

Indholdsfortegnelse

1	Indledning.....	1-1
1.1	Baggrund og formål.....	1-1
1.1.1	Baggrund.....	1-1
1.1.2	Formål og målgruppe.....	1-2
1.2	Terminologi og modelcyklus.....	1-2
1.3	Modelprotokol.....	1-5
1.4	Parter og rollefordeling.....	1-7
1.5	Referencer.....	1-9
2	Formålet med opstilling af model.....	2-1
2.1	Hvordan kan modeller anvendes i forbindelse med zonerings?.....	2-1
2.2	Brug af model som fortolkningsværktøj.....	2-3
2.3	Brug af model som prognoseværktøj.....	2-3
2.4	Hvilke spørgsmål skal modellen give svar på – definition af formål.....	2-4
2.5	Er valg af en numerisk grundvandsmodel det rigtige værktøj til besvarelse af disse spørgsmål?.....	2-5
2.6	Referencer.....	2-6
3	Opstilling af geologisk model.....	3-1
3.1	Indledning.....	3-1
3.2	Jordoverfladens topografi og geomorfologi.....	3-2
3.3	Prækvartærets højdeforhold.....	3-2
3.4	Sediment/bjergarts enheder.....	3-2
3.5	Datatyper.....	3-3
3.6	Modeltyper.....	3-4
3.6.1	To- og tre-dimensionelle modeller (traditionelle deterministiske modeller).....	3-4
3.6.2	Overflade modeller (konturerede modeller).....	3-4
3.6.3	Geostatistiske modeller (stokastiske modeller).....	3-4
3.7	Korrelation af lagfølgeoplysninger fra boringer.....	3-5
3.8	Forbedring af geologisk model ud fra overfladegeofysik.....	3-6
3.9	Detaljer i en geologisk model.....	3-6
3.10	Usikkerheder på geologisk model.....	3-7
3.11	Praktiske eksempler på tolkning af hydrogeologiske modeller.....	3-7
3.12	Referencer.....	3-8
4	Opstilling af hydrogeologisk tolkningsmodel.....	4-1
4.1	Definition.....	4-1
4.2	Afgrænsning af område.....	4-1
4.3	Hvilke hydrologiske processer og geologiske strukturelle forhold skal indrages?.....	4-2
4.4	Fastlæggelse af hydrostratigrafiske enheder.....	4-2
4.5	Fastsættelse af tidsperioder.....	4-3
4.6	Parameterfastsættelse ud fra geologiske informationer og hydrologiske data.....	4-3
4.7	Skaleringseffekter.....	4-4
4.8	Usikkerhed på konceptuel model.....	4-4
4.9	Referencer.....	4-4
5	Matematisk og numerisk grundlag for grundvandsmodellering.....	5-1
5.1	Tre-dimensionale strømningssligning.....	5-1
5.2	To-dimensional strømningssligning.....	5-4
5.3	Forudsætninger for løsning af partielle differentilligninger.....	5-5

5.4	Numerisk diskretisering	5-6
5.5	Formulering og løsning af differensligninger	5-9
5.6	Supplerende litteratur	5-13
6	Fra hydrogeologisk tolkningsmodel til numerisk grundvandsmodel	6-1
6.1	Valg af kode	6-1
6.1.1	Procesbeskrivelsen	6-1
6.1.2	Mulighed for partikelbanesimuleringer	6-3
6.1.3	Mulighed for automatisk at indbygge hydrogeologiske egenskaber ud fra en rumlig opfattelse af hydrogeologien	6-3
6.1.4	Mulighed for invers modellering samt anden form for automatiseret parameterestimering	6-3
6.1.5	Kvalitet af dokumentation, herunder verifikation af koden, manualer og lignende	6-3
6.1.6	Mulighed for erfaringsudveksling med andre brugere, support fra kodeudvikleren	6-3
6.1.7	Fremtidsudsigter for koden, herunder hvilken mulighed der er for at skifte til andre koder uden alt for stort tab af arbejdsindsats	6-4
6.1.8	Hvordan er den at arbejde med, hvordan er mulighederne for at automatisere trivielle opgaver, såsom opdatering af hydrogeologien, plotning af indvindingsoplande, mulighed for integration i gis systemer osv.	6-4
6.1.9	Udbuddet	6-4
6.2	Verificering af kode	6-5
6.3	Præprocessering - overførsel af hydrogeologiske parametre til modellen	6-5
6.4	Beskrivelse af databehovet i forhold til valgte model og inkluderede procesbeskrivelser	6-9
6.5	Referencer	6-10
7	Fastlæggelse af randbetingelser	7-1
7.1	Randbetingelsestyper	7-1
7.1.1	Betydning af valget af randbetingelser	7-1
7.1.2	Konstante kontra tidsvarierende randbetingelser	7-3
7.2	Implementering af ydre randbetingelser	7-3
7.3	Implementering af indre randbetingelser(infiltration/ grundvandsdannelse, vandløb, dræn søer/overfladisk afstrømning, oppumpninger)	7-4
7.3.1	Infiltration	7-4
7.3.2	Vandløb	7-4
7.3.3	Dræn	7-5
7.3.4	Søer, damme og overfladeafstrømning	7-5
7.3.5	Oppumpninger	7-5
7.4	Referencer	7-6
8	Diskretisering af modelområdet i tid og sted	8-1
8.1	Diskretiseringstyper	8-1
8.1.1	FD og FE	8-1
8.1.2	Ækvidistante eller varierende grid	8-2
8.2	Tidsskridt	8-3
8.2.1	Valg af diskretisering	8-3
8.2.2	Diskretisering i sted	8-4
8.2.3	Diskretisering i tid	8-4
8.3	Diskretiseringsfejl	8-5
8.3.1	Numeriske fejl	8-5
8.2.4	Skalaeffekter	8-5
8.4	Hvordan tester man sin diskretisering	8-6
8.5	Referencer	8-6

9	Processering af tidsseriedata.....	9-1
9.1	Nedbør, potentiel fordampning og temperatur.....	9-1
9.2	Arealanvendelse, jordtyper, jordfugtighed og aktuel fordampning	9-4
9.3	Vandindvinding.....	9-6
9.4	Trykniveau i form af tidsserier og potentialebilleder.....	9-7
9.5	Afstrømningsdata ved målestationer og synkronmålinger.....	9-7
9.6	Referencer	9-8
10	Dynamisk model.....	10-1
10.1	Indledning	10-1
10.2	Kategorisering af modeltyper.....	10-1
10.3	Inputdata til beregning af grundvandsdannelse	10-4
10.4	Integreret modellering.....	10-10
10.5	Overvejelser om valg af stationær og/eller dynamisk model.....	10-11
10.6	Initialbetingelser og tidsskridt.....	10-14
	tidslig diskretisering.....	10-15
10.7	Referencer	10-16
11	Skalaforhold og heterogenitet.....	11-1
11.1	Indledning	11-1
11.2	Geostatistisk karakterisering af geologiske heterogenitet.....	11-2
11.3	Observationer af geologiske heterogenitet.....	11-4
11.4	Skala-forhold i hydraulisk ledningsevne.....	11-7
11.5	Effektiv hydraulisk ledningsevne.....	11-11
11.6	Effekten af geologisk heterogenitet på trykniveau.....	11-13
11.7	Diskussion og opsummering.....	11-18
11.8	Referencer	11-19
12	Nøjagtighedskriterier	12-1
12.1	Indledning	12-1
12.2	Indledende fastlæggelse af nøjagtighedskriterier i udbudsfasen.....	12-3
12.3	Modelopstilling og observationsdata	12-3
	12.3.1 Typer af observationsdata	12-4
	12.3.2 Målinger af grundvandets trykniveau	12-4
	12.3.3 Datakontrol og processering	12-8
12.4	Usikkerhed på observationsdata	12-9
	12.4.1 Observationer af hydraulisk trykniveau	12-9
	12.4.2 Observationer af vandløbsvandføring.....	12-11
	12.4.3 Anvendelse af usikkerhedsestimater	12-13
12.5	Performance kriterier	12-13
	12.5.1 Typer af kriterier	12-13
	12.5.2 Valg af nøjagtighedskriterier.....	12-16
12.6	Testkørsel og fastlæggelse af kvantitative og kvalitative nøjagtighedskriterier forud for kalibrering.....	12-17
12.7	Referencer	12-20
13	Kalibrering af strømningsmodel	13-1
13.1	Indledning	13-1
13.2	Kalibreringsparametre.....	13-3
	13.2.1 A-priori viden om parametre.....	13-3
	13.2.2 Valg af kalibreringsparametre.....	13-4
13.3	Estimationsteknik.....	13-5
	13.3.1 Entydighed	13-5

13.3.2	Manuel kalibrering ('trial-and-error' estimation).....	13-6
13.3.3	Automatisk kalibrering (invers modellering).....	13-7
13.4	Præsentation af kalibreringsresultat.....	13-8
13.4.1	Beskrivelse af kalibreringsprocessen (kalibreringsjournal).....	13-8
13.4.2	Parameterestimer samt deres usikkerhed.....	13-9
13.4.3	Overensstemmelse mellem observationer og simulering.....	13-9
13.5	Referencer.....	13-13
14	Invers modellering.....	14-1
14.1	Indledning.....	14-1
14.2	Kalibreringskriterium (objektiv funktion).....	14-2
14.2.1	Vægtning indenfor datatyper.....	14-3
14.2.2	Vægtning mellem forskellige datatyper.....	14-4
14.2.3	Brug af a priori information.....	14-6
14.3	Optimeringsalgoritmer.....	14-6
14.3.1	Suffle complex evolution method (sce-metoden).....	14-7
14.3.2	Gradientbaserede metoder.....	14-7
14.4	Entydighedsproblemer.....	14-9
14.5	Parameterusikkerhed.....	14-10
14.6	Eksempel.....	14-12
14.7	Analyse af output fra invers model.....	14-16
14.7.1	Urealistiske parameterestimer.....	14-17
14.8	Evaluering af kalibreringsresultat.....	14-18
14.9	Referencer.....	14-18
15	Validering.....	15-1
15.1	Indledning.....	15-1
15.2	Definition og formål med modelvalidering.....	15-2
15.3	Forskellige typer af valideringstest.....	15-2
15.4	Praktiske aspekter i forbindelse med modelvalidering.....	15-3
15.4.1	Overparameterisering – antal "frie" parametre.....	15-3
15.4.2	Valideringstest ved stationær grundvandsmodel.....	15-4
15.4.3	Begrænsninger i valideret models gyldighedsområde.....	15-5
15.5	Er kravene til modelvalidering urealistiske i praksis?.....	15-5
15.6	Referencer.....	15-6
16	Modellens repræsentativitet.....	16-1
16.1	Indledning.....	16-1
16.2	Modelantagelser.....	16-1
16.2.1	Procesbeskrivelser.....	16-1
16.2.2	Geometriske og geologiske forsimplinger.....	16-2
16.2.3	Randbetingelser.....	16-2
16.3	Modellens troværdighed.....	16-3
16.4	Modelanvendelse.....	16-4
16.4.1	Typer af tilstandsvariable, der kan simuleres.....	16-4
16.4.2	Skala hvorpå modellen arbejder.....	16-4
16.4.3	Hvilken type modellering kan modellen anvendes til?.....	16-5
16.5	Referencer.....	16-5
17	Anvendelse af modellen: vandbalance, grundvandsdannelse og indvindingsoplande.....	17-1
17.1	Indledning.....	17-1
17.2	Grundvandsressourcevurdering og vandbalanceforhold.....	17-2
17.3	Afgrænsning af områder med opadrettede- eller nedadrettede gradienter.....	17-5

17.4 Grundvandsdannelse til øvre magasiner	17-5
17.5 Grundvandsdannelse til dybere magasiner	17-6
17.6 Grundvandsdannende oplande og indvindingsoplande til magasiner og/eller kildepladser/boringer	17-7
17.7 Transporttider og opholdstider i forskellige grundvandsmiljøer	17-8
17.8 Følsomheds- og usikkerhedsanalyser.....	17-9
17.9 Referencer	17-10
18 Partikelbanemodellering og alderssimulering	18-1
18.1 Indledning	18-1
18.2 Infiltrationsområder og indvindingsoplande	18-2
18.2.1 Infiltrationsområde.....	18-2
18.2.2 Påvirkningsområdet og grundvandsdannende områder	18-2
18.2.3 Karakterisering af infiltrationsområdet	18-5
18.2.4 Indvindingsopland.....	18-6
18.3 Beregning af partikelbaner.....	18-7
18.3.1 Hastighedsinterpolation.....	18-8
18.3.2 Algoritmer til flytning af partikler	18-8
18.4 Partikelbanemodeller	18-9
18.4.1 Mike she partikelbanemodul	18-9
18.4.2 Modpath partikelbanemodul	18-10
18.4.3 Begrænsninger ved numeriske modeller	18-10
18.4.4 Diskussion af partikelbanesimuleringer	18-13
18.5 Grundvandsalder og opholdstidsfordelinger.....	18-14
18.5.1 Metoder til bestemmelse af grundvandets alder.....	18-14
18.5.2 Eksempler.....	18-17
18.5.3 Diskussion af aldersdateringsmetoder.....	18-21
18.6 Referencer	18-22
19 Metoder til usikkerhedsvurdering.....	19-1
19.1 Indledning	19-1
19.2 Definition af usikkerhed	19-2
19.3 Karakterisering af usikkerheden	19-3
19.3.1 Usikkerhedskilde.....	19-3
19.3.2 Niveau af usikkerhed.....	19-4
19.3.3 Usikkerhedens natur.....	19-5
19.4 Usikkerhedskilder	19-5
19.4.1 Konceptuel model	19-5
19.4.2 Model (sted-specifik model)	19-6
19.4.3 Data	19-7
19.4.4 Management scenarier	19-8
19.5 Håndtering af usikkerhed.....	19-8
19.5.1 Elementer i en usikkerhedsvurdering.....	19-8
19.5.2 Identificering og prioritering af usikkerhed	19-9
19.5.3 Kvantificering af usikkerhed.....	19-11
19.5.4 Usikkerhedsstrategi.....	19-12
19.6 Metoder til vurdering af usikkerhedens betydning	19-14
19.6.1 Fejlphobning	19-15
19.6.2 Monte Carlo	19-15
19.6.3 Generalized likelihood uncertainty estimation methodology, GLUE.....	19-20
19.6.4 MODFLOW2000	19-21
19.6.5 PEST	19-22
19.6.6 T-PROGS	19-23

19.6.7 Følsomhedsanalyse	19-24
19.6.8 Multiple model simulation	19-25
19.6.9 Ekspertvurdering	19-26
19.7 Faldgruber og kritiske problemstillinger.....	19-27
19.8 Referencer	19-28
20 Rapportering af model og resultater	20-1
20.1 Indledning	20-1
20.2 Disposition for standardiseret modelrapport.....	20-2
20.3 Referencer	20-7
21 Vedligeholdelse, opdatering og udbygning af modeller. forfining af model.....	21-1
21.1 Kvalitetsdokument, modelrapport og digital kopi af færdige setupfiler mm. til modeldatabasen (fx cd rom).....	21-1
21.2 Modelarkiv. hvilke grunddata og setupfiler bør man gemme digitalt, med henblik på senere opdatering og udbygning af model?.....	21-2
21.3 Opdatering og udbygning af geologisk model, konceptuel model og numerisk modelopsætning	21-2
21.4 Forfining af model (topografi, indre randbetingelser, arealdata, konceptuel model)	21-2
21.5 Regional model – lokal model	21-3
21.6 Referencer	21-4
22 Modelprogrammer på markedet	22-1
22.1 Valg af de 3D modelkoder (motorer) og grafiske bruger interfaces (skaller) der indgår i sammenligningen	22-1
23 Kvalitetssikring i forbindelse med modelopgaver	23-1
23.1 Indledning	23-1
23.2 Mekanismer til at opnå bedre kvalitet i modellering	23-2
23.2.1 Udbudsbetingelser.....	23-2
23.2.2 Milepæle.....	23-3
23.2.3 Gennemførelse af reviews.....	23-3
23.3 Kvalitetssikringsværktøjet most.....	23-4
23.4 Omkostninger ved kvalitetssikring	23-6
23.5 Referencer	23-6
Appendix A Esbjerg modellen – et eksempel.....	1
A.1 Formålet med opstilling af model	1
A.2 Geologisk model	2
A.3 Konceptuel hydrogeologisk model	3
A.4 Valg af kode	6
A.5 Modelopsætning.....	7
A.6 Kalibrering af model	9
A.7 Simuleringer.....	13
A.8 Konklusion.....	19
A.9 Referencer	19
Appendix B Invers kalibrering af dk-model sønderjylland	1
B.1 Indledning	1
B.2 Observationsdata.....	2
B.3 Kalibreringskriterier.....	5
B.4 Udvalgelse af kalibreringsparametre.....	6
B.5 Kalibreringsprocedure.....	8

B.6 Kalibreringsresultat.....	9
B.7 Konklusion.....	15
B.8 Referencer.....	16