandudveksling udviser stor variabilitet i tid og sted, sæsonmæssigt, fra år til år og i længerevarende trends eller cyklusser, dels som følge af klimaeffekter og dels som følge af naturlige variationer. Disse forhold skal håndteres, hvis man skal foretage en udpegning af grundvandsdannende områder til specifikke magasiner, herunder udpegning af de områder der bidrager til den største grundvandsdannelse, og hvor transporttider er mindst. Dynamiske, integrerede grundvands-overfladevandsmodeller kan holde styr på vandbalance, vandspejlsforhold/magasiner og afstrømning på overfladen, i umættet og mættet zone, og inddrage forskellige kilder og dræn i forhold til mættet zone (SZ). Fra den dynamiske grundvands-overfladevandsmodel bør man

⁴ Afgrænsningen af sårbare zoner tager jf. Zoneringsvejledningen udgangspunkt i grundvandsdannelsen. Størrelsen og den arealmæssige fordeling af grundvandsdannelsen vurderes ud fra den opstillede hydrologiske model.

⁵ Vandbalancen bygger fundamentalt set på en massebalance betragtning ($IND = UD + \text{magasiner}$) der kan opstilles for et opland eller for rodzonen for en arealenhed. I den simpleste form antager man, at nedbøren N der falder på vegetation og jordoverflade i form af (regn, sne, hagl) *balanceres* af summen af fordampningen EA (interception, transpiration og evaporation) og *afstrømningen* Q (overfladisk, overfladenær og grundvand) samt *magasineringen* M (i den tidsperiode man kigger på). Det vil sige man kan opstille en generel vandbalance ligning: $N = Q + EA + \Delta M$. Hvis man her antager at ændringen i magasineringen for en valgt periode svarer til 0, når man frem til at $N - EA$ (nettonedbøren) *balanceres* af Q (afstrømningen). Hvis ikke der sker afstrømning til dræn og vandløb vil 100 % af afstrømningen fra rodzonen i dette tilfælde ske som grundvandsdannelse til mættet zone.

(EU guidance doc, 2015)

udtrække nettonedbøren (NN) over en bestemt tidsperiode, som forskellen mellem nedbør og samlet aktuel fordampning, og bruge det som input til fx en stationær grundvandsmodel ((incl. evt. vanding i markvandsområder mm. samtidig med at man skal tjekke at magasinering ikke giver fejl på vandbalanceinput til den stationære model). Alternativt, såfremt man ønsker at sammenligne simuleret grundvandsdannelse til mættet zone, kan man evt. udtrække grundvandsdannelse til mættet zone (fx total recharge SZ i MIKE SHE: G_{SZ}).

Helt stringent er NN det bedste bud på input til den samlede vandbalance og dermed input til grundvandsdannelsen til den stationære grundvandsmodel.

I udtræk af G_{SZ} indgår omfordeling (mellem SZ og OL, samt evt. bypass flow/macropore flow). I så fald sætter man typisk grids med negative G_{SZ} værdier til 0 (typisk grids i ådale), men G_{SZ} kan derudover indeholde grids med grundvandsdannelse fra OL til SZ, med ret store værdier lokalt, ligesom at der kan være fordampning fra SZ⁶. Derfor bør man benytte NN i stedet for G_{SZ} som input til den stationære grundvandsmodel når man modellerer indvindings- og grundvandsdannende oplande.

Hvor stor en del af nettonedbøren (NN) der siver videre ned og tilgår grundvandsforekomster (MG) afhænger af de hydrogeologiske forhold. Det øverste modellag vil ofte have en del vandudveksling med overland flow (omfordeling af nedbøren), afstrømning til dræn og vandløb og evt. udveksling med UZ som følge af fx fordampning i ånære områder med højt grundvandspejl. Man kan evt. plotte vandudvekslingen mellem modellag 1 og 2 i mættet zone (VU_{12}) og sammenligne med et plot af NN og/eller G_{SZ} for at illustrere hvor stor en del af grundvandsdannelsen der siver dybere ned i forhold til den del der tilgår mættet zone.

Eksempel Langeland modellen (Rambøll, 2016)

Som supplement til den grundvandsdannelse, der er udtrukket ved top af magasin (vandudveksling i forhold til ovenfor beliggende modellag), er der beregnet magasin specifik grundvandsdannelse fra terræn til hvert af magasinerne på Langeland (Figur 11).

Hvor vandudveksling trækkes ud direkte fra modellen, er sidstnævnte beregnet ved en kombination af partikelbanesimuleringer og grundvandsdannelsen ved terræn. Ved metoden er partikler i eksemplet for Langeland placeret ved toppen af modellag 1 og modellag 2.

Der er i eksemplet for Langeland anvendt 50 partikler ved toppen af modellag 2, og 50 partikler ved toppen af modellag 1. Partiklerne følges fra overfladen til de registreres i magasinerne. Nogle af startpartiklerne når aldrig ned i et magasin, fordi de eksempelvis strømmer af til vandløb eller fjernes via dræn. For hver modelcelle udregnes den procentdel af partiklerne, $PT_{RegMagasin}$, der ender i et magasin.

$$PT_{RegMagasin} = N_{magasin} / N_{terræn}$$

hvor

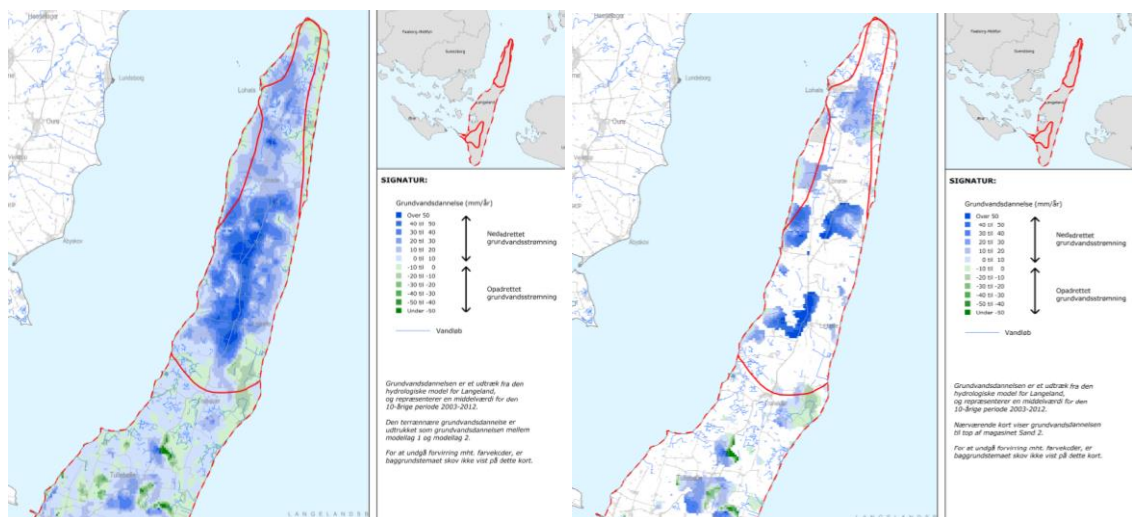
$N_{magasin}$: antallet af partikler fra en modelcelle, som registreres i det pågældende magasin,

$N_{terræn}$: det oprindelige antal partikler, der blev lagt ind i den pågældende modelcelle ved terræn

Grundvandsdannelsen ved terræn til mættet zone, G_{SZ} , benyttes derefter til at beregne magasin specifikke grundvandsdannelse fra terræn til magasinet, MG_i som følger:

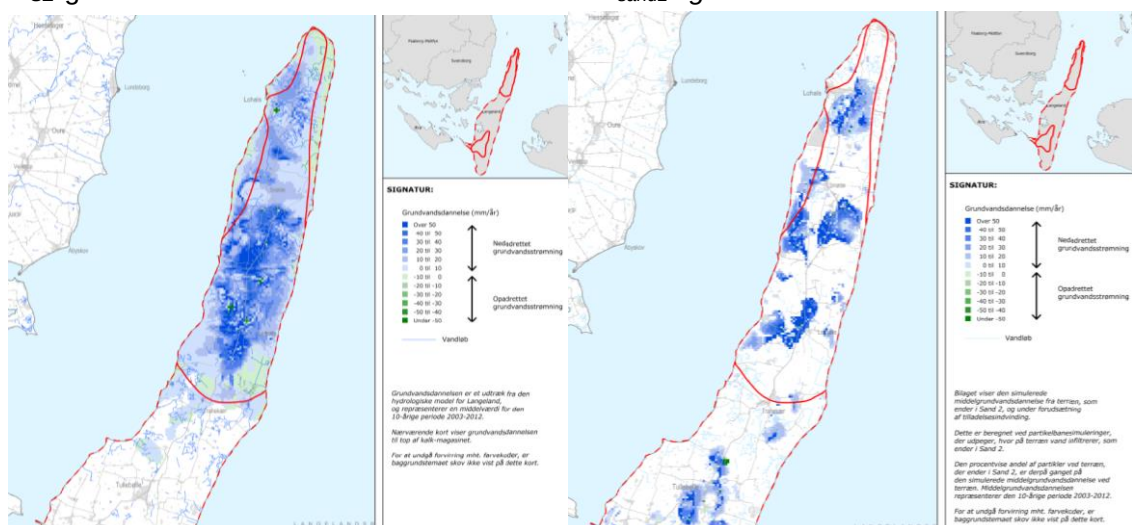
$$MG_i = G_{SZ} * PT_{RegMagasin}$$

⁶ Total recharge til SZ (positiv nedadrettet) er jf. MIKE SHE terminologi summen af følgende led: udveksling fra umættet (UZ) til mættet zone (SZ). Evt. bypass eller macropore flow til SZ (hvis aktiveret), Udveksling mellem overflade komponent (OL) og SZ (hvis der står vand på terræn) samt fordampning (transpiration) fra SZ.



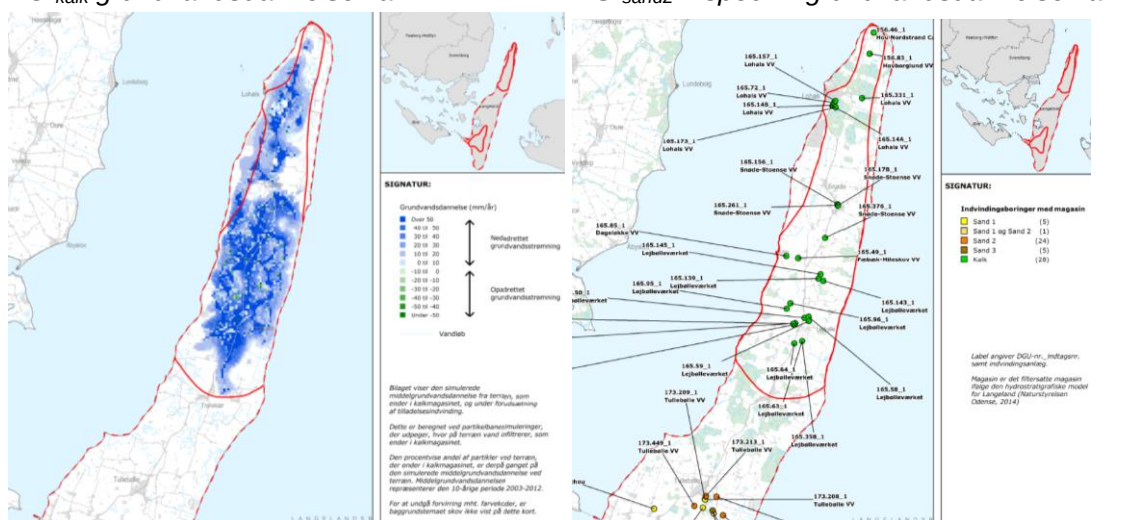
Gsz grundvandsdannelse SZ

VU sand2 - grundvandsdannelse Sand 2



VU kalk grundvandsdannelse kalk

MG sand2 – specifik grundvandsdannelse kalk



MG kalk specifik grundvandsdannelse kalk

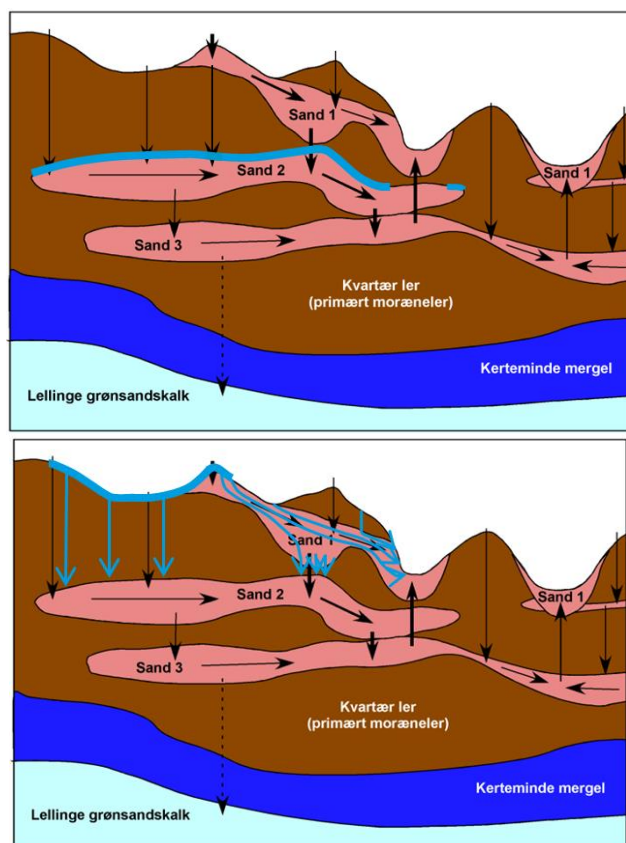
Placering af indvindingsboringer med magasin

Figur 11. Eksempel på Gsz, VUsand2 og VUkalk samt MGsand2 og MGkalk på baggrund af 3D strømnings- og partikelbanesimulering for Langeland modellen (Rambøll 2015).

I Figur 12 er forskel på grundvandsdannelse vurderet ud fra vandudveksling med ovenfor beliggende modellag og magasin specifik grundvandsdannelse illustreret på et tværprofil.

De sorte pile på figuren viser vandets generelle strømning mellem lagene i modellen jf. VU. Hvor pilene er nedadrettede strømmer vandet ind i magasinet fra det overliggende lag, og hvor pilene er opadrettede, strømmer vand ud af magasinets top. Den tykke lyseblå streg i Figur 12 til venstre viser områder hvor der strømmer vand til top af Sand 2-magasinet fra overliggende lerlag (VU_{KS2}). På Figur 12 til højre, er der tilføjet blå pile på principskitzen, som viser vandets strømningsvej fra terræn til magasiner. Her kan man se, at ikke alt vand, der dannes til Sand 1-magasinet, strømmer videre til Sand 2-magasinet, idet noget ender med at strømme ud på terræn igen.

Den tykke lyseblå streg på terrænoverfladen på Figuren til højre viser det område hvor grundvandsdannelsen ved terræn ender i Sand 2-magasinet. Når man sammenligner højre og venstre figur, ses det, at der er markant forskel på beliggenheden af det område, hvor der sker strømning til Sand 2-magasinet fra det overliggende lerlag (grundvandsdannelse ved top af magasin, VU_{KS2}), og det område, hvor der sker grundvandsdannelse fra terrænet til Sand 2 (MG_{KS2}).



Figur 12. Principskitse af vandudveksling mellem lagene i en hydrologisk model (grundvandsdannelse ved top af magasin). De sorte pile viser de relative vertikale gradientforhold. De tykke lyseblå streger på figuren til venstre viser områder, hvor der er positiv (nedadrettet) vandudveksling mellem Sand 2 og det overliggende lag – VU_{KS2} (moræneler). Den tykke lyseblå streg ved terræn på figuren til højre viser det område, hvor der sker grundvandsdannelse fra terræn til Sand 2-magasinet – MG_{KS2} (Kilde: Rambøll 2016).

Understøttelse af model med data der kan styrke og validere simulering af grundvandsdannelse

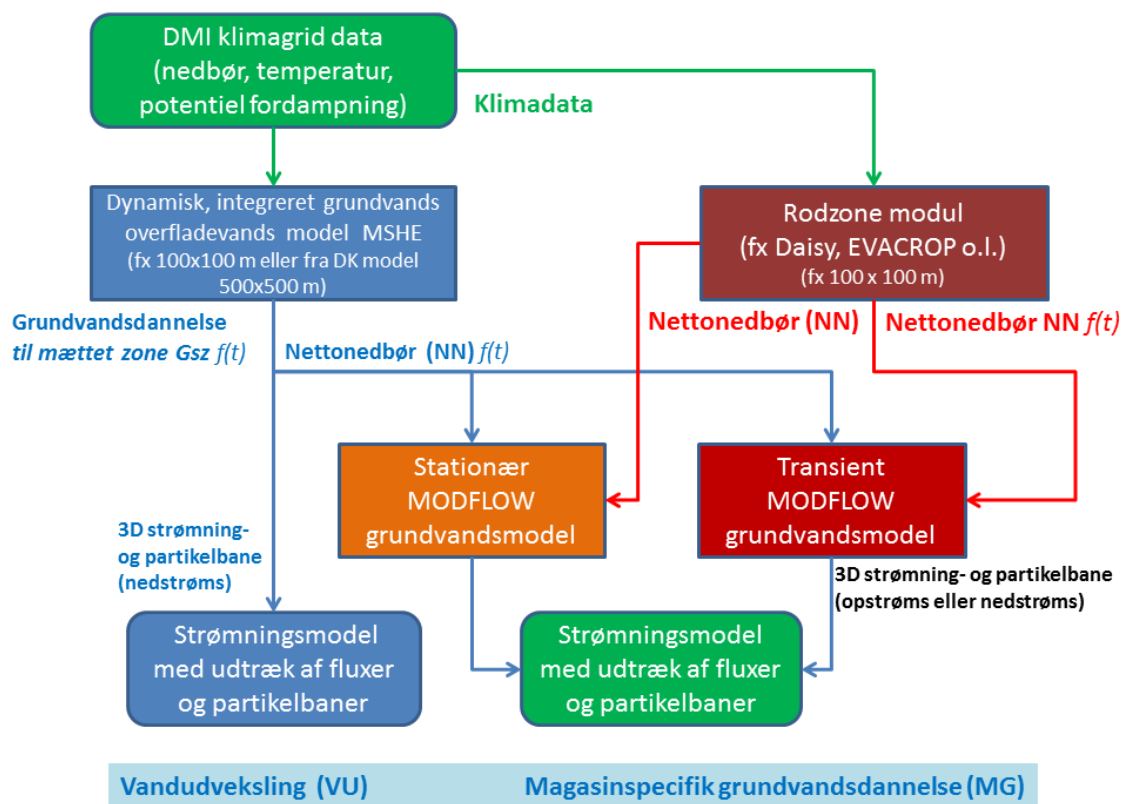
Som vist i Tabel 21 kan mange mulige metoder bringes i spil for at understøtte den numeriske stationære grundvandsmodels eller dynamiske, grundvands-overfladevands models bestemmelse af grundvandsdannelsen. Feltmetoder vil altid være et værdifuldt supplement til modelbaserede metoder og *vice versa*.

Tabel 21 Oversigt over metoder til estimering af vandbalance og grundvandsdannelse (Scanlon et al. 2002; Anderson et al. 2015; Sebok et al. 2016)

Metode	Fokus	Uddybning	Model relevans
Vand budget	Vandbalanceligning	Bestemmelse af $NN = N - EA$ (EU Guidance doc. WFD 2015)	Kan evt. udgøre et første input til vandbalance for hydrogeologiske forståelsesmodel (konceptuel model)
Overfladevands baserede metoder	- Hydrograf-separation (baseflow index) - Synkronmålinger (median min Q) - Afstrømningsmålinger "Seepage meters" - Temperatur målinger	Baseflow index baseret bestemmelse Median minimumsmålinger udtrykker en karakteristisk grundvands-afstrømning, der kan indgå i vurdering af vandbalance for grundvandssystem & grundvandsdannelse	Teknikker kan benyttes på målte tidsserier (baseflow index) i forbindelse med konceptuelle model, samt som bløde data til validering af dynamiske og stationære hydrologiske modeller.
Umættet zone	- Lysimetre - In situ sensorer (neutro, TDR mv.)	Vandindhold i rodzonen der kan indgå i kalibrering og validering af hydrologiske model for UZ	Mest anvendelige til rodzonemodeller og integrerede, dynamiske GV-OV modeller.
Umættet zone	- Cross-hole geophysics - DC, EM, radar surface geophysics - Gravity geophysics	Monitoring af jordfugtighed og tracer koncentrationer mellem tæt placerede borer (testet i HOBE, Sebok et al. 2016)	Mest anvendelige til dynamiske GV-OV modeller hvor UZ indgår eller "eksterne" rodzonemodeller
Umættet zone - rodzonemodell	- Daisy, EVACROP eller - DK model beregnet nettonedbør (nedsivning til SZ)	Der er eksempler på anvendelse af DK model i grundvandskortlægningen til generering af nettonedbørs-input til grundvandsmodeller (500x500 m input)	Kan benyttes som input til stationære eller transiente grundvandsmodeller (i så fald anvendes NN som input til stationær model)
Mættet zone	- Varme/isotop teknikker, alders-datering - Vandspejlsfluktuationer (frit vandspejl) - Darcy's lov	CFC, $^3H/^3He$, Cl, ^{14}C mm. Pejleboringer eller geofysik baseret. Numeriske grundvandsmodeller bygger implicit på Darcy's lov og loven om massebevarelse (kontinuitetsligning)	Kan sammenlignes med modelleret transporttid. Forudsætter dynamisk GV-OV model eller transient GV model. Indgår i numeriske, stationære og dynamiske modeller.

Vurderes det, at der kan anvendes en stationær model til 3D grundvandsstrømnings- og partikelbanesimuleringer, kan nettonedbørsinput fra en dynamisk model anvendes (NN). Alternativt kan man anvende NN fra et rodzonemodul fx Daisy eller EVACROP eller lignende.

Ved anvendelse af DK model nettonedbørsinput til stationær eller transient grundvandsmodel, benyttes i givet fald en nedbør hvor vandingsmængder indgår (fx hvis det er fra DK model i 500x500 m). Figur 13 illustrerer fremgangsmåden.



Figur 13 Eksempler på håndtering af nettonedbør (NN), vandudveksling (VU) og magasin-specifik grundvandsdannelse (MG) vha. enten integreret MIKE SHE model eller stationær eller transient MODFLOW model.

Anbefalinger

- Der bør anvendes 3D strømnings- og partikelbane metodik, i stedet for 1D metodik til vurdering af magasin specifik grundvandsdannelse. Der anvendes mindst 100 partikler i hvert grid i øverste modellag, jævnt fordelt i mættet zone.
- Resultater vises på kort som magasin specifik grundvandsdannelse (i mm/år beregnet på baggrund af hvor stor en procentdel af partiklerne der ankommer til et specifikt magasin og den simulerede grundvandsdannelse NN/stationær model eller G_{SZ} såfremt der er anvendt dynamisk, grundvands-overfladevandsmodel) eller som % infiltration bestemt ud fra andel af partikler frigivet i det øverste lag, eller ved top af modellag 2 (i tilfælde af sidstnævnte skal VU_{12} anvendes i stedet for NN ved stationær/eller G_{SZ} ved dynamisk model), der ankommer til et undersøgt magasin. Afhængigt af de hydrogeologiske forhold og vertikal diskretisering afgøres hvad der er mest optimalt i en given modelsammenhæng (der skal benyttes mindst 100 partikler i hvert grid, hvis partikler tilføres øverste lags mættede zone og jævnt fordelt; benyttes top af modellag 2 skal som minimum benyttes 25 partikler i hvert lag).

- Der skal udarbejdes kort over anvendt nettonedbør (NN) og vandudveksling fra modellag 1 til 2 VU₁₂. Når der anvendes dynamisk grundvands-overfladevandsmodel udgør grundvandsdannelsen til mættet zone (total recharge til SZ) det input der benyttes i fx partikelbanesimuleringer, og dette tema (G_{SZ}) skal derfor anvendes og rapporteres på kort. Kort for NN og VU₁₂ skal vise både positiv grundvandsdannelse (nedadrettet vertikal gradient) og negativ grundvandsdannelse (opadrettet vertikal gradient) og med anvendelse af samme intervaller (fx jf. Figur 1 og 3 for VU₁₂).
- Der kan evt. laves kort over transporttider i mættet zone fra hvor partikler frigives og til de ankommer til det specifikke magasin der undersøges. På baggrund af partikler, der ankommer til det specifikke magasin, kan der foretages analyser af hvilke partikler der passerer gennem fx mere end 5 henholdsvis 15 meter reduceret ler, eller transporttid gennem hhv. oxideret og reduceret zone, forudsat at dybden til redoxgrænsen er fastlagt. Disse kort kan evt. indgå i en vurdering af samlet sårbarhed i forhold til forskellige stoffer der forekommer i det øverste grundvand
- Grundvandsdannelsen til stationære grundvandsmodeller kan med fordel baseres på en dynamisk, integreret grundvands-overfladevands model (NN). Alternativt kan input fra eksternt et rodzonemodul anvendes. I tilfælde af sidstnævnte bør resultater for NN og VU₁₂ som minimum sammenlignes med tilsvarende resultater fra DK model, som en del af kvalitetssikringen af modellen.
- Ved brug af stationær grundvandsmodel tages der ikke højde for overfladisk afstrømning. Det bør der derfor tages højde for ved at fratrække overfladisk afstrømning (% del af nedbør og evt. bidrag fra befæstede arealer for hvert grid) fra den nedbør der benyttes til beregning af NN. Ved sammenligning med målt middelaflstrømning fra et opland skal en tilsvarende mængde tillægges simuleret afstrømning, før simuleret og observeret afstrømning sammenlignes.

Referencer

- Freeze RA, Cherry JA (1979) Ground Water. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall Inc.
- Henriksen HJ, Trolborg L (2011) 3D hydrologisk strømningsmodel for Egebjerg området. Kvantificering af grundvandsressourcen og afgrænsning af indvindings-oplande ved nuværende og fremtidigt klima GEUS rapport 2011/101.
- McMahon PB, Plummer LN, Bohlke JK, Shapiro SD, Hinkle, SR (2011) A comparison of recharge rates in aquifers of the United States based on groundwater-age data: Hydrogeology Journal, DOI 10.1007/s10040-011-0722-5
- Miljøstyrelsen (2000) Zonering. Nr. 3. Detalkortlægning af arealer til beskyttelse af grundvandsressourcen.
- NST (2014) Nitratsårbarhed og afgrænsning af NFI og IO. Notat fra Naturstyrelsen. 28 pp.
- Rambøll (2015) Langeland kortlægningsområde – trin 2. Geologisk og hydrostratigrafisk model, hydrologisk model samt grundvandskemisk kortlægning. 07/05 2015.
- Refsgaard JC, Højberg AL, Møller I, Hansen M, Søndergaard V (2010) Groundwater modelling in integrated water resources management – visions for 2020. Groundwater 48 (5), 633-648.
- Scanlon BR, Healy RW, Cook PG (2002) Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeology Journal 10: 18-39.
- Sebok E, Refsgaard JC, Warmink JJ, Stisen S, Jensen KH. (2016) Using expert elicitation to quantify catchment water balances and their uncertainties. Water Resources Research, 52: 5111-5131.

5.15 Genanvendelse af kortlægningsmodel

Grundvands- og hydrologiske modeller udarbejdet under grundvandskortlægningen (samt i andre sammenhænge) indeholder en lang række informationer om kortlægningsområdets data og opbygning, og det bør derfor undersøges, om modellen kan genanvendes på et senere tidspunkt i forbindelse med modellering af vandkredsløbet. Før en "gammel" model genanvendes er der imidlertid en række forhold, der skal afklares. F.eks. skal det undersøges, om formålet med den oprindelige model var det samme som formålet med den foreliggende opgave. Udgangspunktet i dette afsnit er, at en kortlægningsmodel hentes frem fra eksempelvis modeldatabasen, og at denne model skal bruges til at opnå en revideret opgørelse af grundvandsbeskyttelsen i det pågældende område. Formålet med modellen er med andre ord det samme som i den oprindelige opgave, om end der sidst i afsnittet gives nogle anbefalinger i tilfælde af, at formålet er ændret. Normalt kan en ældre model ikke umiddelbart anvendes, men i reglen vil den kunne danne udgangspunkt for den efterfølgende modellering, hvor det må påregnes, at der skal laves opdatering og nuancering af geologisk model, kalibreringsdata, rumlig opløsning, mm. Desuden skal det undersøges, om modellen er nøjagtig nok til den foreliggende opgave. Stort set alle modeller udarbejdet under grundvandskortlægningen er evalueret mod kvantitative nøjagtighedskrav (se 5.5), så oplysninger om modellens evne til at reproducere de observerede data er let tilgængelige jf. modelrapporter. Dog er der en del andre kalibreringskriterier, som bør være opfyldt alt efter modellens formål. Hvis modellen klarede sig relativt dårligt i kalibrerings- og eventuelle validerings-tests, kan det give anledning til at stille spørgsmålstejn ved at genanvende modellen. Alternativt kan kravene til nøjagtighed have ændret sig, så der til den nye opgave stilles skarpere (eller mildere) krav til nøjagtighed. Endelig kan man vælge at gennemføre en såkaldt post-audit (se senere), hvor modellens forudsigelser af fremtiden evalueres, fx år efter at en ændring i vandbalance forhold er implementeret.

Det kan i det konkrete tilfælde være vanskeligt at vurdere, om en ældre model kan genanvendes, og hvor meget der i givet fald skal laves på modellen, før den er køreklar. Generelt anbefales det, at man beskriver fordele og ulemper ved at genanvende en gammel model. Denne analyse inkluderer en præcision af, hvad modellen er testet til og navnlig, hvad den ikke er testet på. En sådan analyse vil kunne danne udgangspunkt for en opdatering af modellen.

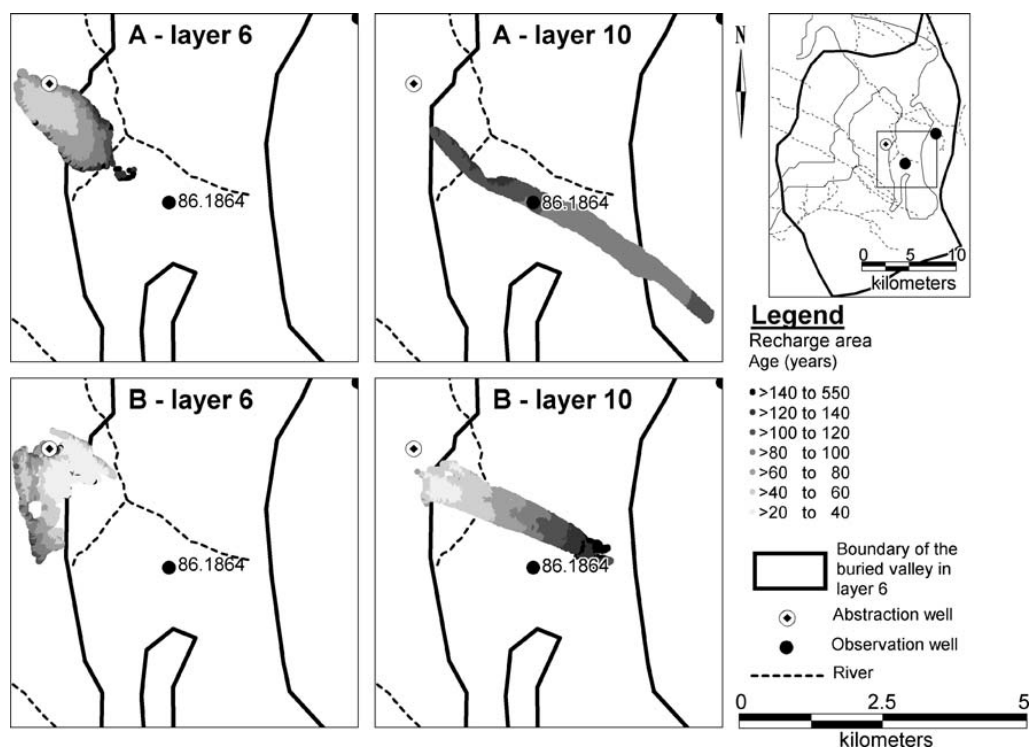
Begrundelser for opdatering af kortlægningsmodeleksisterende modeller

Der kan være mange begrundelser for at genberegne sænkninger, indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande i et kortlægningsområde. En vigtig motivation vil være, hvis der er sket fysiske og/eller strukturelle ændringer indenfor kortlægningsområdet. En af de mest dynamiske størrelser i en kortlægningsmodel udgøres af den rumlige og tidslige fordeling af grundvandsindvindingen. I nogle tilfælde vil indvindingsfordelingen mellem indtag på en kildeplads have ændret sig eller der kan være sket en omfordeling af indvindingen mellem forskellige kildepladser. Forurenings- og ressourceproblemstillinger kan give anledning til, at indvindingen på specifikke kildepladser ændres signifikant eller eventuelt helt lukkes, hvilket typisk vil resultere i, at der etableres en ny kildeplads på en anden lokalitet.

En anden ændring, som kan give anledning til signifikante effekter for grundvandsbeskyttelsen, er arealanvendelsen. På landbrugsarealer vil omlægning fra en afgrøde til en anden

normalt kun give anledning til moderate ændringer i fordampning og dermed grundvandsdannelse. Til gengæld kan omlægning fra landbrug til skov (eller omvendt) resultere i markante ændringer i grundvandsdannelsen (Christiansen et al., 2015). Det samme er tilfældet, hvis der sker en urbanisering af et område, hvilket vil påvirke både fordampning, afstrømningsdynamik og grundvandsdannelse (Kidmose et al., 2015).

Ny viden om kortlægningsområdets fysiske opbygning (f.eks. geologi) kan også give anledning til et ønske om en opdatering af modellen. Der vil typisk være tale om, at der er indsamlet nye data (f.eks. om klima eller geologi) og/eller at der er sket en retolkning af eksisterende og/eller nye data. Hvis dette resulterer i inputs til modellen, som er signifikant forskellige fra det tidligere input, kan det give anledning til en genberegning. Et eksempel kan findes i Seifert et al. (2008), hvor der for et område omkring Bording i Midtjylland først blev opstillet en model, hvor den geologiske lagserie var beskrevet som mere eller mindre horisontale Mioocene lag (model A). En geologisk kortlægning viste imidlertid, at området blev gennemskåret af en begravet dal. Der blev derfor også lavet en geologisk model, som inkluderede dalen (model B). Til trods for, at begge modeller kunne kalibreres tilnærmelsesvis lige godt mod data for trykniveau og vandløbsafstrømning, var der stor forskel på de grundvandsdannende oplande i de to modeller, se Figur 14. Så i dette tilfælde ville fremkomsten af nye geologiske data (eller ny tolkning) være et argument for at gennemføre en opdatering af den oprindelige model.



Figur 14 Grundvandsdannende oplande og transporttider til borerer placeret i de Miocene magasiner (lag 6 og 10). Model A er uden den begravede dal mens model B er med den begravede dal.

Der kan også opstå det problem, at de inputs der er givet til den oprindelige model, ikke længere er troværdige. Den situation kan opstå, hvis der er fremkommet ny viden på området. F.eks. har korrektion af nedbørsdata (aerodynamiske effekter) ændret sig gentagne

gange de sidste 30-40 år, og hvis der er benyttet en anden metode, end den der anbefales på opdateringstidspunktet, er der behov for at ajourføre modellen.

Praktiske problemstillinger

Forudsætningen for at kunne genanvende en ældre kortlægningsmodel er, at modellen er tilgængelig. Det kræver normalt, at modellen kan findes i modeldatabasen (www.geus.dk/modeldb). Tilsvarende skal man sikre sig, at de klimadata (nedbør, fordampning, temperatur), der blev leveret af DMI og anvendt til opgaven, kan bruges til den foreliggende opgave uden yderligere afregning.

Inden man beslutter sig for at genanvende en kortlægningsmodel, skal det afklares, om modellen kan indlæses og give tilfredsstillende resultater i det modelsystem, som man har valgt at arbejde med. I de fleste modelsystemer sker der en løbende udvikling af både modelkoden (dvs. den måde vandkredsløbet bliver beskrevet på) og af brugerfladen. Opdateringer af brugerfladen kan resultere i, at det er vanskeligt eller direkte umuligt at importere den gamle modelopsætning til det nye modelsystem. Det kan derfor være forbundet med en betydelig arbejdsbelastning at skulle opdatere modellen, og der vil være en risiko for, at den reetablerede model utilsigtet afviger fra den oprindelige model mht. opsætning og inputs. Ligeledes kan opdateringer af modelkoden give anledning til, at der genereres resultater, som er forskellige fra de resultater, som modellen tidligere kom frem til.

Det anbefales derfor, at der gennemføres en test, hvor resultaterne fra den gamle model sammenlignes med resultaterne fra den nye model. Det er vigtigt at kvantificere disse afvigelser, og her vil det være mest optimalt, hvis det er muligt at sammenligne resultater for trykniveauet i modelområdet. Det gøres mest hensigtsmæssigt ved at trække trykniveauresultater i et specifikt modellag fra hinanden (celle for celle, til samme tidspunkt). Ideelt set bør de to modelversioner give identiske resultater, men i praksis vil der pga. faktorerne nævnt ovenfor tit være afvigelser. Analysen forudsætter, at der er resultater til rådighed fra den gamle model, hvilket ikke altid er tilfældet, og i mange tilfælde vil det ikke være muligt at genetablere dem. I de tilfælde kan man udnytte afrapporterede statistiske størrelser såsom middelfejl (ME) og kvadratafgivelsessummen (RMS), som kan sammenlignes mellem modellerne. Alternativt kan afgrænsning af indvindingsoplande, som normalt er gemt i GIS format, sammenlignes.

Det er vanskeligt at definere krav til, hvor tæt resultaterne fra den opdaterede model skal være på de resultater, som den oprindelige model producerede. Det vil afhænge af formålet og nøjagtighedskriterierne for den aktuelle opgave. Men det bør undersøges, hvad der er årsag til en eventuel afvigelse, og hvis der er tale om en saglig begrundelse, kan der efterfølgende være behov for at recalibrere modellen.

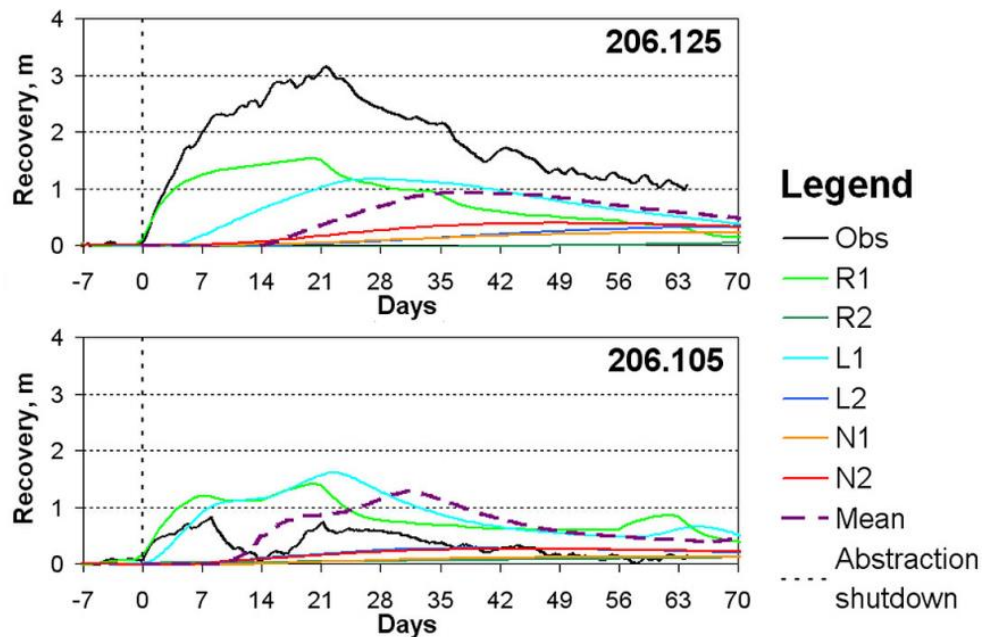
Post-audit

Det kan være hensigtsmæssigt at foretage en såkaldt post-audit af en "gammel" grundvandsmodel. I en post-audit re-eksamineres modellens resultater mod nye data, som er indsamlet efter modelprojektet er afsluttet (Barnett et al., 2012). Herved kan det demonstreres, om modellen er i stand til at forudsige fremtiden. Anderson og Woessner (1992a) definerer en post-audit som en undersøgelse af, hvor nøjagtige forudsigelser en model lavet mindst 10 år før

en postaudit gennemføres, er. Årsagen til at de anbefaler, at der skal gå mindst 10 år før analysen gennemføres er, at det tillader tilstrækkeligt med tid til, at modellen kan bevæge sig væk fra kalibreringstilstanden. Normalt vil en post-audit analyse altså inkludere, at der sker en vis ændring (f.eks. etablering af en ny kildeplads eller etablering af permanent grundvandssænkning i forbindelse med tunnelprojekter) og at modellens forudsigelser af denne ændring sammenlignes med målinger fra perioden efter, at ændringen er sat i værk. Hvis der er gået tilstrækkelig lang tid siden kortlægningsopgaven blev afsluttet, vil det være muligt at teste modellen mod data (f.eks. trykniveau), der er indsamlet efterfølgende.

I forbindelse med grundvandskortlægning vil der kun i sjældne tilfælde være tale om, at modellen blev anvendt til at prediktere effekten af en given ændring. Typiske ændringer med relevans for grundvandsstrømningerne inkluderer ændringer i indvindingsmængde, f.eks. pga. installation af en ny kildeplads eller en ændret fordeling af indvindingen på de eksisterende kildepladser, ændring i klimatiske forhold såsom nedbørsmængde, som vil give anledning til ændringer i grundvandsdannelsen, eller ændringer i arealanvendelsen, f.eks. urbanisering eller skovrejsning, som påvirker grundvandsdannelsen lokalt. Ofte vil en kortlægningsmodel antage, at den historiske situation fortsætter ind i fremtiden, og i dette tilfælde kan man argumentere for, at der ikke er tale om en stringent post-audit men måske snarere tale om en traditionel validering. Forskellen til den velkendte validering består i, at modellen konfronteres med data, som er indsamlet i perioden efter at modelprojektet er afsluttet, hvilket ofte kan resultere i uventede forløb.

Et eksempel på en modeltest med ændrede påvirkninger (stress-faktorer) kan findes i Seifert et al. (2012). Her blev seks forskellige geologiske modeller indbygget i en hydrologisk model for Lejre-området beliggende syd for Roskilde fjord. De seks modeller blev kalibreret mod tilgængelige historiske data for trykniveau og vandløbsafstrømning. Efterfølgende blev der lavet et pumpestop på Lejre kildeplads, som resulterede i stigende grundvandsstand i nærliggende observationsboringer, se figur 16. I dette tilfælde er der ingen usikkerhed mht. påvirkningen af modellen (både indvinding og klimaforhold kendes), og hele fejlen skal derfor findes på den hydrostratigrafiske model med tilhørende hydrauliske parametre. Det ses, at for boring 206.125 rammer alle modellerne det observerede forløb relativt dårligt, mens der for boring 206.105 er en bedre overensstemmelse mellem virkelighed og model.



Figur 15 Forløb af hhv. observeret og beregnet grundvandsstand i pejleboringer tæt på Lejre kildeplads efter pumpestop (fra Seifert et al., 2012).

Normalt vil effekten af en given ændring i stress-faktorer give anledning til, at systemet ændrer sig over en periode, som er betydeligt længere end i ovenstående eksempel. En post-audit kan i det tilfælde gennemføres ved at sammenligne resultater fra den oprindelige model med observationer indsamlet for den periode (eller dele af), som modellen predikterede, typisk en ny stationær tilstand. Som beskrevet i Anderson og Woessner (1992b), hvor fem post-audits præsenteres, vil dette resultere i, at forskellen mellem model og data vil være et resultat af flere faktorer. Dels vil fejl i den konceptuelle model (f.eks. geologisk model) resultere i unøjagtige resultater, dels vil fejlagtige estimater for fremtidige stress-faktorer (grundvandsdannelse, grundvandsindvinding, etc.) give anledning til unøjagtigheder. Derfor anbefaler Anderson og Woessner (1992a,b), at prediktioner af hydrologiske størrelser påhæftes en usikkerhedsanalyse, hvor sandsynlige udfald af stress-faktorer gennemregnes. Eksempelvis kan der defineres et antal scenarier for, hvordan indvindingen på kortlægningsområdets kildepladser vil udvikle sig fremover. Herved er der en vis sandsynlighed for, at mindst ét scenarium ligger tæt på, hvordan det i praksis udvikler sig. Analysen giver imidlertid også information om, hvor meget realistiske variationer i stress-faktorerne kan påvirke modelresultaterne, dvs. hvor følsom modellen er overfor ændringer i eksempelvis grundvandsindvinding. Det er imidlertid sjældent, at der er gennemført en sådan usikkerhedsanalyse i forbindelse med modelprojekter i Danmark. For at opnå viden om, hvor godt selve modellen (geologi, parameterverdier, mm) repræsenterer virkeligheden, kan det i forbindelse med post-audit overvejes, at køre modellen igen, hvor alle "fremtidige" forhold er kendt. Herved kan man eliminere effekten af usikkerheden om fremtiden, og eventuelle forskelle mellem model og data vil være et udtryk for fejl i den konceptuelle model eller parameterverdier.

Fokus for kortlægningsmodeller er rettet mod afgrænsning af indvindingsoplande. Det er imidlertid vanskeligt at måle beliggenheden af et indvindingsopland, og derfor er det i praksis ikke muligt at gennemføre en stringent post-audit af en kortlægningsmodel. Man må derfor ty til indirekte tests af modellen, som kan fortælle noget om modellens evne til at forudsige

grundvandets bevægelse. Modellen kan holdes op mod eventuelle nye målinger af eksempelvis grundvandstrykniveau, som er den datatype, der oftest indsamles. Det kan imidlertid også være hensigtsmæssigt at udnytte viden om hydrauliske gradienter, både i horisontal og vertikal retning. Gradienterne giver information om, i hvilke retninger grundvandets strømmer (under isotrope forhold), og kan derfor være nyttige til at teste modellen. En anden datatype, som er blevet mere almindeligt anvendt de senere år, er alderdateringer baseret på miljøtracere (f.eks. ^{14}C eller ^{39}Ar , se Sonnenborg et al., 2016). En tracer giver information om, hvilke veje grundvandet strømmer og er derfor højst relevant at anvende i forbindelse med evaluering af en kortlægningsmodel.

Anvendelse af kortlægningsmodel til alternative formål

Modeller opstillet under grundvandskortlægningen er typisk udviklet til at give en god beskrivelse af grundvandsstanden i de primære magasiner, sænkning i forbindelse med grundvandsindvinding og tilhørende indvindingsoplande. Til gengæld er der ofte lagt mindre vægt på forhold såsom vandløbsafstrømning eller grundvandsstandens variation i de terrænnære sekundære magasiner, hvor en nøjagtighed svarende til overslagsberegning typisk er blevet accepteret. Hvis formålet med modelarbejdet er et andet, end da modellen blev opstillet, kan modellen som udgangspunkt ikke anvendes direkte. Hvis det er hensigten at anvende en kortlægningsmodel til eksempelvis vandløbspåvirkning, klimatilpasning eller forureningstransport vil der derfor typisk være behov for opdateringer af modellen.

I forbindelse med både vandløbspåvirkning og klimatilpasning vil der til forskel fra grundvandskortlægningen være fokus på det terrænnære grundvand og afstrømningshydrografen, og det vil typisk være ekstremssituationer, der er relevante at karakterisere. Mht. vandløbspåvirkningen vil det være sommersituationen med lille (ingen) grundvandsdannelse, høj fordampning og eventuel oppumpning til markvanding, som er interessant at undersøge. For klimatilpasningen vil det typisk være den våde situation med høj grundvandsstand, som indtræder i vinter- og eller forårssæsonen, der er kritisk. I begge tilfælde stiller det krav til, at der anvendes en model, som kan beskrive ekstremssituationen, hvilket normalt indebærer, at der anvendes en dynamisk model, dvs. en ikke stationær model. Problemstillingen med det terrænnære grundvand vil kræve, at der foreligger en relativ detaljeret beskrivelse af den terrænnære geologi (de øverste 20 – 30 m), se f.eks. Sonnenborg og Kidmose (2012), da grundvandsspejlets rumlige variationer er stærkt afhængigt af heterogeniteter i den terrænnære geologi. Endelig vil det være vigtigt, at modellerne er kalibreret mod data fra det terrænnære grundvand, typisk det øverste magasin og afstrømninger i opstrøms dele af vandløbet. Her vil det være vigtigt at have adgang til forholdsvis mange terrænnære observationer med lille usikkerhed, og da de terrænnære forhold ikke har været i fokus i forbindelse med grundvandskortlægningen, vil der typisk være behov for at indsamle yderligere data. Specielt i forbindelse med vandløbsafstrømning kan der også være behov for modellen kalibreres og valideres mod andre kalibrerings-mål, eksempelvis R^2 -NS, Fbal, Fbal-sommer og BFI.

Skalaen, hvorpå der skal simuleres, kan være en anden årsag til ændringer i modellen. I klimatilpasningsprojekter kan der, specielt i urbane områder, være behov for at bruge en finere opløsning end de 100 x 100 m, som der er anvendt i grundvandskortlægningen. En eventuel reduktion af modelområdet og celle-størrelse vil give anledning til, at modellen (selv med samme parameterværdier) giver resultater, som afviger fra den oprindelige model.

En ændring af formålet med modellen vil, som det kort er beskrevet ovenfor, altså resultere i ændringer af, på hvilke områder den skal præstere godt, hvilket vil give anledning til ændringer i modelopbygning. Der vil derfor skulle gennemføres en rekalkibrering af modellen, hvor den holdes op mod kalibreringskriterier, som er relevante for den pågældende problemstilling.

Anbefalinger

- Check at den oprindelige model kan indlæses i det aktuelle modelsystem
- Gennemfør test af den oprindelige model mod den opdaterede model
- Gennemfør en post-audit mod data indsamlet efter model blev lavet
- Hvis formålet med modellen er ændret bør der ske en genkalibrering

Referencer

- Anderson, MP, Woessner WW (1992a) Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. Academic Press, Inc., San Diego, California.
- Anderson, MP, Woessner WW (1992b) The role of postaudit in model validation. Adv. Water Resources, 15, 167-173.
- Barnett B, Townley LR, Post V, Evans RE, Hunt RJ, Peeters L, Richardson S, Werner AD, Knapton A, Boronkay A., 2012. Australian groundwater modelling guidelines, Waterlines Series Report No. 82, National Water Commission, Canberra. June 203pp.
- Christiansen JR, Gundersen P, Sonnenborg TO (2015) Får vi mere vand når nåleskov bliver til løvskov?, Vand&Jord, 2, 44-47.
- Elga S, Bronders J, Batelaan O (2015) Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. Journal of Hydrology 529. 62-81.
- Kidmose J, Trolborg L, Refsgaard JC, Bischoff N (2015) Coupling of a distributed hydrological model with an urban storm water model for impact analysis of forced infiltration, Journal of Hydrology, 525, 506-520, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.04.007.
- Seifert D, Sonnenborg TO, Scharling P, Hinsby K (2008) Use of alternative conceptual models to assess the impact of a buried valley on groundwater vulnerability, Hydro-geology Journal, 16(4), 659-674.
- Seifert D, Sonnenborg, TO, Refsgaard JC, Højberg AL, Trolborg L (2012) Assessment of hydrological model predictive ability given multiple conceptual geological models, Water Resources Research., 48, doi:10.1029/2011WR011149.
- Sonnenborg TO, Kidmose J (2012) Undersøgelse af klimabetingede grundvandsstigninger i pilotområde Kolding, pp. 28, GEUS.
- Sonnenborg TO, Scharling P, Hinsby K, Rasmussen ES, Engesgaard P (2016) Aquifer vulnerability assessment based on sequence stratigraphic and 39Ar transport modeling, Groundwater, 54(2), 214-230, DOI: 10.1111/gwat.12345.

6. Konklusioner

Denne Geo-Vejledning i hydrologisk modellering er baseret på principper for god modelleringspraksis, som har udmøntet sig i Danmark gennem de sidste par årtier (Henriksen et al., 2002; Sonnenborg og Henriksen 2005; Refsgaard, 2007) og som er solidt forankret i international forskning.

Vejledningen er resumeret i Tabellerne 1-5. Femten særligt væsentlige emner er behandlet i afsnittene 5.1 – 5.15. Herudover er der henvist til Håndbog i Grundvandsmodellering (Sonnenborg og Henriksen, 2005) og anden litteratur.

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 5.4.
- 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 5.1.
- *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 5.2 og 5.3.
- *Kravene til en models nøjagtighed* skal afspejle til målsætning 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 5.5, 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 5.7.
- *Model validering* mod uafhængige data bør foretages før modelanvendelse. Vejledning om principper for opstilling af valideringstest er givet i afsnit 0. På baggrund heraf skal *dokumenterede anvendelsesområde og begrænsninger* beskrives (afsnit 5.9).
- En model skal *dokumenteres* bl.a. ved rapportering og ved indrapporteringer til nationale databaser. Vejledning herom er givet i afsnit 5.10.
- *Datatilgængelighed* bør vurderes inden valg af gridopløsning, modelrand og kalibrering, og typiske parameterintervaller bør anvendes som ledesnor for *parameterisering*. Standard UZ og rodzone parameterisering bør anvendes, hvis ikke bedre lokale data forefindes. Kalibrering af vandbalancemodel bør inkludere effektiv rodzone-dybde.
- Et opland kan betragtes som *urbant*, når lokale menneskelige (antropogene) påvirkninger ændrer de hydrologiske flukse væsentligt. I såfald anbefales det at der indhentes viden om afstrømningsnetværk (fysisk beliggenhed, koter, tværsnit) og befæstelse.
- *Modellering af indvindingsoplande* bør foretages med anvendelse af en model, hvor der i kalibreringen er taget specielt hensyn til at modellen skal kunne anvendes til afgræns-

ning af grundvandsdannende oplande og indvindingsoplande. Det anbefales at kvantitative usikkerheder på oplandsberegning altid visualiseres sammen med indvindingsoplandet og det grundvandsdannende opland fra en referencekørsel.

- Der bør anvendes 3D strømnings- og partikelbane metodik til vurdering af magasin specifik *grundvandsdannelse* (der vises i mm/år på kort for de enkelte magasiner). Grundvandsdannelsen til stationære grundvandsmodeller kan med fordel baseres på en dynamisk, integreret grundvand-overfladevandsmodel.
- Ved *genanvendelse* af kortlægningsmodeller, skal det tjekkes at den oprindelige model kan indlæses i det aktuelle modelsystem, og der skal gennemføres en test af den oprindelige model mod den opdaterede model (det anbefales af gennemføre en post-audit mod nyere data). Hvis formålet med modellen er ændret bør der ske en genkalibrering.
- *Tekniske vejledninger* er nyttige som opslagsværk, inspiration og fælles referencegrundlag for de forskellige aktører i modelleringsprocessen. Henvisninger til teknisk vejledning, metoder og baggrundskapitler er medtaget via henvisninger til ekstern litteratur og Håndbog i grundvandsmodellering 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 hydrologiske 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 opsplittning af modelleringsarbejdet i geologisk modellering og hydrologisk modellering som to særskilte opgaver kan være derfor være uhensigtsmæssig og bør generelt undgås.

7. Referencer

Bemærk: Afsnittene 5.1 – 5.15 indeholder hver deres referencelister. Nedenfor angives kun de referencer, der henvises til andre steder i rapporten.

- NST (2015) Notat af opdatering af Geovejledninger. August 2015. Miljø- og Fødevareministeriet. Naturstyrelsen. 3. pp).
- 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 (1992) Standard guide for Conceptualization and characterization of Ground-Water Systems. American Society for Testing and Materials, Standard D5979-96. <http://www.astm.org>.
- Black D, Wallbrink P, Jordan P, Waters D, Carroll C, Blackmore J (2011) Guidelines for water management modelling: Towards best-practice model application. eWater Cooperative Research Centre. Australia.
- Henriksen HJ, Iversen CH, Wernberg T (2011) Usikkerheder på indvindings- og grundvandsdannende oplande. Delprojekt om oplande. http://gk.geus.info/xpdf/udok_hjh_1_1_2011_final_net-med-omslag.pdf
- 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.
- 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. http://gk.geus.info/xpdf/udpegning-af-indvindingsoplande_hjemmeside.pdf
- 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. http://gk.geus.info/xpdf/stat-dyn-rapport_jul2011_net.pdf
- 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.
- Middlemis H (2000) Murray-Darling Basin Commission. Groundwater flow modelling guideline. Aquaterra Consulting Pty Ltd. Project No. 125.
- NST (2015). Notat om opdatering af Geovejledninger. Miljø- og Fødevareministeriet. Naturstyrelsen. August 2015. 3 pp.
- Refsgaard JC (2007) Hydrological modelling and river basin management. Doctoral Thesis. GEUS Særudgivelse 2007.
- Refsgaard JC, Trolborg L, Henriksen, HJ, Højberg, AL, Møller, RR; Nielsen, AM (2010) Geo-vejledning7. http://gk.geus.info/xpdf/geovejl7_god_praksis_i_hydrologisk_modelle-ring_m_app_20100531_net.pdf
- 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.
- 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.
- 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. Harmoni-CA Guidance. IWA Publishing.
- Sonnenborg TO, Henriksen HJ (2005) Håndbog i Grundvandsmodellering. GEUS rapport 2005/80, 305 sider. http://vandmodel.dk/xpdf/haandbog_gv_modellering.pdf
- 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: Lessons learned

A.1 Formål og metode

Formålet med "lessons learned" har været at indsamle læring fra gennemførte hydrologiske modelrapporter fra grundvandskortlægningen med henblik på vurdering af behov for opdatering af eksisterende hydrologisk geovejledning 2 og 7, samt hente inspiration til nye vejledningsafsnit. GEUS har gennemlæst 20 udvalgte modelrapporter fra kortlægningen og indledningsvist bearbejdet disse vedr. nøjagtighedskriterier, kalibrering, validering og dokumentation af modellens brugbarhed.

De 20 modeller er udvalgt af rådgivere efter at NST har henvendt sig og bedt rådgivere give forslag til hvilke modeller der kan trækkes noget læring ud fra.

De 20 modeller (Tabel A1) er gode eksempler på den praksis der har været i den pågældende periode. Modellerne er tilpasset forskellige lokale forhold med hver sine særlige udfordringer og problemer. Mange af modellerne indeholder endvidere forslag til nye spændende løsninger, som kan være illustrative eksempler eller ideer til metoder.

Tabel A1 Udvalgte 20 hydrologiske "læringsmodeller". Nogen af modellerne er udført i samarbejde mellem flere konsulenter, men for enkelhedens skyld er de anført og nummereret som vist nedenfor.

Nr	Navn	Modelfirma	Karakteristik
1	Nordfyn	Orbicon	MSHE/dyn
2	Gribskov	Orbicon	MSHE/dyn
3	Fredensborg	Orbicon	MSHE/dyn
4	Faaborg- Egebjerg	Orbicon	MSHE/dyn
5	Ørbæk-Gudme	Orbicon	MSHE/dyn
6	De fire øer	Orbicon	MSHE/dyn
7	Herlev-Glostrup	Orbicon	MSHE/dyn
8	Tårnby- Dragør	Orbicon	MSHE/dyn
9	Gelsted Vestfyn	Orbicon	MSHE/dyn
10	Langeland	Rambøll	MSHE/dyn
11	Sorø-Stenlille	Rambøll	MSHE/dyn
12	Næstved	Rambøll	MSHE/dyn
13	Smørum-Ballerup	Rambøll	MSHE/dyn
14	Slagelse	NIRAS	MSHE/dyn
15	Padborg-Gråsten	NIRAS	GMS/stat
16	Vinderup	NIRAS	GMS/stat
17	Djurs Vest	Alectia	Vistas/stat-dyn kalib
18	Aarhus Vest	Orbicon/ COWI	GMS/stat
19	Kibæk	COWI	GMS/stat
20	Lindved	COWI	GMS/stat (voksel model)

Der er foretaget en struktureret gennemgang med støtte i et spørgeskema der er vist nedenfor.

A.2 Spørgeskema

1. MODELPROJEKT

Navn på udfylder

Email

Rolle (modellør,
vandforvalter, reviewer,
forsker)

2. Hvordan har modelprojektet anvendt stationære og dynamiske modeller (strømning+PT)?

- ☐ a. Stationær grundvandsmodel: Numerisk grundvandsmodel som kalibreres stationært, med efterfølgende partikelbanesimulering
- ☐ b. Stationær grundvandsmodel: Numerisk grundvandsmodel som kalibreres og valideres dynamisk, med efterfølgende partikelbanesimulering på stationær grundvandsmodel
- ☐ c. Dynamisk integreret strømningssmodel: Numerisk grundvands- og overfladevandsmodel, som kalibreres og anvendes dynamisk, med tidsvarierende input for klima og indvindinger. Partikelbanesimulering ved recykling af dynamisk strømningssmodel, med partikel dosering på starttidspunkt med et fast antal partikler pr. grid
- ☐ d. Som c, men med partikeldosering pr. grid afstemt "nettonedbøren" (momentan partikeldosering $t=0$)
- ☐ e. Som d, men med løbende partikeldosering i hvert tidsskridt

f. Andet – beskriv (fx analytisk, AEM, AD: Reaktiv stoftransportmodel eller anden kombination)

3. Hvordan er målsætning og ambitionsniveau beskrevet?

4. Hvilket rollespil har der været? (geolog/modellør, vandforvalter, reviewer og interessenter) i modelproces

- ☐ a. Deltagelse af modellør og vandforvalter på review møder (internt review)
- ☐ b. Deltagelse af modellør, vandforvalter og ekstern reviewer på review møder (peer review)
- ☐ c. Som b men med incl. gennemsyn af model (model audit)
- ☐ d. Deltagelse af modellør, vandforvalter, ekstern reviewer og slutbruger (fx kommune)
- ☐ e. Deltagelse af modellør, vandforvalter, ekstern reviewer og modellør-repræsentanter for interessenter på review møder (udvidet peer review)

f. Andet –beskriv

5. Hvilken vekselvirkning og feedback/-forward har der været mellem geologisk kortlægning, konceptuel model og numerisk model i modelproces?

- ☐ a. Ingen vekselvirkning
- ☐ b. Numerisk model bygger delvist på resultater fra geologisk kortlægning (forward)
- ☐ c. Numerisk model bygger fuldt ud på resultater fra geologisk kortlægning (forward)
- ☐ d. Den konceptuelle geologiske forståelse i den numeriske model er blevet opdateret i løbet af modelleringsprocessen for at opnå bedre overensstemmelse med hydrologiske/geokemiske data (feedback internt i den numeriske model proces)
- ☐ e. Resultater fra den numeriske model har influeret den geologiske tolkning (feedback fra hydrologi til geologi processer)

f. Andet - beskriv

6. Hvordan og hvor i modelproces er vandkemi og aldersdatering inddraget?

- ☐ a. Ikke inddraget
- ☐ b. Opstilling af konceptuel model (samtolkning)
- ☐ c. Modelkalibrering
- ☐ d. Modelvalidering
- ☐ e. Resultater fra den numeriske model har influeret den geologiske tolkning (feedback fra hydrologi til geologi processer)

f. Andet - beskriv

7. Hvordan er geologisk usikkerhed inddraget (fx følsomhedsanalyse/ og usikkerhedsvurdering)?

- ☐ a. Ikke inddraget
- ☐ b. Inddraget som alternative konceptuelle modeller fra starten
- ☐ c. Inddraget ved at elementer i den konceptuelle model (fx antagelser vedr. geologiske lag og linser er revurderet (feedback og gentagelse af kalibrering/validering mm.))
- ☐ d. Inddraget i følsomhedsanalyse
- ☐ e. Inddraget i usikkerhedsvurdering (der er udarbejdet usikkerhedsmatrice med tiltag til håndtering)
- ☐ f. Stokastiske simuleringer
- ☐ g. Monte Carlo simuleringer

h. Andet - beskriv

8. Hvordan indgår usikkerhed på konceptuel model og geologi under vurderingen af indvindings- og grundvandsdannende oplande?

9. Hvordan beskriver modelrapport review?

Spørgsmål 10-26 udforsker hvordan nøjagtighedskriterier er fastlagt, kalibrering, validering, simulering, samt hvorvidt modelprojekt har "sprængt rammer" og tilføjet nye eksempler på god praksis:

- Kalibreringskriterier der har været benyttet
- Performance krav
- Kalibrerings data
- Objektiv funktion
- Usikkerhedskilder (følsomhedsanalyse)
- Kalibrerings- og valideringsperioder
- Anvendelsesområde (afgrænsning og dokum.)
- Følger modelrapport Geovejledning 7
- Indberetning til modeldatabase (ja, nej)
- Gridstørrelse i kalibrering og produktion
- Urbane rum
- Partikelsimulering
- Grundvandsdannelse
- Genanvendelse af tidligere modelopstillinger
- Beskrivelse af evt. brug af model til øvrige formål
- Eksempler på at model har sprængt rammerne for kortlægningsmodeller
- Metoder og teknikker beyond state of the art

Spørgsmål 27-32 er rene kvantitative spørgsmål med fokus på anvendt datagrundlag til kalibrering og validering af modellerne, kalibreringsresultater (fx ME/dHmax, RMSE/Sobs, R2, Fbal osv.) samt estimerede parametre som et resultat af kalibreringen:

- Pejleboringer (+10pejl) i kalibrering og validering (evt. +1)
- Antal Q stationer i kalibrering og validering
- Antal nedbørs- og klimastationer i modelområde
- Kalibreringsresultater (kalibrering + validering)
- Estimerede parametre
- Kalibrerede parametre

A.3 Væsentlige resultater fra undersøgelsen

Forud for workshop i Middelfart blev der i juli-august 2016 udarbejdet en opsamling af resultaterne af lessons learned, der indgik som input til udarbejdelse af opdaterede og nye kapitler (bl.a. i form af erfaringsværdier for parametre i kapitel 5.11 og grundlag for vurdering af behov for opdatering af nøjagtighedskriterier i afsnit 5.5 osv.). Resultater fra undersøgelsen blev præsenteret ved et indlæg på workshoppen, og indgik som grundlag for drøftelser og prioritering af indhold i nye kapitler.

Gennemgangen af de 20 modeller har været med til at identificere 5 områder som skal medtages i Hydrologisk geovejledning.

1. *Datatilgængelighed og parameterisering*
2. *Urbane rum*
3. *Indvindingsoplande*
4. *Grundvandsdannelse*
5. *Genanvendelse og post audit*

Links til modelrapporter

Orbicon:

1. **Nordfyn:** <http://jupiter.geus.dk/Rapportdb/Grundvandsrapport.seam?grundvandsrapport-Rapportid=90418>
2. **Gribskov:** <http://jupiter.geus.dk/Rapportdb/Grundvandsrapport.seam?grundvandsrapport-Rapportid=90432>
3. **Fredensborg:** <http://jupiter.geus.dk/Rapportdb/Grundvandsrapport.seam?grundvandsrapport-Rapportid=90433>
4. **Faaborg-Egebjerg:** <http://jupiter.geus.dk/Rapportdb/Grundvandsrapport.seam?grundvandsrapport-Rapportid=91301>
5. **Ørbæk-Gudme og Ringe (Syddøstfyn model):** <http://jupiter.geus.dk/Rapportdb/Grundvandsrapport.seam?grundvandsrapport-Rapportid=91456>
6. **De fire øer:** <http://jupiter.geus.dk/Rapportdb/Grundvandsrapport.seam?grundvandsrapport-Rapportid=91432>
7. **Herlev-Glostrup:** <http://jupiter.geus.dk/Rapportdb/Grundvandsrapport.seam?grundvandsrapport-Rapportid=90943>
8. **Tårnby-Dragør:** <http://jupiter.geus.dk/Rapportdb/Grundvandsrapport.seam?grundvandsrapport-Rapportid=91713>
9. **Indvindingsoplande udenfor OSD (Gelsted, Vestfyn):** <http://jupiter.geus.dk/Rapportdb/Grundvandsrapport.seam?grundvandsrapport-Rapportid=91374>

Rambøll:

10. **Langeland** (<http://jupiter.geus.dk/Rapportdb/Grundvandsrapport.seam?grundvandsrapport-Rapportid=91527>)
11. **Sorø-Stenlille** <http://jupiter.geus.dk/Rapportdb/Grundvandsrapport.seam?grundvandsrapport-Rapportid=90919>
12. **Næstved** <http://jupiter.geus.dk/Rapportdb/Grundvandsrapport.seam?grundvandsrapport-Rapportid=91171>
13. **Smørum/Ballerup** – vedlagt som pdf-fil.

NIRAS:

14. **Slagelse** <http://jupiter.geus.dk/Rapportdb/GrundvandsrapportList.seam?rapportid=91907&sort=TITEL&fritekst=&cid=8650>
15. **Padborg-Gråsten** <http://jupiter.geus.dk/Rapportdb/GrundvandsrapportList.seam?rapportid=91716&sort=TITEL&fritekst=&cid=8650>
16. **Vinderup** <http://jupiter.geus.dk/Rapportdb/GrundvandsrapportList.seam?rapportid=86665&sort=TITEL&fritekst=&cid=8650>

Alectia:

17. **Djurs Vest** <http://jupiter.geus.dk/Rapportdb/GrundvandsrapportList.seam?rapportid=91737&sort=TITEL&fritekst=&cid=8650>

COWI:

18. **Aarhus Vest** <http://jupiter.geus.dk/Rapportdb/GrundvandsrapportList.seam?rapportid=90030&sort=TITEL&fritekst=&cid=8650>
19. **Kibæk** <http://jupiter.geus.dk/Rapportdb/GrundvandsrapportList.seam?rapportid=91854&sort=TITEL&fritekst=&cid=8650>
20. **Lindved** <http://jupiter.geus.dk/Rapportdb/GrundvandsrapportList.seam?rapportid=87705&sort=TITEL&fritekst=&cid=8650>

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

Appendix D fra Geovejledning 7, 2010 (modificeret med lessons learned eksempler).

B.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 objektivi 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.

B.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 størrelsesordenen 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 diskretisering 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 modellet 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 boringer 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. ± 1 m, svarende til en standardafvigelse på omkring en halv meter.

I Tabel B.1 ses en oversigt over de ovenfor beskrevne usikkerheder, hvor standardafgivelsen 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, λ , er for begge "områdetyper" sat til 500 m. Der er desuden tilføjet nye eksempler ud fra udvalgte lessons learned modeller.

B.3 Samlet usikkerhed

Hvis fejkilderne 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 B.1). Usikkerheden beregnet i kolonnen længst til højre i tabel B.1 repræsenterer den nedre grænse for, hvor præcist en model med horisontal diskretisering Δx 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.

Tabel B.1 Angivelse af standardafvigelse, S_{obs} (i m), på observationer af hydraulisk trykniveau. Δx betegner den horisontale diskretisering, og J er den hydrauliske gradient.

	Δx m	Pejlefejl		Skalafejl		Ikke-stationaritet	Andre effekter ³⁾	Samlet Usikkerhed S_{obs}
		Målefejl	Kote	In-terpol.	Heterogenitet			
Generelt		0,05–0,3	0 – 2	0,5 $\Delta x J$	$C^{1/2} \lambda$ $S_{lnK} J$ ¹⁾	$\Delta h_t/2$ ²⁾	0 – 1	$\sqrt{\Sigma S^2}$
Esbjerg ⁴⁾	500	0,1	1,5	0,5	1,0	0,5	0,25	2,0
DK model 2003 Fyn	1000	0,1	1,5	1,5	2,1	0,5	0,25	3,0
DK model 2003 Sønderjylland ⁵⁾	1000	0,5 - 1		1 – 2		<=		3,0
DK model 2003 Sjælland ⁶⁾	1000	0,1	1,5	1,5	2,1	0,5	0,5	3,1
DK model 2008 Sjælland ⁷⁾ Stationær	500	0,05	0,1	0,75	2,1	1,15	0,25	2,5
DK model 2009 Sjælland ⁸⁾ Dynamisk	500	0,05	0,1	0,75	2,1	0	0,25	2,25
Fredensborg Orbicon 2014	100	0,1	1,5	0,125-0,25	1,5	0,5	0,25	2,2
Sorø-Stenlille S2 Rambøll 2015 S3 grønsandskalk	100	0,05	1	0,2 0,1 0,05	0,009 0,004 0,278	0,5	0,8 0,6 0,25	1,39 1,27 1,18
Slagelse NIRAS 2015	100	0,05	0,1	0,15	2,1	0	0,5	2,14
Djurs Alectia 2015	100	0,05	1	0,5	2	0	1	2,24
Kibæk model COWI 2015	100	0,1	0,1	0,11	1,5	0,5	0	1,59
Tårnby-Dragør modellen Orbicon 2015	50	0,1	1	0,0625-0,125	1,5	0,5	0,25	1,9

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

2) Δh_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)

B.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} .

B.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
- 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.



Energi-,
Forsynings- og
Klimaministeriet

De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) er en forsknings- og rådgivningsinstitution i Ministeriet for Energi, Forsyning- og Klima.

ISBN 978 87 7871 503 6
WEB ISBN 978 87 7871 504 3



Hydrologisk geovejledning - God praksis i hydrologisk modellering

GEO-VEJLEDNING 2017/1

Faglige vejledninger i forskellige aspekter af grundvandskortlægningen udarbejdes af GEUS i samarbejde med Miljøstyrelsen, Miljø- og Fødevareministeriet. Disse vejledninger udgives i en serie kaldet Geo-vejledninger.

"Geovejledning nr. 2017/1: Hydrologisk geovejledning – God praksis i hydrologisk modellering" samler den tidligere Geovejledning 7 og Geovejledning 2 (og diverse delrapporter), som omhandler hydrologi og beregning af indvindingsoplande. Baggrunden for revisionen er dels ny forskningsmæssig viden og dels på baggrund af erfaringer, der er indkommet siden sidste vejledning blev færdiggjort i 2010. I Geo-vejledning 2017/1 er der fokuseret på opstilling af numeriske grundvandsmodeller.

Det primære formål er fortsat at understøtte grundvandskortlægningen, der kræver opstilling af numeriske grundvandsmodeller. Anvendelse af numeriske grundvandsmodeller er en velegnet metode til at beregne bl.a. indvindings- og grundvandsdannende oplande, indvindings- og klimascenarier, grundvandsdannelse, grundvandets alder og grundvandets strømningsretning. Nærværende geovejledning har til formål at sikre, at hydrologisk modellering sker på en ensartet måde i hele landet. Det er håbet, at vejledningen desuden kan bruges til andre formål.