Usikkerheder på indvindings- og grundvandsdannende oplande

(Delprojekt 3 om oplande)

Hans Jørgen Henriksen, Claus Holst Iversen, GEUS,
og Thomas Wernberg, Alectia

DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER FOR DANMARK OG GRØNLAND
MINISTERIET FOR KLIMA OG ENERGI

GEUS

Usikkerheder på indvindings- og grundvandsdannende oplande

(Delprojekt 3 om oplande)

Hans Jørgen Henriksen, GEUS, Claus Holst Iversen, GEUS og Thomas Wernberg, Alectia

DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER FOR DANMARK OG GRØNLAND
MINISTERIET FOR KLIMA OG ENERGI

Usikkerheder på indvindings- og grundvandsdannende oplande

(Delprojekt 3 om oplande)

Særudgivelse

Forsidebillede: Baronmosen ved Mårslet
Foto: Bente Fyrstenberg Nedergaard

Omslag: Henrik Klinge
Repro: GEUS
Oplag: 100

December 2010
ISBN tryk: 978-87-7871-301-8
ISBN web: 978-87-7871-302-5

Vejledningen kan hentes på nettet: www.geus.dk
Pris (indbundet): 200 kr.

© De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS
Øster Voldgade 10
DK-1350 København K
Telefon: 38 14 20 00
E-post: www@geus.dk

Udarbejdet i samarbejde med By- og Landskabsstyrelsen (fra 1,1.2011 Naturstyrelsen) Miljøministeriet.

Forord **6**

1. Indledning **7**

2. Litteraturstudium: Usikkerhedsbetragtninger på numerisk beregnede oplande **9**

2.1 Introduktion til videnspyramiden 9
2.2 Modelleringsprocessen (~ modelusikkerhed) 11
2.3 Scenarieudvikling (~ management scenarie usikkerhed) 12
2.4 Litteraturgennemgang - den tidlige litteratur (I: 1990-2000) 12
2.5 Litteraturgennemgang - 0'ernes litteratur (II: 2000-2009) 15
2.6 På vej mod 2020 (Litteraturgennemgang - III: 2009 -) 19
2.7 Diskussion 21
Vidensspyramiden og fokusområder 21

3. Usikkerheder på oplande og metoder til at belyse disse **23**

3.1 Usikkerhedsmatricen 23
3.1 Modelprocessen og specifikke metoder til usikkerhedshåndtering 26
Trin 1 – Fra Identifikation til Modelstudieplan 26
Trin 2 – Data og konceptualisering 27
Trin 3 – Modelopstilling 32
Trin 4 – Kalibrering og validering 35
Trin 5 – Fra simulering og evaluering til beslutninger om IO og GO under usikkerhed 37

4. Eksempel på oplandsberegninger og usikkerhedsvurderinger i et pilotområde på Als **44**

4.1 Pilotområde 44
4.2 Fremgangsmåde 45
4.2.1 Opstilling af usikkerhedsmatricen 45
4.2.2 Vurdering af parameterusikkerhed på oplandsberegninger 46
4.2.3 De 5 hydrostratigrafiske modeller 49
4.3 Resultater 51
4.3.1 Dataindsamling og usikkerhedsmatricer for de 4 kildepladser 51
4.3.2 Scenarier for de 4 kildeplader (Nordborg, Broballe, Danfoss A/S og Stevning 55
Opland 1: Nordborg kildeplads 56
Opland 2: Broballe kildeplads 59
Opland 3: Danfoss A/S kildeplads ved Nordborg 62
Opland 4: Stevning kildeplads 65
4.4 Dokumentation af oplande 68
4.5 Sammenfatning 70

5. Konklusioner og anbefalinger **71**

5.1 Konklusioner 71
5.2 Anbefalinger 71
5.3 Andre parametre og relevante følsomhedsanalyser 73

6. Referencer **74**

Forord

Nærværende rapport er udarbejdet af en arbejdsgruppe bestående af Claus Holst Iversen, GEUS (projektleder), Thomas Wernberg (Alectia), Hans Jørgen Henriksen (GEUS) og Steen Christensen (Århus Universitet).

Arbejdsdelingen i gruppen har været som følger (med feedback fra de øvrige):

Kapitel 1: Introduktion: Claus Holst Iversen og Hans Jørgen Henriksen

Kapitel 2: Litteraturstudium: Hans Jørgen Henriksen

Kapitel 3: Metodik: Hans Jørgen Henriksen og Claus Holst Iversen

Kapitel 4: Afprøvning på pilotområde Als: Thomas Wernberg og Claus Holst Iversen

Kapitel 5: Konklusioner: Hans Jørgen Henriksen, Claus Holst Iversen og Thomas Wernberg

Steen Christensen, Århus Universitet har deltaget i arbejdsgruppen som sparringspartner og med ekstern kvalitetssikring.

Jens Christian Refsgaard, GEUS har bidraget med intern kvalitetssikring af rapportudkast.

1. Indledning

Formålet med dette delprojekt er at beskrive fremgangsmåder og metoder i forbindelse med usikkerhedsbetragtninger på beregnede indvindings og grundvandsdannende oplande i den nationale grundvandskortlægning (som supplement til Geo-Vejledning nr. 2). Herunder at fremhæve hvilke delkomponenter af en typisk kalibreret grundvandsmodel som er følsomme i forhold til beregning af indvindingsoplande.

For det andet er formålet at komme frem til klare anbefalinger omkring hvordan man optegner og sætter stregen på det enkelte opland så rigtigt som muligt, men samtidig tydeliggør de usikkerheder, der ligger bag fortolkningen af det enkelte opland.

Et tredje formål er at belyse, om der bør benyttes stedspecifikke krav til usikkerhedsbetragtninger i forbindelse med udpegning af indvindings- og grundvandsdannende oplande på tværs af oplandet som følge af forskelle relateret til bl.a. vandløbskontakt, geologi/konceptuel model, potentiale/gradientforhold, magasinforhold /hydrauliske parametre, nettonedbør / klima og arealanvendelse, indvindingsforhold / og datagrundlag.

Fremgangsmåden er følgende:

1. Litteraturstudium over, hvad der foreligger på området i Danmark og i udlandet omkring usikkerheder på indvindings- og grundvandsdannende oplande.
2. Inddragelse af viden og erfaringer fra relevante rådgivningsopgaver, hvor der er foretaget usikkerhedsvurderinger af indvindingsoplande
3. Udvælgelse af et modelområde fra Miljøcentrenes feltområder, hvor den anbefalede fremgangsmåde efterprøves.

Indledningsvis er det vigtigt at definere de to begreber indvindingsopland (IO) og grundvandsdannende opland (GO).

Indvindingsoplandet (IO) defineres ud fra definitionen benyttet i Håndbog i grundvandsmodellering (Sonnenborg og Henriksen, 2005). Fra det infiltrerende vand når grundvandsspejlet og til det ender i boringens filter, vil det strømme gennem et volumen af grundvandssystemet, der betegnes indvindingsoplandet (Miljøstyrelsen, 1995). På engelsk anvendes udtrykket *"capture zone"* når der er tale om oprensning af forurening, mens der oftest benyttes termen *"well head protection zone"*, når der er tale om beskyttelse af vandkvaliteten i forbindelse med grundvandsindvinding til vandforsyning. Indvindingsoplandets form vil i høj grad afhænge af potentialeforholdene i grundvandssystemet, da strømningen ind mod boringen er styret af gradientforholdene i magasinet. For simple problemstillinger kan der findes analytiske løsninger til afgrænsning af indvindingsoplandet (Miljøstyrelsen,1995), men generelt er det nødvendigt at opstille en tre-dimensional strømnings- og partikelbanemodel, hvis der skal opnås realistiske estimater.

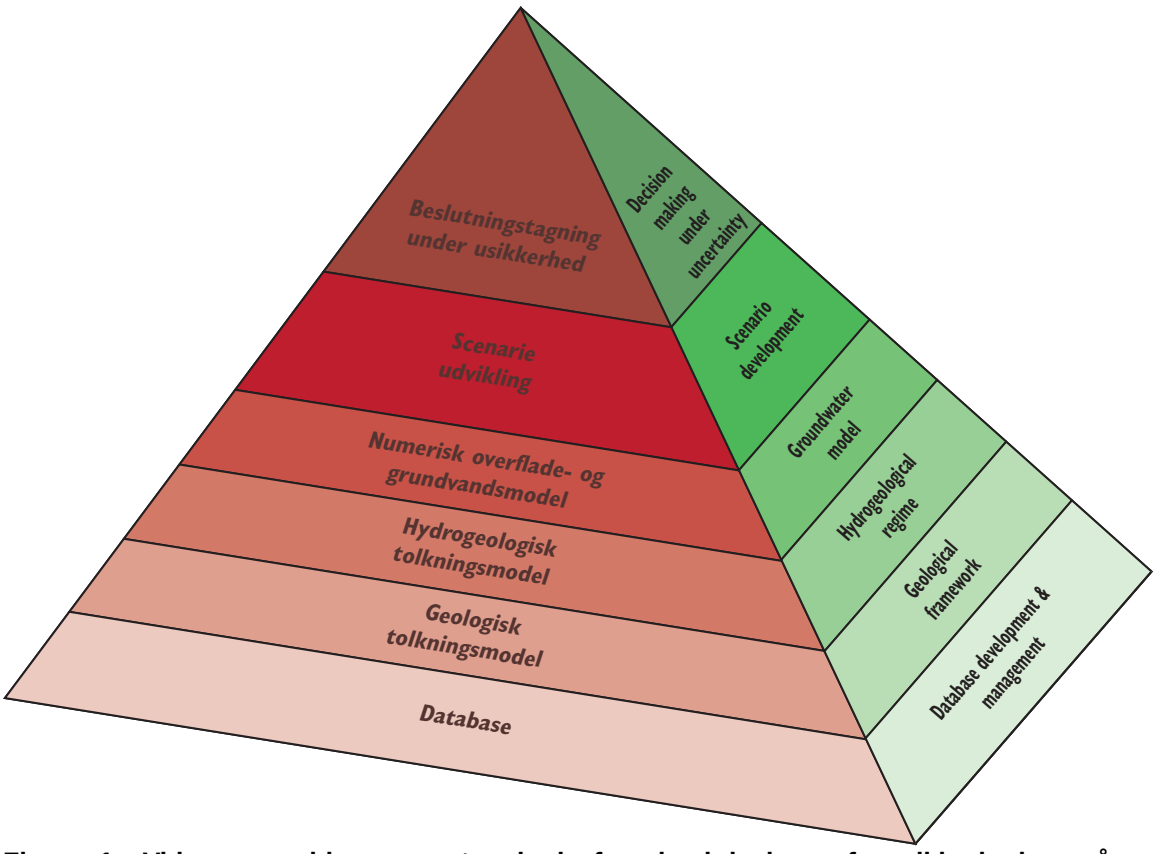
Grundvandsdannende opland (GO): Det grundvandsdannende opland til en kildeplads omfatter hele det areal, dvs. den/de flade(r) på jordoverfladen, hvor nedbør infiltrerer og tilgår grundvandsmagasinet, og herfra strømmer videre via indvindingsoplandet til kildepladsens indvindingsboringer. Den geologiske lagfølge over grundvandsmagasinet, variabilitet i terræn og terrænnære strømnings- og vandspejlsvariationer, herunder tidslige variationer i nedbør, fordampning og

afstrømning til dræn og vandløb mv., er med til at bestemme størrelsen af den arealdistribuerede grundvandsdannelse, og dermed de usikkerheder der indgår i afgrænsningen af de grundvandsdannende områder til en kildeplads. Drænene vil transportere en del af den nedbør, der infiltrerer til grundvandsspejlet væk fra grundvandssystemet, og denne del vil dermed ikke kunne bidrage som kilde til en indvindingsboring. Den arealdistribuerede grundvandsdannelse kan ikke bestemmes ved simple analytiske løsninger, men kræver en detaljeret numerisk analyse, der kan have væsentlige usikkerheder (Sonnenborg og Henriksen, 2005).

2. Litteraturstudium: Usikkerhedsbetragtninger på numerisk beregnede oplande

2.1 Introduktion til videnspyramiden

Dette kapitel gennemgår det litteraturstudie, der er foretaget, vedr. usikkerheder på indvindings- og grundvandsdannende oplande. I det følgende anvendes en modificeret videnspyramide Council of Canadian Academies (2009) som en overordnet typologi for karakterising af usikkerheder (Fig. 1).



Figur 1 Videnspyramide som typologi for beskrivelse af usikkerheder på modelsimulerede indvindingsoplande (modificeret i forhold til Council of Canadian Academies, 2009).

Elementerne i videnspyramiden kan kort beskrives på følgende måde:

- *Database* med let tilgængelige, vedligeholdte og opdaterede geologiske og hydrogeologiske data og kendskab til usikkerheder på data fx potentiale, afstrømning, geologi.
- *Geologisk tolkningsmodel* ud fra geologisk hovedtype, boringsdata, geofysiske kortlægninger, geologisk fortolkning og tolkninger af usikkerheder på geologisk model
- *Hydrogeologisk tolkningsmodel* med strukturelle elementer og processer der skal indgå i den numeriske model, herunder usikkerheder på konceptuel model fx anvendte procesligninger, inddeling i strukturelle elementer, randbetingelser, inputdata der driver modellen samt vandbalanceforhold

- *Numerisk overflade- og grundvandsmodel* med model-diskretisering, fastlagte parametre, randbetingelser, samt input-, parameter-, modelstruktur- og prediktions-usikkerheder
- *Scenarie udvikling* med management scenarier der skal belyses med modellen inkl. framing usikkerhed vedr. fremtidige forhold der skal tages højde for (fremtidig indvindingsstruktur, klima forhold, arealanvendelse mv.)
- *Beslutningstagning under usikkerhed* dvs. hvordan der tages højde for de usikkerheder der er på hvordan 'stregen' slås (IO og GO) i den videre planlægning og grundvandsbeskyttelsesindsats.

En oversigt over tilgængelige data jf. det nederste lag i videnspyramiden "database viden" fremgår af tabel 1.

Tabel 1 Status i 2009 for database viden (~ kilder til data usikkerhed) jf. borings- og geofysikdatabaser i DK (Refsgaard et al., 2010b).

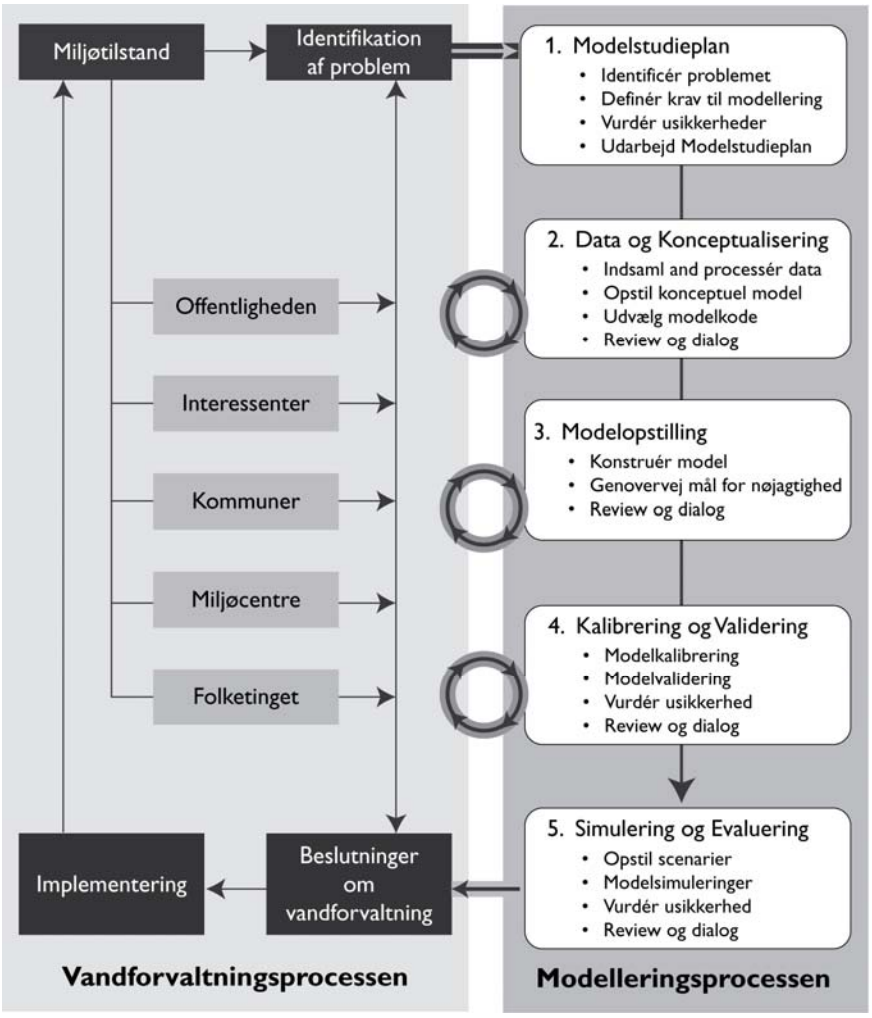
Datatyper	Data karakteristik
JUPITER – National borings database	
Geologiske beskrivelser	253.000 boringer
Grundvandstand	> 2.540.000 observationer fra 130.000 boringer (heraf 2500 med >100 tidsserieobs.)
Vandindvinding – tilladelser	> 40.000 boringer
Vandindvinding – aktuelle indvindinger	> 40.000 boringer/kildepladser (årlige data)
Grundvandsmagasiner (WFD gw bodies)	385
GERDA – National geofysik database	
Wenner profiler	2044 linie km med op til 3 elektrode afstande, total 94.261 data punkter
Schlumberger sonderinger	31.979 sonderinger
PACES sonderinger	9536 effektive linie km dækkende et areal på mere end 3300 km^2. 1.012.069 data positioner i total
CVES sonderinger	4109 linie km med ca. 10 elektrode afstande. 6.568.969 data punkter total
TEM sonderinger	347.670 sonderinger af hvilke 274.217 er SkyTEM. Rapportering af 2007-2008 ikke afsluttet. Kortlagt areal (2009): 12.000 km^2.
Borehuls logs	1517 boringer med i alt 9425 log kørsler.

Bemærk at der ikke er medtaget afstrømningsdata i tabellen. Der findes tidsserier for vandstand og vandføring for ca. 400 stationer og enkeltmålinger ved over 900 stationer fordelt på hele landet, heraf indsamles der stadig data ved ca. 300-400 målesteder. De fleste data fra vandløbsstationer er lagret i fagsystemet HYMER hos DMU, mens Orbicon har nogle ekstra kommunale data i deres HYMER. Hos DMU forventes vandføringer med daglige vandstande og vandføring at være tilgængelige i overfladevandsdatabasen ODA fra primo 2011 (forventes tilgængelig via Miljøportalen på et senere tidspunkt). Data er umiddelbart tilgængelige for Miljøministeriet og DMU. Der er derfor i skrivende stund ikke en samlet, let tilgængelig adgang til samtlige afstrømningsdata og medianminimumsskøn af relevans for afgrænsning af IO og GO.

2.2 Modelleringsprocessen (~ modelusikkerhed)

Karakteristisk for de næste tre lag i videnspyramiden: geologisk tolkningsmodel, hydrogeologisk tolkningsmodel og numerisk grundvands- og overfladevandsmodel, er at de tilvejebringes som en del af modelleringsprocessen, og at modelusikkerheden dermed bl.a. afhænger af om den er tilvejebragt jf. god praksis for hydrologisk modellering (Refsgaard et al., 2010a).

Interaktionen mellem modelleringsprocessen og vandforvaltningsprocessen finder sted i fem hovedtrin, som en modelleringsproces består af (Fig. 2).



Figur 2 Vandforvaltnings- og modelleringsproces (Kilde: Refsgaard, 2007).

Ved opstilling af den hydrogeologiske tolkningsmodel vil de usikkerheder, der indgår i datagrundlaget og vedr. *geologisk tolkningsmodel*, blive overført til den hydrogeologiske tolkningsmodel. Ofte vil data i den geologiske model, fx tolkningen af jordtyper, kun kunne markeres med en subjektiv markør, og feedback fra hydrogeologisk tolkningsmodel til datagrundlag og geologisk tolkningsmodel er derfor nødvendig, hvis der skal foretages ændringer i de foregående trin. Modelleringsprocessen jf. god praksis i hydrologisk modellering er derfor rig på feedback processer (Refsgaard et al., 2010a).

Den *hydrogeologiske tolkningsmodel* (konceptuelle model) skal afspejle en tilstrækkelig systemforståelse, dvs. forståelse af de fysiske processer og systemets

struktur. Ofte vil vi kun have et begrænset kendskab til interaktionen mellem de forskellige processer og strukturer ud fra boringer og geofysiske data. Den hydrogeologiske tolkningsmodel repræsenterer i sådanne tilfælde blot et bud på en tolkning, som aldrig kan blive bedre end de tilgrundliggende data og den tilgrundliggende geologiske model tillader. Den hydrogeologiske tolkningsmodel er derfor forbundet med usikkerhed, som vil have en væsentlig betydning for usikkerheden ved bestemmelse af indvindings- (IO) og grundvandsdannende oplande (GO).

Ud fra den konceptuelle model opstilles den *numeriske overfladevands- og grundvandsmodel*. Det betyder, at der nu skal vælges en modelkode, som er i stand til at håndtere de processer, der skal simuleres, og i den detaljeringsgrad det vurderes nødvendigt. Ved afgrænsning af indvindingsoplande vha. partikelbanesimuleringer vil en finere diskretisering i såvel rum som tid generelt føre til et mere korrekt beregningsresultat (Sonnenborg og Henriksen, 2005), men hensyn til egnede randbetingelser osv. betyder at modelopstilling indebærer en række faglige afvejninger.

2.3 Scenarieudvikling (~ management scenarie usikkerhed)

Scenarieudvikling er en formulering af samfundsmæssige og institutionelle rammer, målsætninger og kravspecifikationer for modelstudiet, som dermed har betydning for hvordan fx modelstudieplanen udformes, fx identifikation af problemet, definition af krav til modelleringen, krav til usikkerhedsvurdering mm. Scenarieudvikling vil dermed afhænge såvel af samspil mellem en række aktører fx offentlighed, interessenter, kommuner, miljøcentre og folketinget som af grundvandets og miljøets tilstand i det konkrete område, der skal modelleres. Det kan spille ind på om modelsimuleringerne alene skal bruges til afgrænsning af IO og GO, eller om modelsimuleringerne også skal belyse fx vandløbspåvirkning fra vandindvinding og effekter af klimaændringer.

Hvis der indgår effekter af klimaændringer i scenarieudvikling, skal der i princippet tages højde for det fremtidige klima, vandindvinding, arealanvendelse, dræning mm., der har betydning for hvordan ferskvandskredsløbet, indvindings- og grundvandsdannende oplande påvirkes indenfor en relevant planlægningshorisont.

Mens man for håndteringen af fx data og modelusikkerhed enten kan vælge at søge at reducere usikkerheden (fx ved at indsamle flere eller bedre data) eller må acceptere en vis variabilitet (fx usikkerheden på hvordan vejret bliver om tre måneder), altså en usikkerhed som man ikke umiddelbart kan reducere, så kræver håndtering af management scenarie usikkerhed en læringsbaseret tilgang til usikkerhedsvurdering, fx baseret på forhandling og/eller dialog (Brugnach et al., 2011).

2.4 Litteraturgennemgang - den tidlige litteratur (I: 1990-2000)

Zoneopdelt grundvandsbeskyttelse med udgangspunkt i afgrænsning af indvindingsoplande har været kendt og anvendt i flere årtier. For eksempel har Tyskland siden 1950'erne og Holland siden 1960'erne haft reguleringer på arealanvendelsen i indvindingsoplande afhængigt af afstanden til indvindingsboringerne eller transporttiden for grundvandet (Rasmussen et al., 1995). I den tidlige litteratur er der, når det gælder usikkerhed, primært fokus på

følsomhedsanalyser[1] af input- og modelparametre, fx grundvandsdannelsens, den hydrauliske ledningsevnes og den effektive porøsitets betydning for fastlæggelsen af indvindingsopland og transporttider (Foster, 1994; Matthes et al. 1985; Bair et al. 1991; Varjen and Shafer, 1991; Lerner, 1992; Springer and Bair, 1992; Foster et al., 1997; Cleary and Cleary, 1991; EPA 1998; Miljøstyrelsen, 1995).

De første usikkerhedsovervejelser med fokus på følsomhedsanalyser i forhold til parameterværdier og grundvandsdannelse afspejler den daværende modelbrug, som typisk var baseret på stationære 2D grundvandsmodeller (Bhatt, 1993) eller analytisk element modeller (Bakker and Strack, 1996; Kramer et. al, 1994). Definitionen af indvindingsoplandet blev typisk beskrevet fx ved et 'bedste estimat', en 'usikkerhedszone' og en 'konfidenszone'. Konfidenszonen var her defineret som fællesmængden[2] af indvindingsoplande, der kom ud af kørsler med forskellige parameterkombinationer inden for sandsynlige intervaller, mens usikkerhedszonen var afgrænset af enkelte realisationer af simuleret indvindingsopland (foreningsmængden af samtlige kørsler som lå uden for 'konfidenszonen') (Foster and Skinner;1995a,b; Evers and Lerner, 1998). Henriksen og Rasmussen (1997) fremhæver efter afprøvning af zoneringsmetoder, at "det bør sikres, at kortlægningen af vandførende og lavpermeable lag sker i fuld kompabilitet med opstilling og kalibrering af 3-D grundvandsmodeller. Derved kan der foretages modelleringer af de indsamlede data med henblik på en vurdering af behov for nye data, kvantificering af de hydrauliske forhold og kvalitetssikring af den konceptuelle model. Endelig kan forskellige hypoteser og antagelser testes med modellen" (Henriksen og Rasmussen, 1997).

Ståbi i grundvandsmodellering (Henriksen, 2001) og de første retningslinier i grundvandsmodellering (http://www.vandmodel.dk/staabi_2000.htm) giver ikke nogen præcis beskrivelse af hverken usikkerhedsvurderinger eller partikelbanesimulering af indvindingsoplande. Disse kapitler kom først med i en senere opdatering af ståbien til "Håndbog i grundvandsmodellering" (Sonnenborg og Henriksen, 2005). Det nævnes, at man gennem en følsomhedsanalyse 'enkeltvis' kan ændre parametre eller input og vurdere indflydelsen på prediktionsusikkerheden og at der som minimum bør gennemføres følsomhedsanalyser af indvindingsoplandet (Henriksen, 2001). Endelig nævnes det, at det i praksis endnu ikke er muligt at lave usikkerhedsanalyser, som tager hensyn til alle disse forskellige kilder, men at man vha. invers modellering (inverse rutiner[3]) rimeligt nemt kan lave usikkerhedsvurderinger forårsaget af usikkerhed på parameterværdierne og usikre inputdata, hvis sidstnævnte usikkerheder kan beskrives statistisk (fx Varljen and Schafer, 1991; Bhatt, 1993;

---

1 **Følsomhedsanalyse (FA)**: Metode til analyse af simuleringsresultaternes følsomhed over for ændringer i kalibreringsparametre og andre modelantagelser, fx randbetingelser, hydrauliske parametre og tolkning af geologien. Ved en følsomhedsanalyse analyseres følsomheden over for de enkelte usikkerhedskilder enkeltvis.

2 **Fællesmængde og foreningsmængde af indvindingsoplande (FF)**: Metode til præsentation af fællesmængden og foreningsmængden af 'simulerede oplande' sammen med resultatet af den kalibrerede model, fx fra alternative konceptuelle modeller, monte carlo simuleringer af oplande, eller resultater af følsomhedsanalyser af fx nettonedbør.

3 **Inverse rutiner:** Udover parameterestimering, så kan inverse rutiner anvendes til vurdering af prediktionsusikkerhed, med lidt forskellige metodikker afhængig af valgte inversions rutiner (fx PEST, UCODE osv.). Den prediktionsusikkerhed, man ønsker at bestemme, anvendes som 'observation', og regressionsalgoritmen bruges efterfølgende til at kvantificere effekten af parameterusikkerheden på 'denne valgte observation'. Metoden resulterer i prediktionsusikkerhed givet den valgte modelstruktur.

Kinzelbach and Vassolo, 1996; Evers and Lerner, 1998; Vassolo et al., 1998; Leeuwen et al., 1998).

Det er muligt at opstille forskellige alternative geologiske tolkninger og/eller procesbeskrivelser og herefter opstille et antal alternative konceptuelle[4] numeriske modeller. Hver af disse modeller skal så kalibreres og valideres fx ved hjælp af inverse rutiner (fx PEST), således at "spændvidden" i kalibrerings- og valideringsresultat for lige "sandsynlige" modeller kan kvantificeres i forhold til observationsdata.
Som praktisk anbefaling til håndtering af usikkerhed på fx indvindingsoplande foreslog U.S. Army Corps (1999) følgende fremgangsmåde:

(1) "Best estimate" inkl. sensitivitetsanalyse
(2) "Bracketed ranges" (udvalgte "end-members") og
(3) "Systematisk" usikkerhedsanalyse.

Metode (1) indebærer en kobling med resultater af en sensitivitetsanalyse, med henblik på at benytte en vifte af forskellige akvifer-parametre. Metode (2) indebærer, at der udvælges to eller flere "konceptuelle modeller" eller kalibreringsresultater svarende til forskellige parameterkombinationer. Resultaterne af disse bør "indhylle" det samlede problemkompleks' variabilitet. Indhylningsmetodikken giver rekvirenten en bedre forståelse af den overordnede modelperformance, svarende til usikkerhed på parameterværdier. Metode (3) består i at benytte fx inverse rutiner (fx PEST) og/eller Monte Carlo simulering, til en systematisk analyse af modelresultater (Leeuwen et al., 1998; Vassolo et al., 1998). Parameter- og inputværdier skal her gives en variationsramme (sandsynlighedsfordeling), og resultater returneres som en variationsramme (sandsynlighedsfordeling). Beregningstid og analyseniveau ved denne type metodikker er langt mere omfattende end ved anvendelse af (1) – (2). Fortsat stigende beregningshastigheder på computerhardware og softwareudvikling forøger udbredelsen af denne form for usikkerhedsanalyse.

Delkonklusion I:
Begrænsninger for hvilke usikkerhedsanalyser man i praksis anvendte frem til årtusindskiftet (fx partikelbanesimulering) var dels defineret af beregnings-hastigheder på computerhardware og softwareudvikling, men også begrænset af den fortsat udprægede brug af 2D grundvandsmodeller (som fx AEM-modeller). Invers modellering, Monte Carlo metodik og 'Bracketed ranges' (og alternative konceptuelle modeller) udgjorde dog nye metodikker, hvorved inputusikkerhed, parameterusikkerhed og konceptuel modelusikkerhed kunne analyseres, og en gryende forståelse for nødvendigheden af en mere systematisk usikkerhedsanalyse begyndte at tegne sig bl.a. i den internationale litteratur. I slutningen af halvfemserne begyndte 3D-modeller at vinde indpas og indgik i stigende grad i visualiseringen af strømningsforhold i mere komplekse hydrogeologiske systemer, hvilket åbnede mulighed for kalibrering også i forhold til miljøtracere / aldersdatering (Martin and Frind, 1998).

4 **Alternative konceptuelle modeller**: Den konceptuelle model vil i nogle sammenhænge udgøre den væsentligste usikkerhedskilde. Her kan udarbejdelsen af alternative konceptuelle modeller være en metode til håndtering af denne type usikkerhed. Usikkerheden forbundet med den konceptuelle model vil i nogen grad undertrykkes af kontekstspecifik kalibrering, hvor man så at sige kalibrerer sig ud af en utilstrækkelig geologisk model. Når man anvender disse modeller til simuleringer, som de ikke er kalibreret op imod, opstår usikkerhederne, det kan fx være simulering af arealdistribueret grundvandsdannelse og grundvandsdannende oplande, stoftransport mv.

2.5 Litteraturgennemgang - 0'ernes litteratur (II: 2000-2009)

Opstilling af en på det foreliggende grundlag fyldestgørende 3D-model (geologisk og hydrologisk), der afspejler den aktuelle udstrækning af de vigtige grundvandsmagasiner, og fokus på nøjagtighedskriterier for kalibrering, validering, usikkerheder og kvalitetssikring bla. ved reviews[5] blev i 0'erne *state-of-the-art* omkring modellering af indvindingsoplande. Det førte til mere fokus på at inkorporere al tilgængelig viden og alle tilgængelige data i opbygningen af en tredimensional grundvandsmodel. I DK, hvor gebyrkortlægningen genererede en hidtil uset mængde af geofysiske data, blev det nu i stigende grad muligt at opløse geologiske lagfølger og strukturer på et detaljeret niveau og give det som input til de numeriske modeller.

Modelopstilling og anvendelse havde fortsat fokus på *'long term average flow conditions'* (Frind et al., 2002), idet det blev antaget, at sæsonmæssige variationer blev dæmpet, specielt når det gjaldt strømningsforholdene i de primære grundvandsmagasiner. Der var et voksende fokus på en skelnen mellem det grundvandsdannede opland og indvindingsoplandet. Frind et al. (2002) konkluderede fx, at for komplekse hydrogeologiske systemer kunne partikelbanesimuleringer være grove og irregulære og kræve en nærmere vurdering med henblik på oversættelse til brugbare administrative oplande. Baglæns advektiv-dispersiv transportmodellering kunne her give et mere pålideligt bud i forhold til baglæns partikelbanesimulering. Kombineret brug med partikelbanesimulering til screeningsformål og efterfølgende transportmodellering af indvindingsopland og grundvandsdannende opland, blev foreslået som mere robust metodik. Frind et al. (2002) fastslog, at en fuld 3D-repræsentation er essentiel, og at den konceptuelle model bør inkludere storskala heterogeniteter (fx sandvinduer) for at være tilstrækkelig pålidelig.

Harrar et al. (2003) introducerede brugen af alternative konceptuelle modeller som et værktøj til praktisk håndtering af usikkerheder på den geologiske model med henblik på vurdering af gennembrudskurver, indvindingsoplande og transporttid. Henriksen (2003) slog til lyd for, at troværdighed handler om at 'fortælle om usikkerhederne fra start til slut i et modelprojekt'. Med reference til Harrar et al. (2003) vurderede Henriksen (2003), at alternative konceptuelle modeller er velegnede til at belyse og konkretisere usikkerheder på hydrologiske modeller. Håndtering af usikkerheder handler derfor om at gøre modelleringsprocessen gennemsigtig for parterne, da modellens pålidelighed afhænger af en grundig konfirmering af den konceptuelle model, verifikation af modelkoden, samt validering af modelopsætningen. På den anden side er troværdigheden meget afhængig af en god kommunikation mellem modellør og vandressourceforvalter (Frind et al., 2006; Henriksen og Højberg, 2008). Herved understregedes også betydning af reviews, og brug af ekstern reviewer, som et afgørende element i modellering og usikkerhedsvurdering.

Bakr og Butler (2003) tog spørgsmålet om betydningen af trykniveau- og transmissivitetsobservationer op for afgrænsning af indvindingsoplande. De nåede frem til, at datagrundlaget i form af T-værdier for relativt homogene grundvandsmagasiner ikke er afgørende, hvorimod det er vigtigt at have trykniveau-observationer til rådighed. Omvendt har T-værdi-observationer ved mere heterogene magasinforhold afgørende betydning for afgrænsning af indvindingsoplande. End ikke meget store mængder trykniveau-observationer kan tilstrækkeligt gøre rede for transmissivitetsforholdenes variabilitet, som i den sidste ende 'kontrollerer' formen og

5 **Reviews**. Eksterne reviews er en vurdering fra uafhængige fagfolk med tilsvarende modelmæssig indsigt som modelløren. Der er forskellige niveauer fra *model appraisal* (generalist vurdering), til *peer review* (uafhængig modellør), og til *audit* (hvor også modelopstillingen tjekkes igennem af modelløren).

afgrænsningen af indvindingsoplande. Kombinationen af trykniveau og transmissivitetsdata betyder en afgørende forbedring af mulighederne for afgræsning af indvindingsoplande.

Den konceptuelle modelusikkerhed dominerer i forhold til parameterusikkerheden, hvilket er i fuld overensstemmelse med Beven (2002), Neuman and Wierenga (2003) og Refsgaard et al. (2006). Dette resultat peger derfor på, at anvendelsen af multiple (alternative) konceptuelle modeller er vigtig for usikkerhedsvurderinger. Undersøgelsen afviger dog fra Harrar et al. (2003), idet også indvindingsoplandet her er afvigende.

I midten af 0'erne er brugen af invers modellering blevet en slags *state-of-the-art* i forbindelse med grundvandsmodellering. Carrera et al. (2005) beskriver udviklingen som lidt af et kvantespring i forståelsen af grundvandsstrømning*: "Numerical modelling forced them to be quantitatively consistent when integrating different data types. Since this is never straightforward, hydrologists were forced to test different parameter values, to perform sensitivity analysis, and to guess at what could be the cause behind observed data. In the end, they might not be fully successful, but they gained understanding, which is what counts for proper decision making".* Det betød, ifølge Carrera et al., stigende forventningerne til hydrologer. Nu kunne man ikke længere klare sig med kvalitative vurderinger, der skulle leveres en kvantitativ vurdering. Samtidig voksede datagrundlag i form af lange dataserier (oppumpninger) og hydrogeokemiske målinger. Disse data kunne bruges kvantitativt fx som observationsdata til kalibrering og validering af grundvandsmodellerne. Endelig viste de mange modeløvelser, at det vigtigste i modellering af grundvandet er den konceptuelle model" (Carrera et al., 2005). Den tidskrævende manuelle kalibrering havde betydet, at modellørerne sjældent rettede fokus på den konceptuelle model. Automatisk kalibrering (inverse rutiner) kunne råde bod på det misforhold.

Håndbog i grundvandsmodellering (Sonnenborg og Henriksen, 2005) afspejler den modelprotokol, som man i 0'erne så konturerne af, en protokol som opdelte de fem trin i modelleringsprocessen (Fig. 2) på i alt 45 opgaver jf. HarmoniQuA protokollen (Refsgaard et al., 2005). Man kan se "Håndbog i grundvandsmodellering" som en fremhævning af den iterative og kommunikative proces's betydning for en troværdig slutmodel. Men imod harmoniseringen af processen blev heterogeniteten samtidig i litteraturen udnævnt som en særlig modeludfordring (Eaton et al., 2006).

Troldborg et al. (2007) illustrerer brugen af alternative konceptuelle modeller kalibreret mod trykniveau og afstrømningsobservationer, og tester efterfølgende om modellerne kan prediktere aldersdateringer og environmental tracers, som udgør ekstrapolationer i forhold til den kalibrerede model. Forskellene i de konceptuelle modeller har betydning både i kalibrerings- og testfasen. De kalibrerede modeller var rimeligt ens med hensyn til simulering af indvindingsoplande efter kalibrering af modeltrykniveau og afstrømningsobservationer. Men for resultaterne af ekstrapolationerne af simuleret alder og simulerede gennembrudskurver fandt Troldborg et al. (2007) signifikante forskelle mellem de fire alternative modeller. Samtidig underestimerede modellerne effekterne af model strukturusikkerhed (geologisk usikkerhed). Artiklen dokumenterede, at for dette tilfælde er konceptuel usikkerhed den dominerede usikkerhed når det gælder modelsimuleringer, og at vigtigheden af den konceptuelle usikkerhed stiger i takt med ekstrapoleringen.

Seifert et al. (2007) undersøgte betydningen af konceptuel modelusikkerhed for begravede dale for to alternative modeller med og uden 'begravet dal'. Begge modeller kunne kalibreres tilfredsstillende i forhold til trykniveau og afstrømningsdata, og det er ikke muligt ud fra kalibreringsresultater at afgøre, om den begravede dal

findes eller ikke findes. Tritium data kunne heller ikke forkaste nogen af de to alternative modeller. Det vil sige, at man udfra den foretagne kalibrering og validering ikke kunne identificere, om en fejlagtig konceptuel model var i spil. Imidlertid gav de to modeller ret forskellige resultater for simuleret alder, specielt for det dybe grundvand (dybder > 170 m). Eksplicit implementering af dalen resulterede i væsentlig lavere simuleret alder i det dybe grundvand. Såvel flux af vand, partikelbaner og transporttider blev signifikant påvirket. Endelig er sårbarheden af prækvartære magasiner væsentlig forskellig. Igen bekræfter denne reference, at anvendelse af en numerisk model udover kalibreringsgrundlaget er meget usikker for variable, der ikke er målt på (fx grundvandsdannelse og partikelbaner). Jørgensen et al. (2008) beregnede indvindingsoplande for en begravet dal, og viste i forlængelse af Seifert et al. (2007), at selv små ændringer i den begravede dals udstrækning havde stor betydning for beliggenheden af indvindingsoplandet.

Iversen et al. (2009) viste, at graden af vandløbskontakt har afgørende betydning for beliggenheden af indvindingsoplandet for en boring filtersat i en hedeslette. Det er derfor også vigtigt at inddrage forskellige tolkninger af randbetingelser fx ydre eller indre (fx dræn, interaktionen mellem grundvand og vandløb), alternative tolkninger af det input der driver modellen (nedbør/fordampning) og alternative procesbeskrivelser. Nogle indledende undersøgelser af hvordan klimaændringer påvirker grundvandsspejl og afstrømning på større skala, blev gennemført af van Roosmalen et al. (2009). Her blev anvendt A2 og B2 scenarier fra regionale klimamodeller som input til en fremskrivning af strømningsforholdene i et varmere klima. Scenarie analysen[6] viste, at klimaændringer vil have stor betydning for nettonedbør, grundvandsstand og afstrømning, og at de simulerede hydrologiske effekter vil være genstand for stor usikkerhed på grund af usikkerhed omkring det fremtidige klima.

Rojas et al. (2008) benyttede generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE[7]) og Bayesian model averaging (BMA) til at undersøge konceptuel model usikkerhed, input datausikkerhed og parameterusikkerhed. Brugen af BMA bruges her til at vægte modelsimuleringer med henblik på at etablere 'ensemble middelværdi' og 'ensemble varians'. Herved etableres en generel metodik til håndtering af usikkerheder. Undersøgelsen viste, at trykniveau observationer alene normalt ikke vil kunne diskriminere mellem forskellige alternative konceptuelle modeller på trods af, at simuleringsresultater fx af vandbalancer var afgørende forskellige. Brugen af en enkelt konceptuel model resulterede i et mindre usikkerhedsinterval, men vurderes ikke at være robust i forhold til fx ændrede påvirkninger af systemet. Det anbefales derfor at udforske et antal forskellige konceptuelle modeller, for at opnå mere konservative simuleringsresultater, der kan afgrænse den sande systemrespons (og usikkerhedsbåndet). Det er også vigtigt løbende at inddrage nye observationer i en gentagelse af analysen. Det vurderes, at inddragelse af andre kvalitative eller kvantitative datakilder (fx hydraulisk ledningsevne, geologiske profiler, pejletidsserier eller estimater af grundvandsdannelsen) vil muliggøre en bedre differentieret analyse (evt. forkastelse) af alternative konceptuelle modeller.

---

6 **Scenarie analyse.** Forskellige mulige fremtider vurderes gennem en scenarie analyse hvor fx fremtidig nettonedbør, arealanvendelse og vandindvinding fastlægges. Scenarie analyse er et værktøj til eksplicit at forholde sig til disse faktorer og deres usikkerheder, på baggrund af fx fremskrivninger med globale/regionale klimamodeller og klima scenarier.

7 **GLUE** minder i nogen grad om *Monte Carlo* simuleringer, men afviser, at der findes et optimalt parametersæt, og det accepteres, at der findes mange forskellige parameterkombinationer, der vil resultere i lige gode fit. GLUE har derfor fokus rettet på at finde parameterkombinationer, der tilfredsstiller opstillede krav til nøjagtigheden.

De første eksempler på brug af *"Model averaging"* til generel analyse af usikkerheder på alternative konceptuelle modeller var begyndt at dukke op i slutningen af 0'erne (Neuman and Wierenga, 2003; Rojas et al., 2008; Ye et al., 2009). Disse eksempler påviste, at variationsrammen mellem alternative modeller gav større usikkerhedsbånd på prædiktioner end parameterusikkerheds variationsrammen inden for en model.

CCA (2009) vurderer, at et væsentligt værktøj i opnåelsen af en bæredygtig grundvandsforvaltning er de numeriske grundvandsmodeller, samt at kommunikation af usikkerheden ved modelsimuleringerne til slutbrugere og beslutningstagerne er den centrale udfordring: "*Numerical models do not provide unequivocal answers to issues in groundwater management; rather they provide simulated results that must then be further considered in the context of providing practical solutions to the problem at hand. It is therefore imperative that model output uncertainty be carefully explained by modellers to decision-makers".*

Delkonklusion II:
I 0'erne vandt forståelsen for betydningen af den konceptuelle model som en central kilde til usikkerhed for bestemmelsen af indvindingsoplandet voksende udbredelse. Man blev mere præcis med hensyn til skelnen mellem grundvandsdannende oplande og indvindingsoplande, og man forholdt sig i stigende grad kritisk til fx output fra partikelbanesimulering. Brugen af alternative konceptuelle modeller vandt indpas i litteraturen. Nødvendigheden af at inddrage kvalitative vurderinger til meningsfuldt at sammenfatte modellens troværdighed blev konstateret. Vanskeligheden i effektivt at kunne diskriminere mellem alternative konceptuelle modeller alene på baggrund af kalibreringsdata (trykniveau og afstrømning) blev erkendt, og behovet for inddragelse af andre kvantitative data (fx kemidata, aldersdatering, transmissivitet og pejletidsserier) blev anbefalet. Nye metoder bl.a. inverse rutiner og GLUE/Bayesian averaging vandt indpas i den akademiske usikkerhedslitteratur, og Håndbog i grundvandsmodellering inkorporerede den nye HarmoniQuA protokol for kvalitetssikring af modelprocessen med en præcisering af vigtigheden af god kommunikation mellem vandressourceforvalter, modellør, reviewer og interessenter.

2.6 På vej mod 2020 (Litteraturgennemgang - III: 2009 -)
Refsgaard et al. (2010b) sammenfattede den udfordring vi lige nu står overfor som en væsentlig forskningsudfordring frem mod 2020: "*to develop and maintain integrated information systems, including quality assurance and uncertainty information that facilitates active stakeholder involvement and learning".*

Henriksen et al. (2009) beskrev, hvordan en sådan læringsproces i højere grad vil kræve en aktiv involvering af interessenterne i selve modelleringsprocessen (Fig. 2), end HarmoniQuA protokollen er udformet til. Omvendt tillod protokollen en interaktion med interessenterne ved syv af i alt 45 trin i modelleringen, og det vurderedes tilstrækkeligt, såfremt problemet var af teknisk karakter (enighed om afgrænsning af problemet og om fremgangsmåden i modelprocessen), og ikke udgjorde en egentlig adaptiv udfordring, der kræver en særlig læringsproces mellem interessenterne om hvad problemet er og hvordan det kan løses (Brugnach et al., 2011).

Beven (2009) anskuede modellering og beslutningstagning på en anden måde end tidligere som en læringsproces. Med henvisning til eksemplet Danmark, hvor der efterhånden er dækkende modeller for hele landet, og måske også på et tidspunkt forskellig skala, kan modelleringen bruges i en adaptiv læringsproces, hvor "det stedspecifikke" (og til dels unikke) udforskes ved en fortsat modelleringsproces der søger at teste og evt. falsificere uholdbare modelantagelser udfra nye data. Der kræves en fortsat reformulering og forbedring af datagrundlag, konceptuel model, modelopstilling, usikkerhedsvurdering og validering, i en fortsat jagt på modellens svagheder og begrænsninger. Ifølge Beven vil det forudsætte mere fokus på data og assimilationsteknikker, der kan forbedre læringen og forsøget på falsificering af modellens beskrivelse af strømningsprocesserne, understøttet af en mere iterativ kortlægning og monitering: "*During that process, it is well to remember that when models are used for a purpose, then it will be necessary to involve the relevant stakeholders in the modelling process, especially once they can start to relate directly to what is being predicted about their local system"* (Beven, 2009)*.*

Rojas et al. (2010) analyserede betydningen af at "konditionere" syv alternative konceptuelle modeller i forhold til trykniveauobservationer, strømning ud af

modelrand og vandløbsafstrømning for et hypotetisk 3D stationært grundvandsstrømningssystem. Undersøgelsen viste, at trykniveau observationer alene ikke bidrager væsentligt til falsificering af (diskriminering mellem) de forskellige alternative modeller. Inddragelse af afstrømnings observationer i "konditioneringen", specielt vandløbsafstrømning, gav imidlertid et væsentligt forbedret grundlag for en skelnen mellem alternative modellers pålidelighed. Afstrømningsmålinger og konditionering i forhold til "globale data" vurderes dermed nødvendige med henblik på reduktion af konceptuel modelusikkerhed.

GEO Vejledning 7 (Refsgaard et al. 2010a) samler den nyeste viden om grundvandsmodellering i forbindelse med grundvandskortlægning. Vejledningen skal sikre, at opstilling og anvendelse af hydrologiske modeller sker på en metodisk ensartet måde i hele landet samt på et tilstrækkeligt højt fagligt niveau.
Som fremhævet i Geovejledning 7 (Refsgaard et al., 2010a): "*Usikkerhedsvurderinger skal foretages med inddragelse af alle væsentlige aspekter, som fx usikkerheder på data, modelparametre, den geologiske tolkning, og den konceptuelle model, uanset om usikkerhederne kan kvantificeres eller "kun" kan behandles kvalitativt. Usikkerhedsvurderinger skal gennemføres lige fra begyndelsen af et projekt og inddrages i dialogen mellem alle projektets partnere. Tilsvarende skal kravene til en models nøjagtighed løbende vurderes i samspil mellem modellør, vandressourceforvalter og interessenter".*

Delkonklusion III:
I nullernes sene litteratur og i etternes første litteratur introduceredes modelstrukturens betydning for den samlede usikkerhed, dvs. den konceptuelle model blev nu omdrejningspunktet i usikkerhedsanalysen. Der introduceredes i litteraturen raffinerede metoder til analyse af usikkerheden, og behovet for eksterne uafhængige peer-reviews omtales som nødvendige værktøjer til kvalitetssikring af numeriske modeller i bl.a. den nye Geovejledning 7. Det kræver et lidt bredere usikkerhedsbegreb, og mere fokus på kommunikationen af usikkerhederne til en bredere kreds af slutbrugere (fx kommunerne der skal lave indsatsplaner og handleplaner i forbindelse med vandrammedirektivet og klimatilpasning). Usikkerheds-vurderinger skal fremover foretages med inddragelse af alle væsentlige aspekter (data, modelparametre, den geologiske tolkning, og den konceptuelle model), uanset om de kan kvantificeres eller "kun" kan behandles kvalitativt. Usikkerhedsvurderinger skal gennemføres lige fra begyndelsen af et modelprojekt og inddrages i dialogen mellem projektets parter, ligesom at kravene til en models nøjagtighed løbende skal vurderes i samspil mellem modellør, vandressourceforvalter og interessenter. Muligheden for at reducere den konceptuelle model usikkerhed (diskriminere mellem alternative konceptuelle modeller) styrkes væsentligt af 'globale' observationsdata (fx data for vandføring).

2.7 Diskussion

Vidensspyramiden og fokusområder

Set i forhold til den hidtidige praksis i forbindelse med anvendelse af numeriske grundvandsmodeller til afgrænsning af indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande peger ovenstående delkonklusioner på, at der er et behov for at nytænke praksis. For det første skal usikkerhedsvurderinger foretages med inddragelse af alle væsentlige aspekter, fx usikkerhed på data, modelparametre, den geologiske tolkning, og den konceptuelle model, uanset om usikkerheder kan kvantificeres eller "kun" kan behandles kvalitativt. Anbefalinger til usikkerhedsvurderinger i forhold til indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande, der indgik i Håndbog i grundvandsmodellering (Sonnenborg og Henriksen, 2005), giver ikke nogen fyldestgørende behandling af, hvordan alle væsentlige aspekter kan inddrages, selvom håndbogen indeholder de fleste elementer og fragmenter heraf. Tilmed så skal usikkerhedsvurderinger gennemføres lige fra begyndelsen af et projekt og inddrages i dialogen mellem alle projektets partnere.

Der er derfor brug for et centralt værktøj til sikring af at alle aspekter inddrages og til håndtering i forhold til modelleringsprocessen. Her vurderes det, at Usikkerhedsmatricen (Refsgaard et al., 2010a) er et godt værktøj til en sådan overordnet styring og kvalitetssikring af usikkerhedshåndteringen, mens valget af øvrige usikkerhedsmetoder (kvalitative såvel som kvantitative) efterfølgende kan afpasses opgavens ambitionsniveau, dens tidsramme og de ressourcer, der er til rådighed for den givne geologiske og hydrologiske kontekst.

Indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande er vigtige værktøjer i kommunikationen med interessenterne og til en konkret visualisering af usikkerhederne (Iversen et. al, 2008). For at man kan præsentere de usikkerhedsbånd, der er på disse temakort og oplandsafgrænsningen, så er det imidlertid vigtigt at bringe en vifte af usikkerhedsmetoder i spil, hvor nogle metoder er mere relevante i modelprocessen end andre. Det er ikke muligt på forhånd at beskrive og præcist udvælge hvilke metoder der skal bringes i anvendelse, men med kravet om at gøre usikkerhedsmatricen til et centralt styringsværktøj, så kan det sikres, at alle aspekter behandles og efterfølgende kommunikeres til parterne og slutbrugere.

Det er en ny udfordring at kravene til en models nøjagtighed løbende skal udformes som kvalitative og kvantitative kriterier i modelleringsprocessen, og at det skal ske i et samspil mellem modellør, vandressourceforvalter og interessenter. Indholdsmæssigt stiller det et krav om, at følgende temaer og spørgsmål i en modelopstillingen ved afgrænsning af GO/IO i det følgende metodeafsnit får en særlig fokus:

- Fra geologi / konceptuel model til numerisk model (hvordan bæres usikkerheden videre, og hvordan kommer man tilbage til geologien i vurdering af usikkerhed?).
- Dræn- og vandløbsinteraktion (på hvilket grundlag distribueres de hydrauliske ådalsparametre og drænparametre?).
- Potentiale og gradientforhold (hvordan fastsættes kvalitative og kvantitative nøjagtighedskrav og hvordan vægtes de indbyrdes?).

- Hydrauliske parametre og heterogenitet (på hvilket datagrundlag og med hvilken parameterzonering kan opgaven gennemføres hvis også heterogenitet og modelstruktur usikkerhed skal indgå?).
- Vurdering af nettonedbør (hvordan skal input der driver modellen håndteres og hvordan kompenseres der for evt. vandbalancefejl?).
- Fremtidige scenarier for klima-, arealanvendelse, og vanding (Hvordan udvikles de fremtidige scenarier og hvordan inddrages interessenterne heri?).
- Valg af modelkode og metodik til partikelbane- og aldersvurdering (Hvordan kan partikelbanemodeller anvendes med tilstrækkeligt robuste afgræsninger af IO og GO?).
- Muligheder for falsificering af alternative konceptuelle modeller (hvordan inddrages forskellige observationsdata fx trykniveau, transmissivitet, aldersdatering og afstrømning og hvordan gøres afstrømningsdata fra samtlige vandføringsstationer, enkeltmålinger og medianminimumsskøn lettere tilgængelige i modelleringen af IO og GO?)

3. Usikkerheder på oplande og metoder til at belyse disse

3.1 Usikkerhedsmatricen

Dette kapitel gennemgår de usikkerhedsfaktorer som man typisk vil møde i forbindelse med numerisk beregnede indvindings- og grundvandsdannede oplande (IO og GO).

Som overordnet værktøj til strukturering og vurdering af behov for usikkerhedsanalyser for IO og GO tager vi udgangspunkt i usikkerhedsmatricen (se tabel 2), der tænkes opstillet før modelleringen, justeret undervejs og rapporteret til slutbrugerne efter afslutning af modelleringsprocessen.

Tabel 2 Usikkerhedsmatrice for IO og GO (kilde: Sonnenborg og Henriksen, 2005).

	KILDE	ELEMENT	Usik.grad/ DÆKNING	VÆGT	EFFEKT	Reducer-bar	Kvanti-ficer-bar	TIL-TAG	BEMÆRK-NING
DATA	Geologi		stor	middel	middel				
	Potentiale		lille	stor	middel				
	Afstrømning		stor	middel	middel				
	Hydrauliske Værdier		stor	middel	middel				
MODEL	Input data								
	Konceptuel Model	grundvands dannelse	middel	middel	middel				
		geologi	middel	stor	stor				
		processer	middel	lille	lille				
		diskreti-sering	middel	stor	stor				
		rand	middel	middel	middel				
	Kode		lille	middel	middel				
MANAGE-MENT SCENARIER	Politiske forhold	identifikation	middel	middel	middel				
		stregen	stor	stor	stor				
		klima	middel	lille	lille				
	Fremtidige forhold	indvindings-behov	lille	middel	middel				
		forurenings-belastning	middel	stor	stor				

Matricen er opbygget således, at tabellens yderste kolonne tv. angiver usikkerhedskilden. De enkelte usikkerhedskilder vurderes i forhold til deres usikkerhedsgrad. Således vil en *"lille"* usikkerhedsgrad/dækning betyde, at der er forbundet en lille usikkerhed ved kilden. I næste kolonne "Vægt" vægtes kildens betydning i forhold til formålet.

Usikkerhedsmatricen arbejder som vist i tabel 2 med tre hovedkategorier: 1) Data, 2) Model og 3) Management scenarier. Herved referer matricen til lagene i videnspyramiden (se Fig. 1, kap. 2):

- Data ~ Database (karakteriserer usikkerheden på datagrundlaget, nederste trin i videnspyramiden)
- Model ~ Geologisk model, hydrogeologisk tolkningsmodel og numerisk grundvandsmodel (trin 2 til 4 i videnspyramiden)
- Management scenarier ~ scenarieudvikling og beslutningstagning under usikkerhed (trin 5-6 i videnspyramiden)

Som en del af vurderingen af usikkerheder under *"Managementscenarier"* skal man vælge, hvorvidt man vil basere grundvandsbeskyttelsen på *fællesmængden* eller *foreningsmængden* af plausible oplandsafgrænsninger, hvorvidt nærzonen omkring boringer altid er en del af indvindingsoplandet, selv om den måske ikke indgår i det grundvandsdannende opland (fx et artesisk opland), og om klimaændringer, fremtidige ændringer i arealanvendelse og indvindingsstruktur skal inddrages i afgrænsningen. Det har vi valgt eksplicit at referere til i usikkerhedsmatricen ved et nyt punkt under management scenarier, som vi kalder "stregen".

Som grundlæggende princip anbefales det, at man undlader præcist at specificere i udbudsmaterialet hvilken type usikkerhedsanalyse, der skal gennemføres. Dette bør først overvejes og identificeres gennem projektforløbet. Den første betingelse for en succesfuld usikkerhedsvurdering er, at det er de betydende usikkerhedskilder, der medtages i vurderingen.

I tabel 3 er vist et eksempel på usikkerhedsmatricen for IO og GO med en udfyldelse af alle kolonner.

Det anbefales, at usikkerhedsmatricen udfyldes ved modelleringens start, og bruges som en rød tråd gennem processen og som et værktøj der indgår som en fast del af de afholdte milepælsmøder, hvor rådgiver forud for mødet har revurderet matricen. Herved kan usikkerhedsmatricen bruges som et strategisk usikkerhedshåndteringsværktøj, når der skal vælges strategi og metoder til en yderligere reduktion af usikkerheden (fx gennem ny dataindsamling), beskrivelse af usikkerhedsbåndet (fx gennem Monte Carlo simuleringer af betydning af parameterusikkerheder) eller igangsætning af læringsprocesser mellem aktørerne, med henblik på koordinerede beslutninger vedr. grundvandsbeskyttelsestiltag.

Tabel 3 Usikkerhedsmatrice til karakterisering af oplandsusikkerhed på indvindings- og grundvandsdannende oplande (modificeret efter Sonnenborg og Henriksen, 2005).

	KILDE	ELEMENT	Usik.grad/ DÆKNING	VÆGT	EFFEKT	Reducer-bar	Kvantificer-bar	TIL-TAG	BEMÆRK-NING
DATA	Geologi		stor	middel	middel	ja	nej	nye dybe boringer	mangler dybe boringer
	Potentiale		lille	stor	middel	nej	ja	synkron-pejle-runde	potentiale billede skal forbedres
	Afstrømning		stor	middel	middel		ja	nye Q-målinger	inddrag med-min i validering
	Hydrauliske Værdier		stor	middel	middel	ja	ja	prøve pumping	bedre bud på K,T
MODEL	Input data	grundvands dannelse	middel	middel	middel			ingen	
	Konceptuel Model	geologi	middel	stor	stor	nej	ja	alternativ koncept. model	idbredelse af lerlag usikker
		processer	middel	lille	lille			Ingen	
		diskreti-sering	middel	stor	stor		ja	følsom-heds analyse	test betydning af finere diskreti-sering
		rand	middel	middel	middel			ingen	
	Kode		lille	middel	middel			ingen	
MANAGE-MENT SCENARIER	Politiske forhold	identifikation	middel	middel	middel			ingen	
		stregen	stor	stor	stor		ja	MC analyse	parameter usikkerhed
		klima	middel	lille	lille			ingen	
	Fremtidige forhold	indvindings-behov	lille	middel	middel			ingen	
		forurenings-belastning	middel	stor	stor			stoftrans model	nitrat belastning

KILDE	Her angives kilden til usikkerhed fx potentiale, afstrømning og geologi. Det kan i praksis være relevant at udvide listen af kilder med flere datatyper fx hydrauliske parametre efter behov.
ELEMENT	Element folder usikkerhedskilden yderligere ud. Fx består en konceptuel model af både en hydrogeologisk tolkningsmodel (geologi), en procesbeskrivelse og randbetingelser.
Usikkerhedsgrad / dækning	Usikkerhedsgraden er graden af usikkerhed knyttet til usikkerhedskilden, dvs. hvorvidt der er stor eller lille usikkerhed omkring variablen. Dækning er primært relevant at vurdere i forhold til tilgængeligheden af data, hvor kvalitet og kvantitet (dækning) af data er betydende for hvor godt modelresultat, der kan forventes.
VÆGT	Er hvor betydende faktoren er for resultatet dvs. IO og GO.
Effekt	Er usikkerhedsgrad x 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 (f.eks. observationer) til at metoden kan anvendes.
TILTAG	Her vurderes det 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 usikkerheden, om det er muligt at give en kvalitativ beskrivelse af usikkerheden eller om der er behov for en læringsproces, fx interessentinvolvering i reviews og/eller modelworkshops i tilfælde af flertydighed (”multiple knowledge frames uncertainty”) fx i forbindelse med identifikation (definition) af problemet eller trækningen af ’stregen’ (IO og GO)
BEMÆRKNING	Her kan angives korte bemærkninger/kommentarer der giver en præcisering af usikkerhedskilden. Specielt nyttig hvis usikkerhedsmatricen anvendes som dialog platform / kommunikation med interessenter. Her kan evt. også refereres til en rapport eller referat fra modelworkshop hvor usikkerheden eller uenigheden (konflikten) er beskrevet mere detaljeret

3.1 Modelprocessen og specifikke metoder til usikkerhedshåndtering

Følgende gennemgang af de enkelte usikkerhedsmetoder der kan bringes i spil i modelprocessen er struktureret jf. Refsgaard, et, al. (2010a), hvor modelleringsprocessen består af fem trin:

- TRIN 1 Modelstudieplan,
- TRIN 2 Data og konceptualisering,
- TRIN 3 Modelopstilling,
- TRIN 4 Kalibrering og validering og
- TRIN 5 Simulering og evaluering.

God praksis i hydrologisk modellering skal bidrage til en videnskabeligt funderet teknisk løsning af modelopgaver der kan sikre en fælles forståelsesramme blandt alle involverede aktører omkring resultatet af afgrænsningen af IO og GO og dermed minimere risikoen for konflikter opstået pga. uklarhed om procedurer og usikkerhedsmetoder. I den forbindelse er usikkerhedsmatricen en slags ”logbog” og ved afslutning af processen en ”arbejdsrapport”, der kortfattet redegør for såvel de vurderede usikkerhedskilder, som de valg der er gjort med henblik på at håndtere (minimere, beskrive eller sikre læring om usikkerheden).

Trin 1 – Fra Identifikation til Modelstudieplan

Det er vigtigt, at opgavestiller og modellør fra starten gør sig klart, hvad den numeriske grundvandsmodel skal kunne beregne og anvendes til. Modellen skal i nærværende sammenhæng opstilles således, at den kan anvendes til at udføre troværdige partikelbaneberegninger til fastlæggelse af IO og GO i forbindelse med grundvandskortlægningen. Samtidig skal modellen evt. også kunne beregne vandbalancer og kvantificere den tilgængelige vandressource i det pågældende modelområde (Refsgaard et al. 2010a).

Modelstudieplanen skal indeholde målsætninger og kravspecifikationer til modelleringen, herunder kravene til nøjagtighed af modelresultaterne. Derfor bør involvering af interessenter overvejes her. Det er vandressourceforvalteren og interessenterne der specificerer kravene til modellens usikkerheder.

Eksempel

Valget af modeltype afhænger af formålet med modelstudiet. Er formålet fastlæggelse af indvindings/grundvandsdannende oplande kan der ved lavt ambitionsniveau (screening) anvendes en analytisk element model (AEM). Såfremt der ønskes et mellem ambitionsniveau kan anvendes en stationær grundvandsmodel og et partikelbanemodul med en typisk diskretisering på 50-200 m. Er der behov for stor nøjagtighed (højt ambitionsniveau) anvendes en dynamisk kalibreret og integreret grundvands- overfladevandsmodel og partikelbanemodul, der køres dynamisk (eller stationært).

Afhængigt at de konkrete forhold vælges horisontal og vertikal diskretisering, så kildepladser og deres boringer repræsenteres så korrekt som muligt af modellen. Hvis modellen opstilles for et område, hvor dræning, markvanding og store variationer i indvindingen spiller ind, er det vigtigt, at modellen fra start opstilles, kalibreres og valideres som en dynamisk model, og at modellens evne til at beskrive interaktionen mellem grundvand og overfladevand dokumenteres udfra observationsdata.

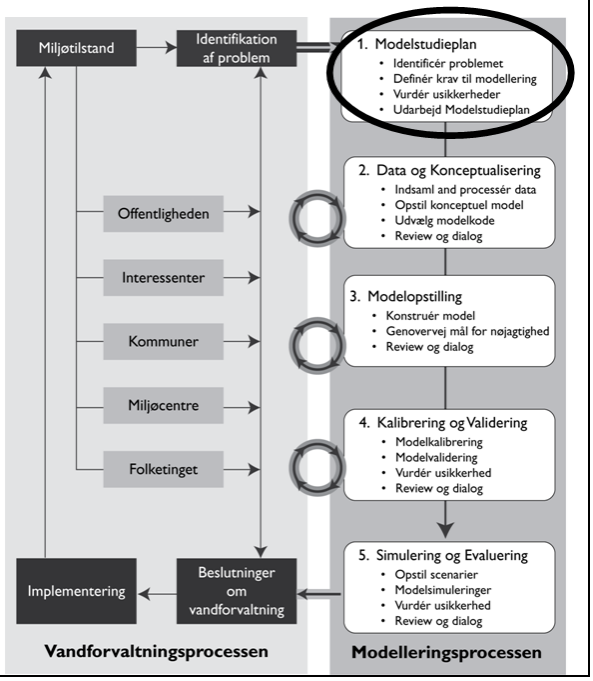
Relevante usikkerhedsmetoder for

TRIN 1 fra Identifikation til modelstudieplan

Geovejledning 7 (Refsgaard et al., 2010a)
Kilde A: The knowledge base in MOST, tasks and activities: http://vandmodel.dk/xpdf/appendix-a_most-tasks-and-activities_20100601.pdf
Kilde B: The knowledge base in MOST, methods:
http://vandmodel.dk/xpdf/appendix-b_most-methods_20100601.pdf

Part: Modellør (M), Vandressourceforvalter (V), Interessenter (I), Reviewer (R)

Henvisning til vejledninger og egnede usikkerhedsmetoder	Part
Opgaver under trin 1 frem til udbud (Geovejledning 7, tabel 1 side 15, trin 1.1-1.5; Kilde A 1.1-1.5 side 11-32)	VI
Tilbudsgivning og kontraktforhandling (Geovejledning 7, tabel 1 side 15, trin 1.6-1.7; Kilde A 1.6-1.7 side 33-37)	MVIR
Valg af modeltype (Geovejledning 7, tabel 6 side 22 og Afsnit 4.7.1 side 20-22)	V
Usikkerhedsmatricen (Geovejledning 7, afsnit 4.7.7 side 37-42 og Kilde B side 35-36)	MVIR



Usikkerhedsmetoderne beskrevet ovenfor under trin 1 vil primært være en første opstilling af usikkerhedsmatricen. Der findes en række metoder i fx HarmoniQuA protokollen til interessentinvolvering fx *Interaction and communication ABC* (Kilde B, side 19), *Actors grouping* (Kilde B, side 4) og *Stakeholder summary table* (Kilde B, side 32-33). Disse metoder har til formål at få klarlagt hvordan kommunikationen tilrettelægges i forhold til interessenterne i modelprocessen, hvem interessenterne er mm. Disse oplysninger er vigtige for opstilling af en konkret 'Stakeholder involvement plan" (Henriksen et al., 2009) i de tilfælde hvor interessenterne skal involveres (informeres, konsulteres og evt. inviteres til diskussioner af resultaterne undervejs i processen).

Trin 2 – Data og konceptualisering

I dette trin opstilles 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 strømningsmodel til brug for afgræsningen af indvindingsoplande / grundvandsdannende oplande. Her begynder oversættelsen af natur til numerisk system. Eftersom det ikke er muligt at beskrive alle processer og alt heterogenitet fuldstændigt, er det nødvendigt at generalisere og simplificere (Refsgaard et al., 2010a side 23-25: 4.7.2 Opstilling af konceptuel model).

En konceptuel model indeholder en række elementer bl.a. (i) geologisk model, (ii) specifikation af anvendte procesligninger (2D/3D, porøse medier/sprækkede medier), (iii) specifikation af underinddeling af modeldomænet i strukturelle elementer med fx konstante parameterværdier, (iv) specifikation af randbetingelser, (v) specifikation af inputdata der driver modellen samt (vi) overordnet forståelse af strømningsforhold og vandbalancer i området (Refsgaard et al., 2010a: side 23). En konceptuel oplandsmodel er dermed en hydrologisk og hydrogeologisk forståelsesmodel tilpasset opgaven at afgrænse IO og GO.

Den konceptuelle model er fundamentet for den senere numeriske modelkonstruktion og central for håndtering af usikkerheder, da den numeriske models væsentlige aspekter støbes og tager form i arbejdet med den konceptuelle model. Usikkerheder på data, modelparametre, den geologiske tolkning og den konceptuelle model skal derfor vurderes, uanset om usikkerhederne kan kvantificeres eller "kun" kan behandles kvalitativt (Refsgaard et al., 2010a). Modellering skal betragtes som en læringsproces, hvor der skal frembringes ny viden og erkendelse, fx om der er fagligt belæg for den valgte konceptuelle model. Bl.a. derfor skal det være muligt at vende tilbage til den konceptuelle model (feedback-loops), og om nødvendigt revidere de dele, som ny erkendelse undervejs i modelleringsprocessen giver anledning til at forkaste. Det kan fx være elementer i den geologiske model, randbetingelser, procesbeskrivelse eller nettonedbørs-input.

Klimavariation og især ændret vandindvinding vil meget ofte give anledning til ændring i trykniveau. 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 (Refsgaard et al., 2010a:25). Hvis sådanne randbetingelser ikke kan opnås i umiddelbar nærhed af interesseområdet, kan det være nødvendigt at flytte randen længere væk, så indflydelsen af randbetingelser reduceres. Da IO og GO modellering ofte kræver lokale modeller, hvor der ønskes stor nøjagtighed i et lille område, er randbetingelser lidt af en balancegang mellem at få en detaljering og de bedst mulige randbetingelser. Det kan være en særdeles god ide at tjekke antagelser fx vha. DK model.

Datagrundlaget for oppumpninger er selvsagt vigtige for opstillingen af en god og pålidelig model til bestemmelse af IO og GO. Datatilgængelighed kan dog være en kilde til usikkerhed, da vanskelig adgang til data kan begrænse muligheden for at komme igennem jf. et højt ambitionsniveau (stor nøjagtighed), indenfor den aftalte tidsramme og de afsatte ressourcer.

Eksempel
Nogle data findes i tilgængelige databaser, fx JUPITER og GERDA med høj datatilgængelighed. Disse data vil let kunne inddrages i den geologiske- og numeriske modellering. Andre data findes ikke i tilgængelige databaser. Det gælder fx markvandinger, drænoplysninger, geotekniske og jordforureningsboringer samt oplysninger om vandløbstværprofiler. Disse data vil sjældent indgå i numeriske modeller, med mindre de indsamles og indarbejdes. Data-tilgængelighed er derfor en kilde til usikkerhed.
Datausikkerheden når det gælder indvindingsmængder for kildepladsens boringer afhænger dels af fordelingen på boringer af den samlede indvinding på enkelt boringer, som kun kendes overslagsmæssigt ud fra fx den tilladte indvindingsmængde. Tidslig variation i oppumpningen (fx markvanding i sommerperioden) kan give anledning til store variationer i indvindingen over tid.

Inputdata, der skal anvendes til at drive modellen, skal analyseres. Gode klimadata er meget afgørende for en korrekt vurdering af GO. Det er væsentligt at modelløren som led i etableringen af den konceptuelle model skaber sig en forståelse af det hydrogeologiske system der modelleres inkl. strømretninger og vandbalanceforhold (Refsgaard et al., 2010a:25).

Vigtige data i forbindelse med beregninger af IO er pejledata, da strømningsretningen og gradientforholdene imellem de enkelte magasiner er helt afgørende for afgrænsningen af indvindingsoplande. Pejlinger er samtidig vigtige for GO, da GO er den flade ved terræn hvorigennem grundvandsdannelsen til IO sker. Derudover er flowmålinger (fx detaljerede målinger af afstrømningen i vandløb) af stor betydning for afgrænsningen af GO. Der kræves desuden en god geologisk model, en korrekt kvantificering af nedsivningen fra rodzonen og af interaktionen mellem overfladevand og grundvand, typisk i de øvre dele af vandløbssystemerne (betydning af klima, vegetation, jordtype, heterogenitet, dræn, vandløb mm.). Pejleobservationer som indgår i den numeriske model i kalibreringsprocessen kan være behæftet med målefejl, men andre fejl i pejledata, som kan skyldes geologisk heterogenitet og tidslige variationer i pejletidsserierne, bør man også være opmærksom på. Det er selvsagt også vigtigt, at man er bevidst om hvilket koordinatsystem data er tilknyttet (fx ED-50 eller Euref-89).

Eksempel
Det er ikke altid muligt at fremstille et potentialekort for alle magasiner i et område. I stedet kan det være en god ide at opstille et potentialekort for det primære magasin, og så beskrive trykniveauer i fx dybere magasiner eller sekundære magasiner i forhold hertil. Usikkerheden på potentialeforholdene er typisk knyttet til, om observationerne er repræsentative (eller fx om der er hængende vandspejl, der ikke er repræsentative for magasinet, men for lokale sekundære magasiner) eller skyldes fejlagtige koteangivelser på de enkelte pejleboringer (Mielby et. al, 2009).

Den geologiske model skal helst dække et større område end den numeriske model, da det giver større fleksibilitet hvis modelområdet senere skal justeres. Den geologiske model skal samtidig gå til en dybde, der svarer til grundvandssystemets bund (det kan være et dybt impermeabelt lerlag, saltvandsgrænser eller lignende). En manglende forståelse for den geologiske og hydrostratigrafiske opbygning og magasinernes indbyrdes beliggenhed kan dels give anledning til forkerte strømningsveje i den numeriske model, fejlagtige partikelaldre og i sidste ende beregning og optegning af forkerte oplande. Derfor er det helt afgørende, at man i områder hvor tolkningen af geologien er behæftet med en del usikkerhed, opstiller eksempelvis 2-3 alternative konceptuelle modeller (se Refsgaard et al., 2010a afsnit 4.7.3 side 26-28).

Eksempel
Et modelområde består af 3 magasiner, et øvre sekundært og 2 primære magasiner, som er beliggende i en begravet dal kaldet øvre og nedre primære magasin. Der indvindes fra det nedre primære magasin og det er noget usikkert, om det øvre og nedre primære magasin er adskilt af et lerlag, da de geofysiske modeller i denne dybde er usikre. Derfor kan der fx opstilles 2 alternative konceptuelle/ hydrostratigrafiske modeller:

Model 1: Indeholder et 15 meter tykt lerlag, som adskiller de 2 primære magasiner.
Model 2: Et hvor de 2 magasiner er i fuld hydraulisk kontakt med hinanden.

Der udføres oplandsberegninger (GO) på begge modeller og resultatet viser ikke overraskende, at det giver 2 vidt forskellige GO. Eksemplet er taget fra en grundvandskortlægning udført i begravet dal ved Breum i Salling *(Kilde: Viborg Amt, 2006)* (Denne modelberegning fra ovenstående eksempel er dog ikke dokumenteret men bygger på de modelerfaringer der er gjort i Breum-undersøgelsen).

Der udarbejdes en Hydrostratigrafisk model på baggrund af den geologiske model. Der kan i den forbindelse udarbejdes flere alternative hydrostratigrafiske modeller, der kan indgå i den hydrogeologiske tolkningsmodel. (jf. 4.3 afsnit 2.8 i Refsgaard et al., 2010a).
Udviklingen af alternative konceptuelle modeller vil have det primære formål at muliggøre en følsomhedsanalyse mht. modellen, hvor den konceptuelle models betydning belyses. Sekundært anvendes de i forbindelse med hypotesetest af numeriske model. Det er vigtigt, som led i den hydrogeologiske tolkningsmodel, at komme med et bedste gæt på de enkelte parametre ud fra datagrundlaget og tolkningsmodellen samt de enkelte parametres variationsramme (”range”).

Eksempel:
Transmissivitetsværdier vil være meget afhængige af, hvordan de er bestemte. Den bedste kvalitet har man for langtidsprøvepumpninger med observationsboringer. I forbindelse med kortvarige prøvepumpninger, fx renpumpning, kan man bestemme T-værdien med større usikkerhed, og tolkninger ud fra tilbagepejlinger giver her måske en bedre sikkerhed. Endelig giver slugtests en T-værdi som er forholdsvis usikker. Kornstørrelsesfordelinger er andre indgange, igen usikre. T-værdier bestemt ved prøvepumpning vil være relativt usikre som følge af barometereffekter, grænser (fx vandløb, grænser for magasinudbredelsen osv.) mv. De rå data kan evt. bruges i valideringstests i stedet for tolkede T værdier.

Det beskrives kort hvilken konceptuel model der er valgt og hvordan man vil nå målet at beregne IO og GO vha. partikelbaneberegninger, og hvilke usikkerheder der ligger i de enkelte processer under vejs. Skal modellen simulere et opsprækket medie eller er der tale om et porøst medie? Skal modellen køres stationært eller dynamisk?
Hvordan skal modellen håndtere den umættede zone, og hvordan vil en tyk umættet zone påvirke fx baglæns partikelbaneberegninger (jf. 4.3 afsnit 2.8-2.9 i Refsgaard et al., 2010a) og kunne påvirke vertikal diskretisering.

Det er modelløren, der er den ansvarlige for den databehandling og konceptualisering, der skal føre frem til en troværdig konceptuel model. Det er særligt vigtigt at vurdere om analyserne af systemet, geologisk model, hydrostratigrafisk model og konceptuel model er troværdige (Refsgaard et al., 2010a), altså om den konceptuelle model giver mening og er konsistent med alle data, om formålene med modelstudiet kan forventes opnået med den konceptuelle model, og om den konceptuelle model indeholder spekulative elementer.

Eksempel:
Ofte vil geostatistiske analyser af fx heterogenitet, T-værdier osv. være værdifulde metoder til at vurdere, hvordan denne størrelse kan spille ind på afgrænsningen af indvindingsoplandet. Rent kvalitativt kan man ud fra potentialebilledet og antagelser om grundvandsdannelsens variation vurdere, om transmissiviteten er høj eller lav i et område. Det er traditionelt vigtigt ikke at overparameterisere en model ved indførelse af for mange zoner, men det er samtidig også vigtigt at arbejde med de zoner, som kan legitimeres ud fra den geologiske og hydrologiske tolkningsmodel, og ud fra det datagrundlag man råder over til bl.a. kalibrering og validering.

Det er modelløren, der er ansvarlig for valg af software (modelkode) i forhold til de mulige strømnings- og partikelbanekoder, check af om koden er verificeret til de givne formål, og vurdering af mulig support fra kodeudvikler/leverandør.

Eksempel:
I forhold til modelkode opstilles de numeriske grundvandsmodeller i Danmark traditionelt i enten MODFLOW eller MIKE-SHE. Begge koder har tilhørende partikelbanemoduler som benyttes til oplandsberegninger. I MIKE-SHE´s partikelbanemodul er der dog visse begrænsninger sammenlignet med MODFLOW. MIKE-SHE kan ikke visualisere alle de beregnede partikelbaner i 3D, og partiklerne kan ikke simuleres baglæns som der er mulighed for i MODFLOW/MODPATH (jf. 4.3 afsnit 2.10 i Refsgaard et al., 2010a). Omvendt kan baglæns partikelbanesimulering i MODFLOW være følsomme overfor diskretisering og hvordan partiklerne er 'startet' i forhold til kildepladsens boringer. Det anbefales at benytte forlæns partikelbanesimuleringer som en kontrol, ved brug af MODFLOW/MODPATH.

Nedenfor er foreslået forskellige metoder til håndtering af usikkerheder under step 2 data og konceptualisering. Med hensyn til håndtering af datausikkerheder henvises til HarmoniRiB hvor datausikkerheden foreslås karakteriseret for forskellige datatyper (Brown et al., 2005). Der er i HarmoniRiB udviklet et software værktøjer (Data Uncertainty Engine – DUE) til vurderingen af usikkerhed på data (Brown and Heuvelink, 2005). Samtidig findes oversigter fra litteraturstudier (van Loon and Refsgaard, 2005) for fx typerne meteorologiske data, jordfysiske data, geokemiske data, hydrogeologiske data, vegetation, topografi, afstrømning, overfladevandskvalitet, økologi og socioøkonomi (Refsgaard et al., 2007).

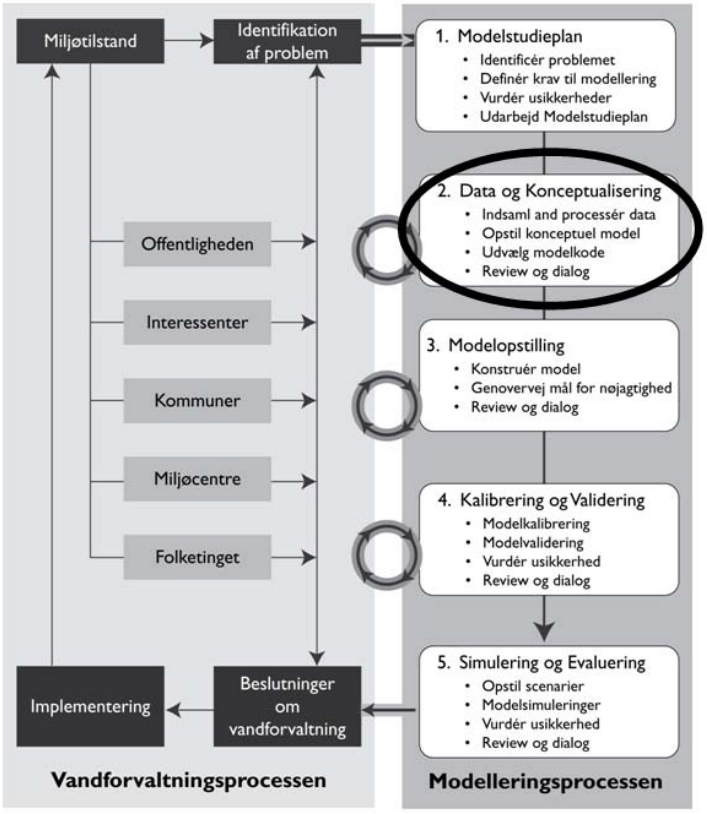
Det anbefales at opstille alternative konceptuelle modeller (Refsgaard et al., 2010a) da denne metodik er meget anvendelig til tydeligt at illustrere betydning for IO og GO.

Relevante usikkerhedsmetoder for TRIN 2 Data og konceptualisering

Geovejledning 7 (Refsgaard et al., 2010a)
Kilde A: The knowledge base in MOST, tasks and activities: http://vandmodel.dk/xpdf/appendix-a_most-tasks-and-activities_20100601.pdf
Kilde B: The knowledge base in MOST, methods: http://vandmodel.dk/xpdf/appendix-b_most-methods_20100601.pdf

Part: Modellør (M), Vandressourceforvalter (V), Interessenter (I), Reviewer (R)

Henvisning til vejledninger og egnede usikkerhedsmetoder	Part
Opgaver under trin 2 (Geovejledning 7, tabel 2 side 16 opgave 2.1-2.11; Kilde A 2.1-2.11 side 38-68)	M
DUE : Data uncertainty engine (Brown and Heuvelink,2005; Refsgaard et al., 2007)	M
Opstilling af konceptuel model (Geovejledning 7, afsnit 4.7.2 side 23-56; Kilde A 2.4-2.6 side 47-57)	M
Behov for alternativ konceptuel model (Geovejledning 7, afsnit.4.7.3 side 26-28; Kilde A 2.7 side 58)	M
Geostatistiske analyser og TPROGS (se kapitel 11 i Sonnenborg og Henriksen, 2005)	M
Review af konceptuel model (Geovejledning 7, afsnit 4.7.4 side 28-31; Tabel 2 side 16, opgave 2.12; Kilde A 2.12, side 69-72)	MVR



Trin 3 – Modelopstilling
I dette trin processeres inputdata til den valgte modelkode, der gennemføres testkørsler, der specificeres nøjagtighedskriterier til brug for den efterfølgende kalibrering og validering af modellen. Når det handler om at beregne indvindingsoplandet til en kildeplads, er overvejelser om følgende forhold i relation til diskretisering og repræsentation af datainput særligt nyttige:

- Indvindingsmængden / og repræsentation af tidslige variationer i oppumpningen
- Diskretisering af modellen jf. potentialeforhold og gradientforhold i og mellem magasiner
- Zonering af nettonedbør, dræn, udveksling af vandløb mv.
- Grundvandsdannelse til det primære magasin og interaktion mellem magasiner
- Transmissivitetsfordeling i magasinet (afhænger af tykkelse og kx)
- Lavpermeable dæklag mellem magasinerne (afhænger af tykkelse og kz)
- Frit eller artesisk magasin.
- Filtersætning i det primære magasin / vertikal indstrømningsfordeling.
- Andre indvindere og årstidsvariation i disses oppumpning (fx markvanding, dambrug osv.).

Eksempel
Horisontal diskretisering
Den horisontale diskretisering af modelcellegridet har betydning for beregning af både IO og GO. Derfor anbefales det (Iversen, et. al, 2008), at der i forbindelse med udpegning af IO og GO anvendes en tilstrækkelig fin diskretisering (ned til 50 meter eller lavere hvis det vurderes nødvendigt) i området tæt på og omkring kildepladsen.
Vertikal diskretisering
Den vertikale diskretisering bestemmes af enten geologiske og/eller hydrostratigrafiske højdemodellag, hvortil den numeriske models beregningslag tilpasses. I modeller, hvor der i stedet anvendes pixellering, vil den vertikale diskretisering af beregningslag være styret af en eller anden mere eller mindre arbitrær skalering af beregningslagene mellem grundvandspejlet og den impermeable modelbund.

Indre randbetingelser ved vandløb, dræn og søer kræver særlige overvejelser i forbindelse med modelopstilling til IO og GO. Drænrandbetingelsen er kun aktiv, når grundvandsspejlet står højere end de indlagte dræn. Vandløbsrandbetingelser tillader strømning i begge retninger, og her skal man overveje, hvilken type kontakt der er mellem grundvand og vandløb (direkte, kun vertikalt tryktab gennem bunden eller kombineret vertikalt og horisontalt tryktab). Endelig skal man for dræn og vandløb forholde sig til såvel vandstand/kote på randbetingelsen og udstrækning af den perimeter udvekslingen foregår over (bund eller hele ådal).

Hvorvidt søer og vandløb skal med eksplicit i modellen eller skal håndteres som drænrandbetingelser afhænger ikke kun af den konceptuelle model, men er også afhængig af hvilken modelkode man benytter og de forhåndenværende observationsdata. For vandløb der ikke medtages eksplicit, er det ikke muligt at vurdere modellens evne til at simulere afstrømninger i vandløbspunkter med fx synkronmålinger af minimumsvandføringen. Utætte boringer (eller overløbsboringer til dambrug) og andre menneskeskabte eller naturlige heterogeniteter (fx i kalk) kan give anledning til særlige udvekslinger mellem grundvand og overfladevand der skal beskrives med specielle indre randbetingelser. Det samme gælder dræn langs veje og bygninger, udveksling med regnvands- og kloakledninger mm. fortrinsvis i byområder.

Når alle data er processerede til det format og den diskretisering, den valgte modelkode kræver, laves en første testkørsel med såvel strømnings- som

partikelbanemodel for at vurdere om der er numeriske problemer eller grove fejl i modelopsætningen. Analyse af Masse balance fejl, Robusthed i forhold til ændrede input eller startværdier, Stabilitetstest og Visualisering (MRSV) er her en nyttig usikkerhedsmetode.

Herefter kan nøjagtighedskravene revurderes. De endelige nøjagtighedskrav til modellen skal fastlægges efter at datagrundlaget er gennemgået (fx pejledata og data fra hydrometristationer). De skal evt. revurderes i forhold til de mål der blev stillet op i den indledende fase i trin 1 under punkt 4 (jf. 4.4 afsnit 3.3 i Refsgaard et al., 2010a).

Det er vigtigt, at der udover kvantitative kriterier også opstilles kvalitative kriterier fx (i) de estimerede parametre skal have realistiske værdier, (ii) residualer skal være rimeligt fordelt i tid og sted, (iii) områdets hydrogeologiske karakteristika skal kunne reproduceres af modellen (ved IO og GO er specielt strømretning, gradient og beliggenhed af grundvandskel vigtige, ligesom at interaktion med vandløb og dræn bør være vel beskrevet).
Det anbefales derfor før kalibreringen går i gang, at man vurderer et ”range” for de vigtigste parametre og et start gæt, med ”a-priori” vurdering af realistiske værdier.

Valget af kvantitative nøjagtighedskriterier afhænger af modelformålet. Afgrænsning af IO og GO kræver brug af nøjagtighedskriterier der undersøger residualværdier i forhold til trykniveauobservationer og i forhold til vandløbsafstrømning (Refsgaard et al., 2010a).

Pejledata:
Først vurderes det ud fra modellens formål, hvilke kvantitative nøjagtighedskriterier der skal bringes i spil. Er det alene afgrænsning af IO og GO så benyttes de 6 angivne nøjagtighedskriterier vist i tabel 4 (Refsgaard et al., 2010a). De angivne numeriske mål for nøjagtigheden for screening, overslagsberegning og detailmodellering er vejledende værdier. Dvs. præcise kvantitative mål for nøjagtigheden skal fastlægges ud fra en konkret analyse og i forhold til ambitionsniveauet for den aktuelle modelleringsopgave, og en første testkørsel med modellen med det observationsdatasæt, der er udvalgt til kalibrering af modellen.

Afstrømningsdata:
Hvis der anvendes en stationær model så skal der afhængigt af om modellen kalibreres udfra middelvandføringer og/eller minimumsvandføringer anvendes kriterium 6 og 7 (Refsgaard et al., 2010a). Ved en dynamisk model skal begge kriterier benyttes. Vejledende betaværdier for forskellige ambitionsniveauer, hydrograftyper, oplandsstørrelser (årmiddel- og minimumsvandføringer) er angivet i tabel 10, side 35 (Refsgaard et al., 2010a).

Aldersdateringer/tracere
Der findes ikke vejledende metodik til vurdering af aldersdateringer for nærværende.

I nedenstående Tabel 4 er givet et vejledende bud på hvilke faktorer i den samlede modelopstilling, der især skal rettes fokus på ved IO og GO oplandsmodellering.

Tabel 4 Fokus på modelparametre og usikkerhedskilder ved modelbaseret afgrænsning af indvindingsoplande (IO) og grundvandsdannende oplande (GO).

Parametre\ Score	Vigtigt	Meget vigtigt	Afgørende betydning
Geologisk usikkerhed		X	
Konceptuelle model		X	
Heterogenitet			X
Diskretisering(horisontal)		X	
Diskretisering(vertikal)		X	
Randbetingelser (rigtige valg)			X
Vandløbskontakt (størrelse)		X	
Dræn (størrelse)		X	
K og T-værdier			X
(Kh:Kv) Anisotropi		X	
Potentiale og gradientforhold			X
Indvindings(struktur)			X
Nettonedbør		X	
Vandbalancen		X	
Stat/dyn oplande	X		
Klima		X	
Modelkode	X		
Partikelbanemodul	X		
Strong-weak sink		X	
Antal partikler		X	
Optegning af ”Stegen”			X

Tabel 4 vurderer hvilken fokus de enkelte emner bør indgår med i forhold til vurdering af oplandsusikkerhed på de numerisk beregnede oplande opdelt på tre kategorier: ”Vigtigt”, ”Meget vigtigt” og ”Afgørende betydning”. Dermed være ikke sagt, at fx valg af modelkode og om modellen er opstillet stationært eller dynamisk ikke har betydning for oplandets udbredelse, men at fx randbetingelser og viden om de rette potentialeforhold har afgørende betydning for, at oplandet beregnes korrekt. Det understreges, at der skal foretages en konkret vurdering i hver enkel modelopstilling, og at modelformål, ambitionsniveau, geologiske forhold og andre forhold kan spille ind og give forskydninger i de enkelte faktorers væsentlighed. Her er det UM for den konkrete opgave som i sidste ende kan tages i anvendelse, til en evt. nærmere afvejning af hvilke forhold der kræver særlig omhu og en særlig fokus. Tabellen skal ses som en gennemsnitlig vurdering ud fra forfatternes egne erfaringer fra en række modelopsætninger.

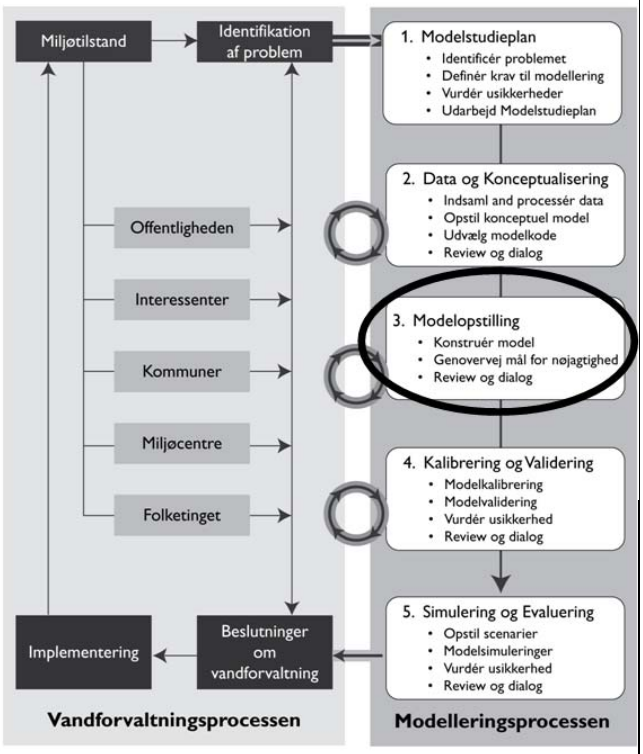
Der afsluttes med et eksternt review (peer review) efter at modellen er opstillet. Peer review skal gennemføres af fagfolk, som har lige så stor modelleringsmæssig erfaring og indsigt som den rådgiver, der gennemfører selve modelleringsopgaven, og som desuden er eksterne i forhold til opgavens parter (Refsgaard et al., 2010a:10).

Relevante usikkerhedsmetoder for TRIN 3 Modelopstilling

Geovejledning 7 (Refsgaard et al., 2010a)
The knowledge base in MOST, tasks and activities:
http://vandmodel.dk/xpdf/appendix-a_most-tasks-and-activities_20100601.pdf
Kilde B: The knowledge base in MOST, methods:
http://vandmodel.dk/xpdf/appendix-b_most-methods_20100601.pdf

Part: Modellør (M), Vandressourceforvalter (V), Interessenter (I), Reviewer (R)

Henvisning til vejledninger og egnede usikkerhedsmetoder	Part
Opgaver under trin 3 Geovejledning 7,Tabel 3 side 17 opgave 3.1-3.4; Kilde A 3.1-3.5 side 73-92)	M
MRSV analyse. Testkørsel og analyse af masse balance, robusthed, stabilitetstest og visualisering (Geovejledning 7, Tabel 3 side 17) 3.2, side 79-81; Kilde B: s20,28,32,36.	M
Valg af nøjagtighedskriterier (Geovejledning 7 afsnit 4.7.6 side 31-35); A 3.3, side 82-86	M
Review af modelopstilling (Geovejledning 7 afsnit 4.7.4 side 28-31; Tabel 3 side 17; Kilde A 3.5, side 89-92)	MVR



Trin 4 – Kalibrering og validering

Der udarbejdes en kalibreringsstrategi inden kalibreringsarbejdet påbegyndes. Denne strategi kunne fx omhandle, at kalibreringen af modellens trykniveauer skal være specielt nøjagtige inde omkring vigtige kildepladser med tilhørende IO og GO (jf. 4.5 afsnit 4.1 i Refsgaard et al., 2010a). Ligeledes skal der vælges kalibreringsmetodik (herunder objektivfunktion) og kalibreringsparametre (typisk baseret på en sensitivitetsanalyse).

Herefter gennemføres kalibreringen og modelresultater vurderes i forhold til nøjagtighedskriterier. Både kvantitative og kvalitative kriterier indgår.

Der skal i videst muligt omfang gennemføres valideringstest mod uafhængige data for de typer situationer, hvortil modellen tænkes anvendt. I forbindelse med IO og GO er det ikke muligt at validere modellen i forhold til de afgrænsede oplande. I stedet må valideringen rette fokus på modellens evne til at simulere trykniveau hhv. afstrømning, i forhold til data der ikke indgår i kalibreringen (fx split-sample test), Refsgaard et al., (2010a). Desuden skal modellens valideringsstatus beskrives med

angivelse af dokumenterede anvendelsesmuligheder og begrænsninger, fx såfremt det ikke er muligt at afgrænse IO og GO til alle kildepladser.

Endelig gennemføres en usikkerhedsanalyse af kalibrering og validering, hvor usikkerhed vurderes på (i) inputdata, randbetingelser og parameterværdier, samt (ii) modelstruktur (fx ved alternative konceptuelle modeller af geologi, nettonedbør eller ydre/indre randbetingelser). En metode til vurdering af usikkerheder på kalibreret og valideret model kan fx vurderes ved følsomhedsanalyser som nævnt i tabel 5.

Tabel 5 Usikkerhedskilder og mulige følsomhedsanalyser til vurdering af deres betydning (Refsgaard et al., 2010a:39).

Usikkerhedskilde	**Følsomhedsanalyse**
Ydre randbetingelse	Test af 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	Varier størrelsen og/eller fordelingen
Hydrauliske egenskaber	Varier parameterværdi til min. hhv. max. af realistisk interval
Gridopløsning	Halver gridopløsningen. Ultimativ test er en reduktion af gridstørrelse indtil der ikke sker ændringer i output
Stationær vs. dynamisk	Test om middel af en dynamisk simulering er lig en stationær simulering
Geologisk tolkning	Test alternative tolkninger (alternative konceptuelle modeller)
Markvanding	Varier indvindingsmængde til eksempelvis tilladelse eller en højere indvinding for belysning af situationen i tørre år
Dræn	Varier dybden til dræn; anvend forskellige rumlige distribueringer fx kun i landbrugsarealer versus hele arealet

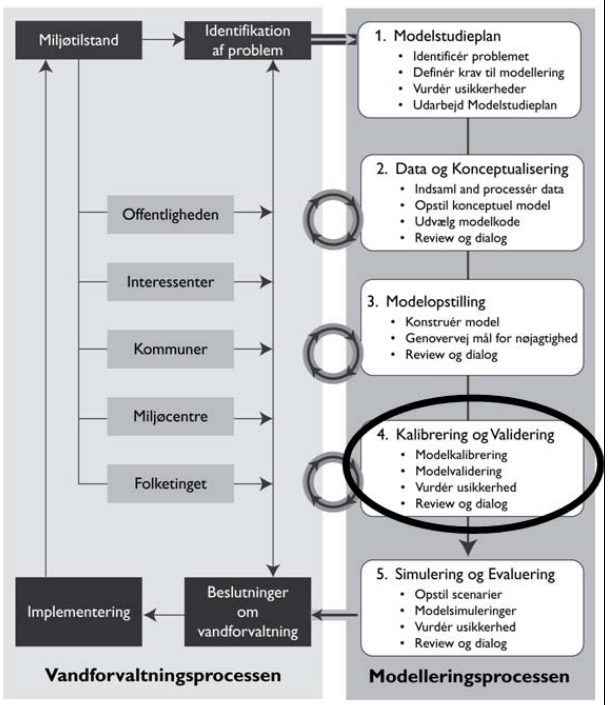
Herefter kan usikkerhedsmatricen opdateres med den nye erkendelse efter kalibreringen. Modellens dokumenterede anvendelsesområde vurderes. Modellen rapporteres og review'es.

Relevante usikkerhedsmetoder for TRIN 4 Kalibrering og validering

Geovejledning 7 (Refsgaard et al., 2010a)
Kilde A: The knowledge base in MOST, tasks and activities: http://vandmodel.dk/xpdf/appendix-a_most-tasks-and-activities_20100601.pdf
Kilde B: The knowledge base in MOST, methods: http://vandmodel.dk/xpdf/appendix-b_most-methods_20100601.pdf

Part: Modellør (M), Vandressourceforvalter (V), Interessenter (I), Reviewer (R)

Henvisning til vejledninger og egnede usikkerheds-metoder	Part
Opgaver under trin 4 (Geovejledning 7 tabel 4 side 18 opgave 4.1-4.13; Kilde A 4.1-4.13 side 93-134)	M
Modelkalibrering (Geovejledning 7 afsnit 4.7.6 side 35-37; Kilde A 4.1-4.6 side 94-113)	M
Alternative konceptuelle modeller (Geovejledning 7 afsnit 4.7.3 side 26-28; evt. TPROGS)	M
Inverse rutiner (PEST og UCODE) (Kilde A 4.2 side 97-100)	M
Modelvalidering (Geovejledning 7 afsnit 4.7.8 side 42-45; Kilde A 4.8-4.9 side 116-121)	M
Usikkerhedsanalyser på kalibreret model (Geovejledning 7 afsnit 4.7.7 side 37-42, Kilde A 4.10 side 122-125)	M
Modellens dokumenterede anvendelsesområde (Geovejledning 7 afsnit 4.79 side 45-46; Kilde A.4.11 side 126-128)	M
Review af kalibrering og validering (Geovejledning 7 afsnit 4.7.4 side 28-31; Tabel 4 side 18, opgave 4.13; Kilde A 4.13, side 131-134)	MVR



Trin 5 – Fra simulering og evaluering til beslutninger om IO og GO under usikkerhed

Scenarie udvikling

Det anbefales at anvende input fra et antal forskellige globale/regionale klimamodeller. Ved vurderinger der går frem til 2050 anbefaler den danske klimatilpasningsstrategi, at man undersøger A1B scenariet (der er ikke så store forskelle på klimascenarierne, når man kun kigger 40-50 år frem; derimod er der forskelle på globale og regionale klimamodeller og biaskorrektionsmetoder). Klimatilpasning frem mod 2100 skal imidlertid bygge på forskellige fremtidige klimascenarier, fx A2, A1B og B2, da klimascenarieusikkerheden får større betydning og giver meget store usikkerheder på længere sigt.

Traditionelt har man i planlægningen og opstillingen af scenarier arbejdet med 30-årige datainput, fx 1961-90 perioden hos DMI til nedbør og fordampning. Disse 30-års serier tager højde for langperiodiske svingninger i klimaet, og indgår bl.a. i skøn af medianminimum og andre statistiske størrelser. Men de repræsenterer ikke menneskeskabte påvirkninger, som vil påvirke det fremtidige klima. Derfor er man nødt til at vurdere de fremtidige klimainput også fx år 2050 eller 2100 og derved søge at gøre indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande robuste i forhold til forventede klimaændringer. Det gør man så ved at bruge input fra hhv. globale og regionale klimamodel scenarier, som biaskorrigeres med fx "delta change metoden" i forhold til en faktisk kontrolperiode med observeret klima (fx 1990-2009).

Nogle globale/regionale klimamodeller forudsiger, at der generelt vil falde mere nedbør i vinterhalvåret. Samtidig vil sommerhalvåret få et mere tørt klima, sammenlignet med det klima vi kender i dag. Andre globale/regionale klimamodeller forudsiger i modsætning hertil en mindre vinternedbør og uændret eller mindre sommernedbør. En større eller mindre nettonedbør vil have stor indflydelse på beliggenheden af IO og GO, fordi vinternedbøren er meget styrende for grundvandsdannelsens størrelse, og fordi den større fordampning om sommeren vil kunne give rumlige ændringer i grundvandsdannelsens fordeling, i fordampningen i vækstsæsonen og i oppumpningen til markvanding og vandindvinding (Sonnenborg et al., 2006), og dermed give anledning til et ændret grundvandsspejl og ændret minimumsvandføring.

Ændringer i grundvandsspejlet vil kunne svække "robustheden" af afgrænsningen af indvindingsoplandet og det grundvandsdannende opland. Det betyder, at der må stilles store krav til scenarieudviklingen, og at det er vigtigt, at der sker en aktiv involvering af interessenter i opstillingen af fremtidsscenarier for klima, arealanvendelse og vandindvinding, så den meget betydelige usikkerhed der er på, hvordan det hydrologiske kredsløb tager sig ud om 50-100 år, indgår i scenarierne, og kan bidrage til de usikkerhedsbånd på IO og GO der vurderes grundet den globale opvarmning.

Udover klimainput har vegetation og vandindvinding samt evt. ændrede randbetingelser (fx hvis modellen støder op til hav eller fjorde med havstigning) betydning. Ved vurdering af indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande vil det antageligt være tilstrækkeligt at bruge "delta-change" metoden til biaskorrektion af randbetingelser (fx fastholdt trykniveau ved rand, hav eller lignende). Hvis man har en problemstilling hvor makroporestrømning har en dominerende effekt er det vigtigt at at supplere 'klimasikringsanalysen' baseret på 'delta change metoden' med den 'direkte metode'. Ved den direkte metode inddrages den fremtidige ændringen i den tidslige dynamik fx i nedbør fra klimamodellen (fx ændret hyppighed af kraftige nedbørshændelser eller forøget varighed af tørkeperioder) til en transformering af den observerede tidsserie (fx nedbør), så den har samme statistiske fordeling (middelværdi og standardafvigelse) som det fremtidige klima. Den direkte metode vurderes at være særligt egnet såfremt ekstremhændelser i grundvandsspejl og grundvandsdannelse skal inddrages i regning.

Simuleringer
Simuleringer udføres og analyses. Først køres strømningsmodellen for de opstillede scenarier. Efterfølgende foretages der partikelbane simuleringer (eller stoftransportsimuleringer).

Det er ikke uden betydning, hvordan partikler placeres eller lægges ind i diverse partikelbane-programmer, og der er flere muligheder herfor. Den mest simple og hurtige måde at gøre det på, er ved at udføre en baglæns simulering i MODFLOW/MODPATH, hvor der lægges et veldefineret antal partikler ind omkring selve indvindingsfilteret og partiklerne køres baglæns op til vandspejlet i modellen. Dette kan også udføres lidt mere avanceret, hvor partiklerne tilføres i et antal, svarende til den indvindingsmængde, der simuleres (fx 1 partikel pr. 1000 m^3/år). Efterfølgende bør der også foretages en "forlæns simulering" for at tjekke, hvorvidt resultaterne er følsomme overfor hvorfra de afsendes i den "baglæns simulering" (alternativt kan man starte med en "forlæns partikelbanesimuleringen").

I programmet MIKE-SHE, hvor der kun kan køres forlæns partikelbanesimuleringer, kan ovenstående naturligvis ikke udføres. Derfor må man søge en anden løsning til at tjekke følsomheden i forhold til hvordan partiklerne sendes af sted. Ved forlæns simulering kan man afgrænse IO, såfremt man afsender et antal partikler fra samtlige 'kasser' i samtlige lag, og tæller op fra hvilke kasser, der ankommer partikler til de forskellige kildepladser og boringer. GO afgrænses ved, at man sender partikler af sted fra det/de øverste aktive lag i modellen, og undersøger i hvilke kildepladser/boringer de havner. Man skal være opmærksom på, at transporttiden kan være betragtelig gennem systemet (afhængigt af den effektive porøsitet, op til tusind år eller mere).

I forbindelse med både MODFLOW og MIKE-SHE løsningen er det vigtigt, at man holder sig for øje, at partikler ender de rigtige steder og ikke havner i tørre celler eller i andre vandstandsende beregningsceller i de øverste beregningslag, som kan giver anledning til et forkert beregnet GO. Jo mere homogen modellen er, desto færre partikler pr. kasse kan man klare sig med, men i hvert tilfælde må der foretages konkrete analyser af, hvor mange partikler der er nødvendige. I MIKE SHE fordeles partiklerne tilfældigt i den kasse, de startes fra.

I MODFLOW/MODPATH er der i programmet indbygget et værktøj, som automatisk fordeler partiklerne i forskellige dybdeintervaller i indvindingsfilteret/cellen. Det er her særligt vigtigt, at man har for øje, at partikler som fordeles efter denne automatik, hvis de køres baglæns, vil kunne fordele sig i klumper på overfladen, og således give opdelte og misvisende GO. Derfor er placering af partikler i partikelbaneprogrammerne ikke uvæsentligt at forholde sig til. Samtidig kan MODPATH vise samtlige beregnede partikelbaner i 3D hvilket ikke kan lade sig gøre i MIKE-SHE. Her må man gå ind og definere et begrænset antal partikler man vil have afbilledet (typisk 50-100 partikelbaner).

Grundvandsdannende oplande vil typisk have noget større usikkerhed end indvindingsoplande, og de kan være følsomme overfor dynamik og variabilitet i grundvandsdannelsen, fx heterogenitet, småskalaforhold der ikke er repræsenteret i modellen, topografisk variation, dræn mm.

Vurdering af prediktionsusikkerhed
Forud for prediktions-usikkerhedsanalysen hvor betydningen af input, parameter og modelstruktur, undersøges for usikkerheden på afgrænsningen af IO og GO, kan det

være en god ide at foretage en følsomhedsanalyse, der kan give en god fornemmelse af hvad der har størst betydning for predikationsusikkerheden (IO og GO).

I en *følsomhedsanalyse* afvikles modelsimuleringer med forskellige værdier af de usikre størrelser og effekten heraf vurderes ved sammenligning af simuleringsresultaterne (fx randbetingelser, ændret indvinding, alternative drænopsætninger mv.). Det kan give en indledende vurdering af effekten af usikkerhedskilderne enkeltvis på modelsimuleringer af IO og GO. Den udførte usikkerhedsanalyse baseret på følsomhedsanalyse skal vurderes på baggrund af, hvor meget en given ændring af en usikker størrelse, ændrer ved oplandets størrelse og placering. Udførelsen af en følsomhedsanalyse er ikke nødvendigvis begrænset til en vurdering af parameterfølsomhederne, men kan i princippet gennemføres for alle elementerne af en model. Eksempelvis bør der altid udføres en følsomhed af modelrandens betydning, hvilke kan gennemføres ved afprøvning af forskellige randbetingelser. Det vil også være muligt at undersøge heterogenitetens betydning ved fx at lade parameterværdierne indenfor en zone have en randomiseret fordeling, i stedet for den antagne ensartede fordeling, og på den måde vurdere betydningen af evt. mindre skala heterogenitet.

For parameterværdier vil det sjældent være muligt på forhånd at afgøre hvilke parameterværdier og/eller kombination af værdier, der vil have den største effekt (Refsgaard et al., 2010a:39-40). Oplagte værdier for følsomhedsanalysen vil derfor være min./maks. Af deres respektive realistiske parameterværdi intervaller fx bestemt ved anvendelse af inverse rutiner (PEST eller UCODE) i kalibreringen.

På grund af forskelligheden af de usikkerhedskilder der optræder indenfor modellering, vil det ikke være muligt at kvantificere samtlige prediktionsusikkerheder med en og samme metode (Refsgaard et al., 2010a:40). Der er derfor behov for ved vurdering af usikkerhedsbåndet på IO og GO, at overveje brugen af metode, evt. at kombinere et par metoder: fx Alternative konceptuelle modeller kombineret med inverse rutiner og/eller Monte Carlo Simuleringer (Sonnenborg og Henriksen, 2005; Refsgaard et al., 2007).

Alternative konceptuelle modeller er en vigtig metode som er praktisk anvendelig til en mere kvalitativ vurdering af usikkerheden på IO og GO. Da metoden samtidig er let at kommunikere videre til interessenter og slutbrugere, og er velegnet til at illustrere på kort (se nedenfor under fællesmængde og foreningsmængde af IO og GO), så har metoden særlige styrker i forbindelse med kortlægningsopgaver i forhold til de øvrige metoder nævnt nedenfor. Ved metoden udformes et antal alternative konceptuelle modeller fx baseret på alternative procesantagelser, alternative nettonedbørsinput, alternative randbetingelser og/eller alternative geologiske/hydrostratigrafiske tolkninger. Disse er så kalibreret og valideret (jf. Trin 4) fx ved inverse rutiner (fx PEST), hvorved det er muligt at analysere de hydrologiske konsekvenser med hver enkelt alternative model eller modelkombination (der kan i princippet opstilles et stort antal kombinationer. Fx vil tre forskellige alternative nettonedbørsinput, 2 alternative randbetingelser, 3 alternative geologiske tolkninger give i alt 18 alternative konceptuelle modeller).

En særlig type alternative konceptuelle modeller udgøres af værktøjer såsom TPROGS – Transitional Probability Generation (Carle, 1999; Troldborg, 2004) og MultiPoint statistik fx sGeMS (http://sgems.sourceforge.net/) - Stanford Geostatistical Modelling Software (Remy et al., 1999). TPROGS og sGeMS giver primært mulighed for en geostatistisk baseret analyse af de geologiske forhold. Der kræves et antal

realisationer (typisk 10-20, lidt afhængigt af hvad formålet er), som hver skal kalibreres med inverse rutiner (fx PEST).

Monte Carlo simuleringer kan anvendes i de tilfælde, hvor det er muligt statistisk at karakterisere usikkerhederne. Simuleringerne udføres ved, at der for hver af de stokastiske variable "trækkes" en værdi, der ligger inden for det definerede interval for denne parameter, og der foretages en almindelig modelkørsel. Herefter trækkes en ny værdi for hver af de stokastiske parametre efterfulgt af endnu en modelkørsel. Dette gentages "mange" gange (typisk 20-50 lidt afhængigt af hvornår den variabel man kigger på "stabiliserer"; hvis man fx er interesseret i middelværdien af grundvandsdannelsen kan man formentlig nøjes med 20-50 kørsler, mens en 99 % fraktil vil kræve mange flere), på en måde der tilgodeser sandsynlighedsfordelingen for de enkelte stokastiske parametre. Hver modelkørsel kaldes en "realisation" og samtlige realisationer benævnes et "ensemble". Ved en efterfølgende statistisk analyse kan der fx beregnes middelværdi samt standard afvigelse for ensemblet. Modelresultaterne kan således præsenteres som en middelværdi samt et sandsynlighedsinterval (konfidens- eller prediktionsinterval).

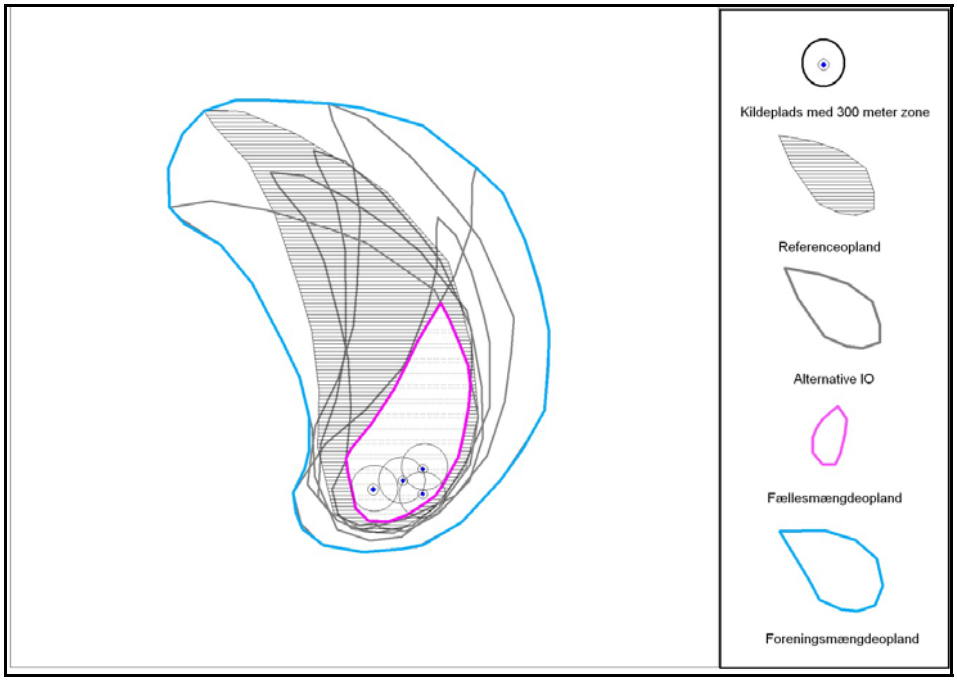
PEST (alternativ metode UCODE m.fl.) anses i dag for at være det stærkeste værktøj til invers modellering. Metoden i PEST (Doherty, 2004) har den underliggende filosofi, at det interessante er ekstremerne, fx vil det mest interessante i forbindelse med en forureningstrussel ofte være, hvornår det tidligste gennembrud kan forventes samt hvad den maksimale koncentration vil blive. I stedet for at anvende en analytisk løsning, med de uundgåelige antagelser om linearitet, tager PEST afsæt i at optimere prediktionsværdien, dvs. finde den maksimale eller minimale prediktionsværdi, der er mulig for den givne model. Denne maksimering/minimering bliver dog begrænset ved, at modellen samtidig kræves at være kalibreret på et acceptabelt niveau, defineret på basis af en acceptabel værdi for objektiv funktion. Analysen udføres ved, at det angives, hvilken værdi objektiv funktionen maksimalt må antage, for at modellen stadig vurderes at være kalibreret på et acceptabelt niveau. Er PEST ikke indbygget i den anvendte GUI, kan programmet samt manual downloades fra http://www.sspa.com/pest/index.htm.

Sammenlignet med Monte Carlo kræver metoden relativt få modelkørsler, hvilket kan været et argument for at bruge PEST fx hvis modellens kørselstid er betydelig. Det er ikke et problem ved stationære kørsler, men hvis dynamiske variationer indgår, kan det være nødvendigt at begrænse antallet af kørsler. PEST beregner konfidensintervaller og kovariansmatrice for parametrene og kan anvendes til analyse af prediktions-usikkerheder for i princippet alle typer prediktioner. Den vurderes dog p.t. som mindre egnet end Monte Carlo til kvantificering af usikkerhed på IO og GO, så længe det er parameter- eller inputusikkerheden der undersøges. PEST kan også benyttes til kvantificering af usikkerhed fra småskalavariation i parameterværdier, selvom om dette felt endnu er så nyt, at det ikke har været afprøvet i praksis endnu. PEST kan evt. kombineres med MC.

Præsentation af IO og GO på kort (tegning af stregen)
Når modelarbejdet er afsluttet, de sidste scenariekørsler er beregnet og de endelige streger med IO og GO er udarbejdet, overdrages resultaterne til ressourcemyndigheden i den pågældende kommune. Dette sker oftest gennem en rapport med tilhørende GIS-temaer.

I forbindelse med indsatsplaner og de korttemaer som skal leveres af Miljøcentrene til kommunerne, er det vigtigt at oplandsafgrænsningerne er foretaget på så højt fagligt niveau som muligt. Derfor anbefales det, at der udarbejdes et *reference-IO og -GO*, som svarer til den tilladte indvindingsmængde på den pågældende kildeplads

ved en normaldrift situation. Hvis man for en kildeplads har to boringer med en fordeling på 1/3 på den ene boring og 2/3 på den anden fordeles den tilladte indvinding på boringerne. Samtidig anbefales det, at der udarbejdes et *foreningsmængde- og fællesmængdeopland* der beskriver den iboende usikkerhed i oplandsafgrænsningen, men samtidig giver ressourcemyndigheden (kommunen) en mulighed for at vurdere, hvor man får størst sikkerhed for nytte af en evt. indsats, hvilket typisk vil være i fællesmængde-oplandet (Se Fig. 3a).



Figur 3a Illustration af referenceopland, fællesmængdeopland og foreningsmængdeopland

Referenceoplandet for både indvindingsoplandet (IO) og det grundvandsdannende opland (GO) er defineret som dem der fremkommer, når oplandene beregnes ud fra den tilladte indvindingsmængde (evt. som et gennemsnit over de sidste 3-5 år), og hvor den gennemsnitlige nettonedbør/infiltration er anvendt. Samtidig er de hydrauliske parametre i de betydende magasiner fastholdt svarende til de værdier, som er bestemt ved kalibrering (Iversen et al., 2008).

Foreningsmængdeoplandet for henholdsvis IO og det GO er defineret som det areal, der dækker alle mulige modelkørsler, hvor parameterusikkerhedsvurderinger (stokastiske beregninger) samt mulige alternative geologiske modeller indgår. Foreningsmængde-oplandet for henholdsvis IO og det GO vil oftest være langt større i arealmæssig udbredelse end referenceoplandet.

Fællesmængdeoplandet for henholdsvis IO og det GO er defineret som det areal, der udgør en fællesmængde af alle modelkørsler for henholdsvis IO og det GO. Fællesmængdeoplandet vil ofte være et areal, som er betydeligt mindre end både referenceoplandet og foreningsmængdeoplandet, og det vil ofte ligge ret boringsnært i forhold til kildepladsen. I forbindelse med grundvandsbeskyttelse og udarbejdelse af indsatsplaner vil fællesmængdeoplandet for både IO og det GO være interessant i forhold til at anbefale en evt. indsats over for fx nitrat og andre miljøfremmende stoffer.

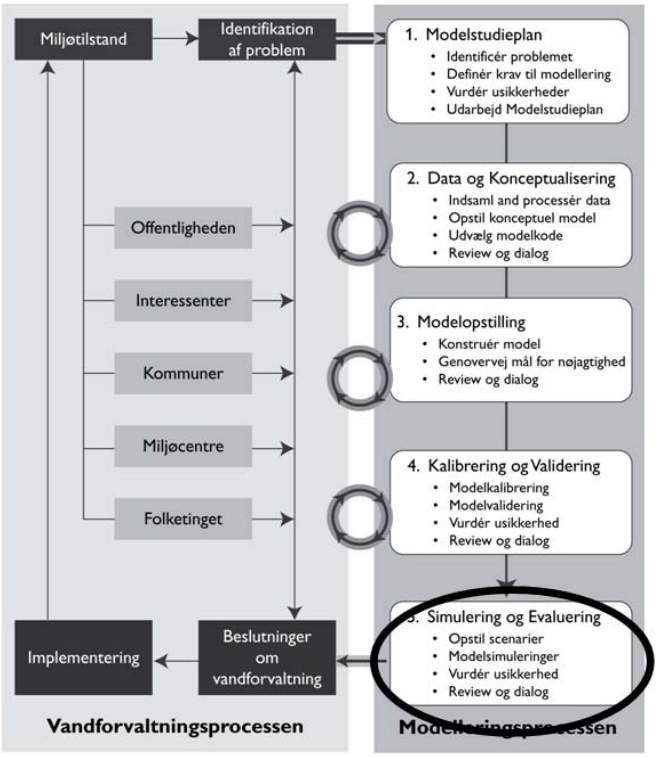
Usikkerhedsmatricen opdateres, review, stakeholder involvement (jf. Tabel 5 GPHM side 19). En afsluttende modelworkshop, temadag og lignende er også en oplagt mulighed i forbindelse med overdragelsen af data.

Relevante usikkerhedsmetoder for TRIN 5 Simulering, evaluering og beslutninger om IO og GO under usikkerhed

Geoejledning 7 (Refsgaard et al., 2010a)
Kilde A: The knowledge base in MOST, tasks and activities: http://vandmodel.dk/xpdf/appendix-a_most-tasks-and-activities_20100601.pdf
Kilde B: The knowledge base in MOST, methods: http://vandmodel.dk/xpdf/appendix-b_most-methods_20100601.pdf

Part: Modellør (M), Vandressourceforvalter (V), Interessenter (I), Reviewer (R)

Henvisning til vejledninger og egnede usikkerhedsmetoder	Part
Opgaver under trin 5 (Geovejledning 7 tabel 5 side 19 opgave 5.1-5.11; Kilde A 5.1-5.13 side 135-156)	MVIR
Scenarie udvikling (Geovejledning 7 tabel 5 side 19 opgave 5.1; Kilde A5.1 side 135-138; Kilde B side 29)	MVI
Modelsimuleringer (Geovejledning 7 tabel 5 side 19 opgave 5.2-5.5; Kilde A 5.2-5.5 side 139-146)	M
Prediktionsusikkerheder (Geovejledning 7 tabel 5 side 19 opgave 5.6-5.8; Kilde A 5.6 side 147-153; Kilde B side 5,21,30,35)	M
Referenceopland, fællesmængde og foreningsmængde (se ovenfor, og afprøvning i næste kapitel)	M
Review (Geovejledning 7 afsnit 4.7.4 side 28-31; Tabel 5 side 19, opgave 5.9; Kilde A 5.9, side 154-156)	MVR
Lukning af opgaven (behov for postaudit + evt. modelworkshop)	MVI



4. Eksempel på oplandsberegninger og usikkerhedsvurderinger i et pilotområde på Als

I dette afsnit gennemgås modelberegnede IO og GO for et pilotområde på Als i Sønderjylland.

Beregningerne og de resulterende IO og GO er udarbejdet med både forenings- og fællesmængdeopland (jf. afsnit 3.3). Samtidig er de enkelte kildepladser også vurderet efter usikkerhedsmatricen (jf. afsnit 3.2).

Afslutningsvis er der anvist en GIS-tabel for dokumentation af IO og GO så bruger (vandressourcemyndighed og rådgiver) både under og efter modelarbejdet kan finde tilbage til hvordan og på hvilket grundlag de enkelte IO og GO er beregnet.

4.1 Pilotområde

Området som dækker hele Als-modellen er valgt, da kortlægningen er afsluttet af Miljøcenter Ribe, og da der flere steder på øen er kortlagt med flere geofysike metoder (TEM, MEP og PACES). Samtidigt var der på forhånd udført en del oplandsberegninger på en række kildepladser både for IO og GO samt beregnet stokastiske oplande på flere kildepladser.

Modellen for Als har en længere historie med adskillige modelopdateringer udarbejdet i forbindelse med forskellige kortlægningsetaper og modellen har en oprindelse tilbage i slutningen af 1980'erne (referencer). Målet med modellen har under udviklingen haft forskellig fokus og anvendelse. Den seneste modelopdatering har fokuseret på indeværende kortlægning af vandressourcen på den nordlige del af Als og målet for modellen har været detailkortlægningen i forbindelse med Miljøcentrenes opgaver. Tidlige undersøgelser har mere fokus på generelle ressourceundersøgelser. Målet for den seneste undersøgelse har bl. andet været at få udarbejdet indvindingsoplande for den nordlige del af Als samt at få usikkerheden vurderet.

Modellen over Als er opstillet i programmet MODFLOW/GW-Vistas som en dynamisk model, hvor partikelbaneberegningerne er udført i den stationære model. Diskretiseringen i modellen er af varierende cellestørrelse med en overordnet diskretisering på 100 meter og med et forfinet grid inde omkring de enkelte kildepladser (Sønderjyllands Amt / Watertech, 2006).

I 2010 blev den geofysiske kortlægning af den nordlige del af Als afsluttet og modellen blev herefter rekalibreret, hvorefter nye GO og IO blev beregnet. Der blev i denne fase udarbejdet modelparameterusikkerheder på oplandene, Alectia 2010.

4.2 Fremgangsmåde

Der tages udgangspunkt i en kalibreret stationær numerisk referencemodel (seneste strømningsmodel for Als - Als_stat_2010), hvor der er beregnet både et reference IO og et reference GO for 4 kildepladser: Broballe, Nordborg og Stevning Vandværk samt indvindingen tilhørende Danfoss A/S ved Nordborg.

For de 4 kildepladser er de opstillede usikkerhedsmatricer gennemgået på baggrund af informationer indhentet fra Miljøcenter Ribe (kilde: Erfurt, 2010).

Endvidere er der foretaget en beregning af de hydrauliske parametres usikkerheder gennem en traditionel Monte Carlo simulering, med resulterende stokastiske oplande for både IO og GO.

Endelig er der beregnet IO og GO som bygger på 5 forskellige hydrostratigrafiske modeller som er anvendt i den numeriske grundvandsmodel og som alle er kalibrerede.

- Model 1: oprindelig model (WaterTech, 2006) som bygger på zoneringer, der er foretaget på baggrund af tolkninger af geologien, baseret på boringer og geofysik.
- Model 2-5 er opstillet ved at ændre i skæringsmodstanden imellem sand og ler, således, at skæringsmodstanden antager forskellige værdier henholdsvis 30, 40, 60 og 80 ohm-meter. De zoner i de enkelte lag som tolkes til at bestå af sand, vil således få forskellige horisontale udbredelser, og vil derfor give anledning til en større eller mindre grundvandsdannelse afhængig af, hvilken model der anvendes.

De ovenfor nævnte modelberegningerne giver en række IO og GO, der til slut samles i en fælles- eller foreningsmængde (jf. Fig. 3a) med de endelige oplandsafgrænsninger, som er beregnet under de enkelte scenarieafviklinger som indeholder model- og parameterusikkerheden (jf. kapitel 3). Afgrænsningsmetoden er konsistent med den gennemgang som er udarbejdet som eksempel side 69 i Geo-Vejledning 2 (Iversen et. Al. 2008).

4.2.1 Opstilling af usikkerhedsmatricen

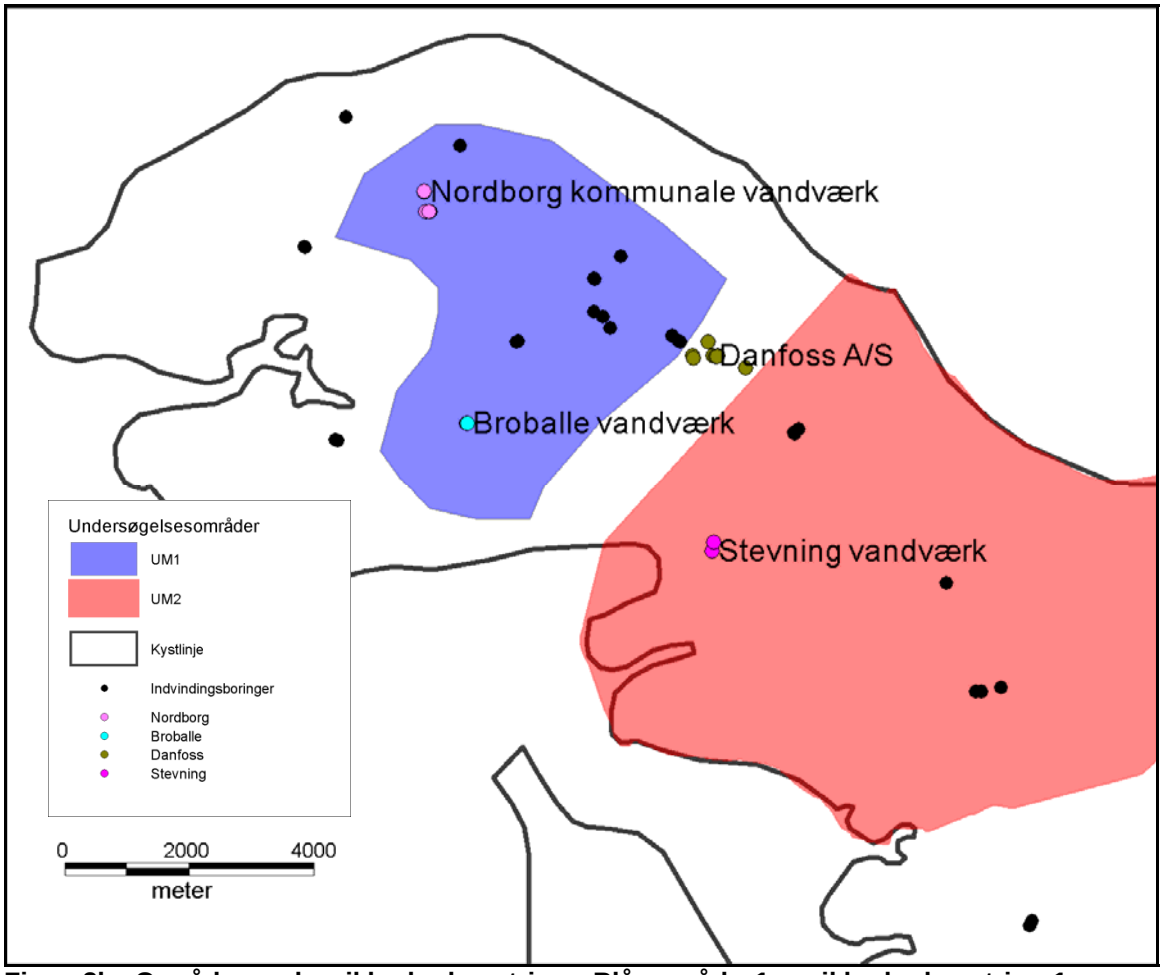
I modelområdet er der udført geofysiske målinger med bl.a. SkyTEM, MEP og PACES, og der er udført 2 større synkronpejlerunder af det tidligere Sønderjyllands Amt. Disse data og resultater heraf ligger til grund for udfyldelse af 2 forskellige usikkerhedsmatricer (jf. afsnit 4.3.1).

Den ene som er beskrevet ved usikkerhedsmatricen for område 1 (blå område på Fig. 3), omfatter området på det nordlige Als, hvor der er kortlagt med MEP, mens det andet område, som er beskrevet ved usikkerhedsmatricen for område 2 (røde område på Fig. 3b) er kortlagt med Sky-TEM.

Broballe vandværk, Danfoss A/S og Nordborg vandværk er omfattet af usikkerhedsmatricen for område 1.

Stevning vandværk ligger inden for område 2 og henføres derfor til usikkerhedsmatricen for område 2. Område 2 er karakteriseret ved dårlig datadækning, både m.h.t geologiske boringsbeskrivelser og grundvandspejlinger.

Fig. 3b viser en oversigt over kildepladsernes placering og de to områder for hvilke der er opstillet usikkerhedsmatrice.



Figur 3b: Område med usikkerhedsmatricer, Blå område 1: usikkerhedsmatrice 1 og rød område 2: usikkerhedsmatrice 2.

Kildepladser uden for de to områder kan man give en helt tredje usikkerhedsmatrice, idet disse kildepladser befinder sig i områder med meget sparsom kortlægning og derfor må tildeles større usikkerhed.

De væsentlige usikkerhedselementer beskrevet i punkterne kapitel 3 gennemgås med fokus på modellen og resultatet samles i de to usikkerhedsmatricer (jf. 4.3.1).

4.2.2 Vurdering af parameterusikkerhed på oplandsberegninger

Indledningsvis er den numeriske grundvandsmodel kalibreret efter trykniveauer og afstrømning i et dynamisk regi. I en stationær udgave af modellen er der beregnet oplande vha. partikelbaneberegninger. Disse oplande udgør herefter referencemodellens IO og GO.

Usikkerhedsvurderingen tager udgangspunkt i en Latin Hypercube Sampling (LHS). Metoden er meget effektiv og kræver færre modelberegninger end en traditionel Monte Carlo metode. Modelkalibreringen gav mulighed for at foretage en vurdering af modellens parameterusikkerhed og beregne den hertil hørende usikkerhed på oplandene (jf. figur 4).

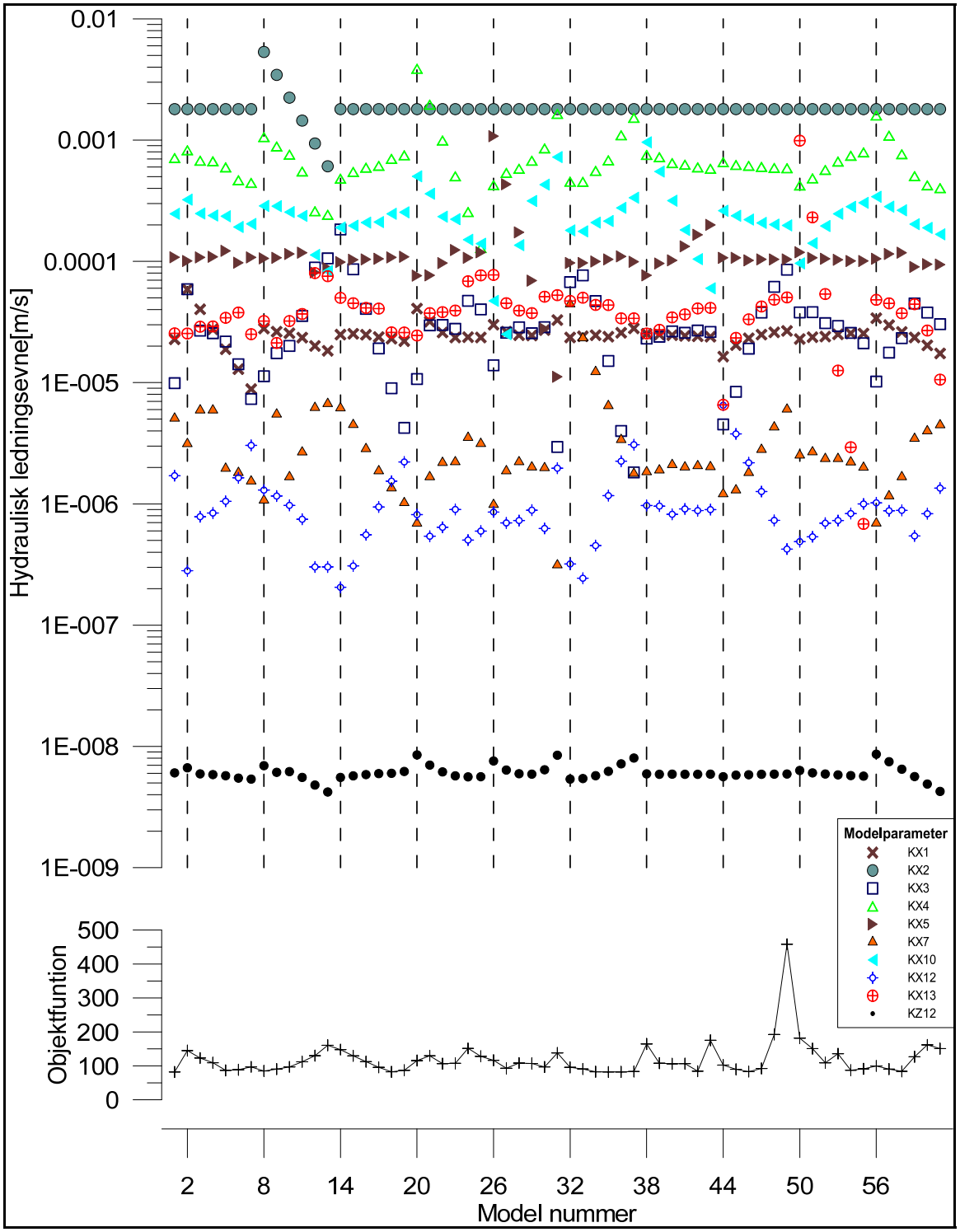
Ud fra en sensitivitetsanalyse er udvalgt de mest følsomme modelparametre. De udvalgte parametre udgør i stor udstrækning den vertikale hydrauliske ledningsevne i ler samt den horisontale hydrauliske ledningsevne i de sandede formationer. De 10 mest sensitive parametre udvælges. At det bliver 10 parametre skyldes at disse parametre har alle har en stor sensitivitet og derfor er velegnede til at indgå i usikkerhedsbestemmelsen. Der opstilles herefter 61 modeller. Hver af modellerne har fastholdt en enkelt parameter i faste intervaller inden for 2 x standardafvigelsen af referencemodellens parameterusikkerhed, mens andre parametre er holdt frie. For at imødekomme observationsdata er de frie parametre bestemt mod observationsdata vha. en yderligere inversion.

Fig. 4 viser de hydrauliske ledningsevne for de udvalgte parametre benyttet i LHS samplingen. Referencemodellen udgøres af model #1. I modellerne #2 - #7 er parameterværdien KX1 fastholdt i det bestemte interval, mens de andre parametre er bestemt frit.

Enkelte parametre er blevet låst, idet den sekundære inversion havde en tendens til at disse parametre lå udenfor det realistiske parameterinterval. Eksempelvis havde parameter KX2 en tendens til, at en forøgelse af den hydrauliske ledningsevne forbedrede objektfunktionen, mens parameterværdien røg uden for det realistiske område. Derfor blev denne parameter fastholdt på $2 \cdot 10^{-3}$ m/s i de fleste modelsamplinger. At en parameter ikke når en realistisk værdi tolkes til at modellens strukturelle form (hydrostratigrafi), eller randbetingelse ikke er tilstrækkeligt beskrevet med modellen. Andre parametre kan bestemmes frit, og enkelte parametre er særdeles velbestemt, eksempelvis den vertikale hydrauliske ledningsevne i modellens lækagelag, KZ12.

Nederst på Fig. 4 ser man de enkeltes modellers objektfunktion. Hver model med undtagelse af en enkelt model (#49) opfylder de opstillede statistiske kriterier (jf. Henriksen og Sonnenborg, 2005) for en succesfuld inversion. Model # 49 er herefter ekskluderet fra oplandsberegningerne idet modellen ikke opfylder de modelkriterier som er opstillet.

Metoden med at benytte 61 forskellige modeller, som hver især er kalibreret inverst er et godt eksempel på en praktisk anvendelig metode. Det begrænsede antal modeller man kan benytte i LHS mens man samtidig for udfyldt modelparameterrummet er at foretrække, hvis man er begrænset af store modeller med lange beregningstider.



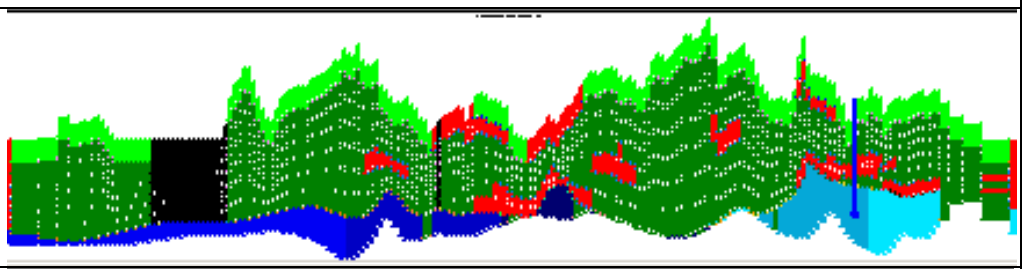
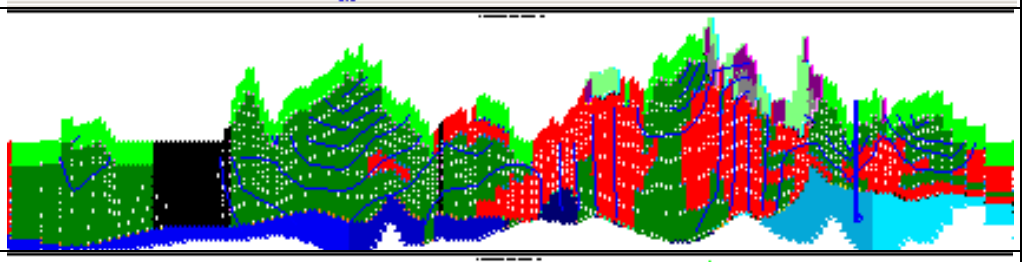
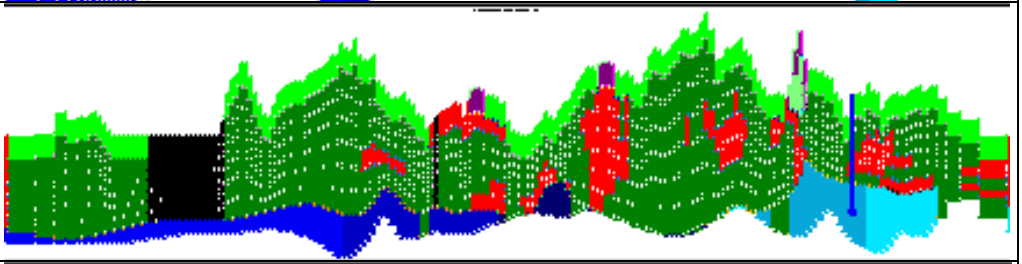
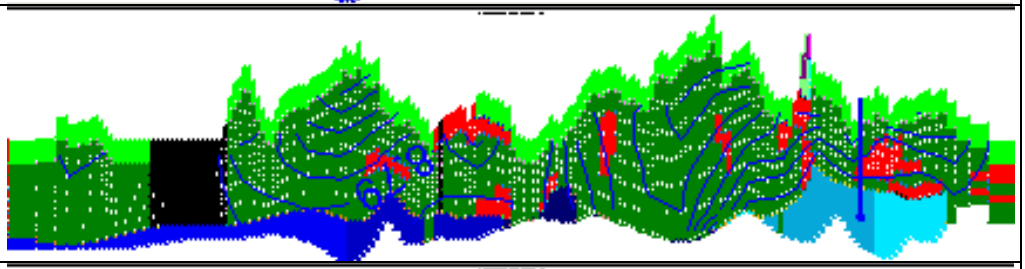
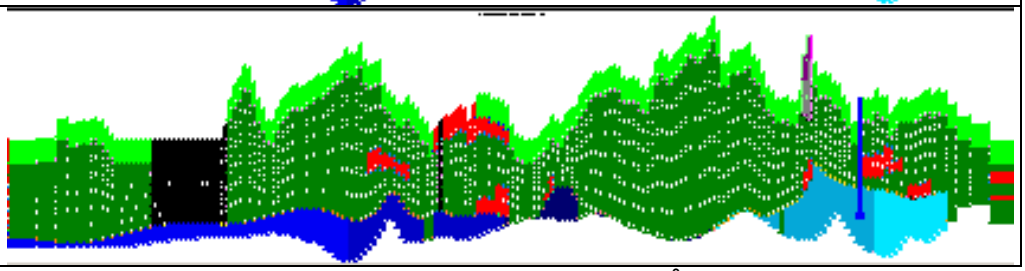
Figur 4 Parametre benyttet i parameterusikkerhedsvurderingen og tilhørende objektfunktion.

Oplandsberegningen foretages herefter på samtlige modeller for både IO og det GO. Der benyttes et stort antal partikler for hver boring for at kunne behandle partikelbane-beregningerne statistisk. Der er udført baglæns partikelbaneberegninger i programmet MODPATH.

Afslutningsvis foretages en statistisk behandling af resultaterne fra partikelbane-beregningerne på modelcelleniveau. Denne databehandling danner grundlag for de afgrænsninger som model- og parameterusikkerheden bidrager med.

4.2.3 De 5 hydrostratigrafiske modeller

De 5 forskellige hydrostratigrafiske modeller adskiller sig fra hinanden ved, at der er udarbejdet forskellige zoneringer i de enkelte modeller (Fig. 5).

Model	Eksempel (modelkolonne 40)
Refe-rence	
M30	
M40	
M60	
M80	

Figur 5 Tværsnit over de enkelte geologiske modeller. Snit på langs gennem modellen. Grøn: Ler. Rød og blå: Sand

Hver model benytter forskellig geofysikskæringsmodstand for sand / ler i de respektive lag. I områder uden for det geofysiske kortlægningsområde benyttes en skæringsværdi af lerfraktionen i de respektive lag (fundet fra JUPTER og GERDA data).

For hvert modellag beregnes andelen af ler i lag fra data, som skærer laget. Disse punktværdier er herefter interpoleret til at dække hele modelområdet, og i centrum af hver modelcelle for hvert modellag er der herefter fundet en værdi for andelen af ler.

Man kan herefter fastlægge nogle skæringsværdier for ler/sand for hhv. det geofysiske datasæt samt lerfraktionen fra boringsdata, og herved opnås markant forskellige hydrostratigrafiske modeller.

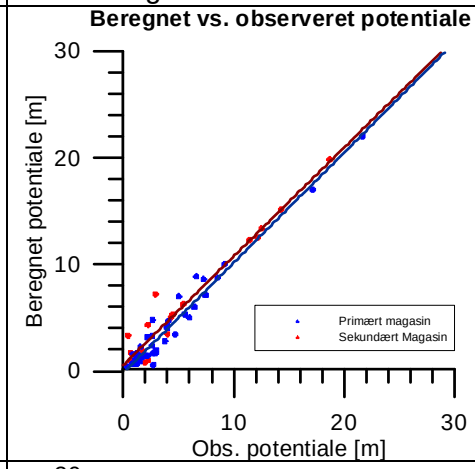
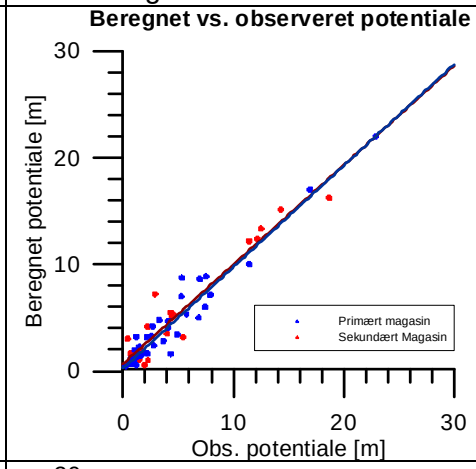
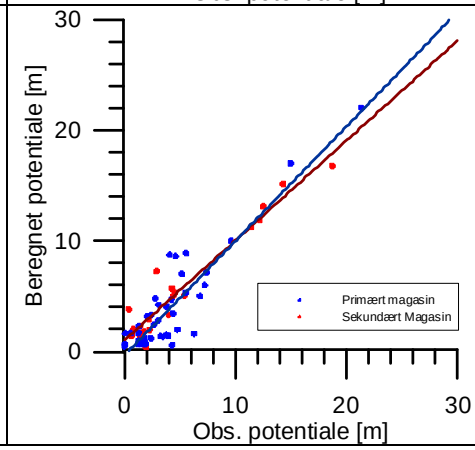
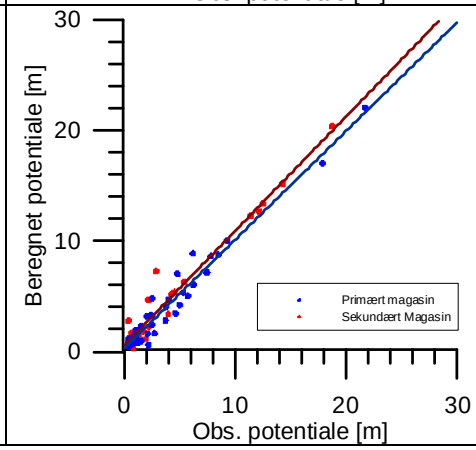
Modellerne inkluderer naturligvis ikke alle mulige hydrostratigrafiske modeller, men afspejler en variation i lerandelen mellem de enkelte modeller, og giver et godt og realistisk spænd på nogle mulige modeller. Der vil således være flere mulige hydrostratigrafiske modeller som ikke er testet i nærværende undersøgelse som kan give anledning til en endnu større spredning omkring usikkerheden på det beregnede IO og GO

Modellerne navngives (M30, M40, M60 og M80). Model 30 benytter en skæringsmodstand på 30 ohmm mellem ler og sand. På tilsvarende vis er der i området uden for det geofysiske kortlægningsområde benyttet en lithologisk skæring baseret på andelen af ler i lithologien for boringer, som skærer de enkelte modellag. M30 udgør en meget sandet model med gennemgående sandvinduer til det primære magasin. Lerandelen er voksende i modellerne M40 - M80, og model M80 indeholder kun få lokale sandvinduer. Modellerne er herved markant forskellige, og lokalt kan der være store variationer i strømningen, på trods af at alle modeller er kalibreret tilfredsstillende.

Referencemodellen udgør den kalibrerede model med en geologisk tolket zonering. Denne model har mange ligheder med model M60. Hver model er herefter kalibreret inverst. Alle modellerne kunne kalibreres, således at de opfylder de opstillede kalibreringskriterier. Referencemodellen er stadig den bedst kalibrerede model.

Tabel 6 Kalibrerede parameterværdier (horisontalt - vertikalt)

Model	K1 [m/s] (sand i primære magasin)	K12 [m/s] Ler i moræne	K13 [m/s] Sandområder i moræne
Ref	$2.28\ 10^{-5}$ $2.25\ 10^{-5}$	$1.67\ 10^{-6}$ $6.05\ 10^{-9}$	$2.59\ 10^{-5}$ $1.23\ 10^{-7}$
M_30	$1.40\ 10^{-4}$	$2.00\ 10^{-6}$ $5.53\ 10^{-9}$	$2.99\ 10^{-5}$ $2.25\ 10^{-5}$
M_40	$5.57\ 10^{-5}$	$1.65\ 10^{-6}$ $5.33\ 10^{-9}$	$4.30\ 10^{-5}$ $8.13\ 10^{-5}$
M_60	$2.18\ 10^{-5}$	$2.60\ 10^{-6}$ $5.36\ 10^{-9}$	$1.75\ 10^{-6}$ $8.88\ 10^{-5}$
M_80	$2.54\ 10^{-5}$	$1.67\ 10^{-6}$ $6.40\ 10^{-9}$	$2.58\ 10^{-5}$ $8.32\ 10^{-5}$

Model	Kalibrering	Model	Kalibrering
Reference model. Obj. funk: 85		M30 Obj. funk: 125	
M40 Obj. funk: 116		M80 Obj. funk: 100	

Figur 6 Scatter-plot over det obs. potentiale mod det beregnede pot. for alle 4 modeller.

4.3 Resultater

Nu følger en gennemgang af de beregningseksempler som er udført på de 4 kildepladser ved henholdsvis Nordborg, Broballe, Stevning og Danfoss A/S. Der er beregnet IO og GO for de 5 alternative modeller samt for det stokastiske opland som svarer til parameterusikkerheden. Indledningsvis beskrives de 2 usikkerhedsmatricer tilhørende de 4 kildepladser, der kort gennemgår datagrundlaget og de usikkerheder der må forventes at være i de 2 områder (jf. afsnit 4.3.1).

Alle oplande er samlet vurderet i forhold til henholdsvis et fælles- og foreningsmængde-opland. For oplandberegningerne til Nordborg kildeplads er der givet et eksempel på, hvordan man kan beregne og tematisere intensiteten på grundvandsdannelsen inden for det GO (jf. Fig. 7).

4.3.1 Dataindsamling og usikkerhedsmatricer for de 4 kildepladser

Dataindsamlingen til den hydrostratigrafiske- og den numeriske model er sket over flere etaper og dette giver i sig selv nogen usikkerhed, da integration af ældre og nyere tolkninger kan konflikte med hinanden.

I forbindelse med seneste modelopdatering i nærværende projekt har der været fokus på at opdatere den hydrogeologiske model for den nordlige del af Als ved, at indarbejde de nyere geofysiske data. Herved antages det, at den hydrogeologiske

usikkerhed for kortlægningsområdet reduceres betydeligt, hvilket bør give større præcision på de beregnede IO og GO.

Kalibrering af modellen foretages på eksisterende data fra en tidligere modelopstilling. Der er ikke således ikke foretaget ændringer af kalibreringsmålene, og de seneste mål fra Geo-Vejledning 7 er benyttet. Eventuelle pejlinger foretaget efter at den oprindelige model er opstillet er således ikke medtaget i nærværende kalibreringer.

Usikkerhedsmatricen:
Usikkerhedsmatriven er helt overordnet opdelt i tre hovedpunkter; Data, model og scenarier.
Analysen af de enkelte usikkerheder foretages i usikkerhedsmatricen på punktform under hvert emne som fx geologi, potentiale, afstrømning mv. Her vurderes dækningsgrad, vægt, effekt, reducerbarhed og kvantificerbarhed for hvert punkt. Under hvert punkt/emne er der mulighed for at kommentere på evt. tiltag der kan forbedre modellen og oplandsbegningerne.

Usikkerhedsmatricen's formål er dels at kunne bruges som hjælpefunktion til fremtidig modelforbedringer´, samt som guide til de usikkerhedsvurderinger der kan kvantificeres i de modelscenarier, der opstilles.

I tabel 7 og 8 er usikkerhedsmatricen vist for hhv. område 1 Broballe & Danfoss og område 2 Stevning & Nordborg.

Tabel 7 Usikkerhedsmatrice for område 1.

Kildeplads: Område 1 (Broballe, Danfoss og Nordborg kildeplads)			Usik.grad/ dækning	vægt	effekt	Redu-cerbar	Kvanti-ficerbar	Tiltag
Kilde til usikkerhed								
Data	Geologi	Øvre	*middel*	*stor*	*stor*	*nej*	nej	
		Mellem	*middel*	*stor*	*stor*	*Ja/nej*	nej	TEM
		Nedre	*Stor*	*middel*	*middel*	*ja*	nej	TEM
	Geologi	Hetero-genitet	*Stor*	*stor*	*stor*	*ja*	nej	PACES
	Potentiale		*lille*	*stor*	*stor*	*nej*	ja	ok
	Afstrømning		*lille*	*middel*	*middel*	*ja*	ja	nye Q-målinger
	Hydrauliske Værdi(K, T)		*middel*	*stor*	*stor*	*nej*	ja	ok
Model	Inputdata	Grundvands dannelse	*middel*	*stor*	*stor*	nej	nej	ingen
	Konceptuel model	Geologi	*middel*	*stor*	*stor*	ja	nej	nej
		Diskreti-sering	*middel*	*middel*	*middel*	nej	ja	nej
		Rand	*middel*	*lille*	*lille*	nej	nej	nej
	Kode		*lille*	*lille*	*lille*	nej	nej	nej
Scenarier	Fremtidige forhold							
		Indvindings-behov	*middel*	*stor*	*stor*	ja	ja	nej
		Klima	*stor*	*middel*	*middel*	ja	nej	Klima-scenarie

Tabel 8 Usikkerhedsmatrice for Område 2

Område 2: (Stevning vandværk) Kilde til usikkerhed			Usik.grad/ dækning	vægt	effekt	Redu-cerbar	Kvanti-ficerbar	Tiltag
Data	Geologi	Øvre	*stor*	*stor*	*stor*	*ja*	nej	ja
		Mellem	*middel*	*stor*	*stor*	*nej*	nej	ok
		Nedre	*middel*	*middel*	*middel*	*nej*	nej	ok
	Geologi	Heterogenitet	*stor*	*stor*	*stor*	*ja*	nej	ja
	Potentiale		*stor*	*stor*	*stor*	*ja*	ja	ja
	Afstrøm-ning		*lille*	*middel*	*middel*	*ja*	ja	Ja
	Hydrauliske Værdi(K, T)		*middel*	*stor*	*stor*	*nej*	ja	ok
Model	Inputdata	Grundvandsdannelse	*middel*	*stor*	*stor*	nej	nej	nej
	Konceptuel model	Geologi	*middel*	*stor*	*stor*	ja	nej	nej
		Diskretisering	*middel*	*middel*	*middel*	nej	ja	nej
		Rand	*middel*	*lille*	*lille*	nej	nej	nej
	Kode		*lille*	*lille*	*lille*	nej	nej	nej
Scenarier	Fremtidige forhold							
		Indvindings-behov	*middel*	*stor*	*stor*	ja	ja	nej
		Klima	*Stor*	*middel*	*middel*	ja	nej	ja

Nordborg kildeplads
For Kildepladsen ved Nordborg er der ikke udført TEM-målinger i indvindingsoplandet, og den geologiske model er overvejende bygget op omkring boringsoplysninger samt de MEP-sonderinger, som er udført i og omkring oplandet. Derfor er den nedre geologi behæftet med stor usikkerhed. Men da indvindingsboringerne ikke er filtersat i stor dybde (29-34 m.u.t.), har den nedre geologi mindre betydning for oplandenes form og udbredelse.

Den overfladenære geologi er kortlagt med linieprofiler af MEP og dækningen er rimelig god. Dog vil de overfladenære lag være bedre beskrevet, hvis der var udført

PACES i og omkring IO og GO. Potentialeforholdene er rimelig godt beskrevet ud fra en nyere synkronpejlerunde, der omfatter en del lokale pejleboringer i IO. (jf. tabel 8 for Nordborg kildeplads).

Danfoss A/S
Danfoss kildeplads A/S er delvist kortlagt med TEM-sonderinger svarende til ca. 50 % af IO. Derfor bygger den geologiske model dels på TEM-målinger i den syd-østlige del af IO og af boringer i området inde omring kildepladsen. Der er ikke udført overfladenært geofysik i IO, så beskrivelsen af den øvre geologi bygger på boringer, og den overfladenære geologi er således meget usikkert beskrevet. Da filterniveauerne for indvindingsboringerne ligger mellem 34-66 m.u.t., er både de overfladenære og den dybereliggende geologi betydende i forhold til beregning af både IO og GO. Derfor vil det være oplagt, at der både blev udført en række supplerende TEM sonderinger, samt PACES i IO for at belyse ovennævnte geologiske forhold. Potentialeforholdene er godt beskrevne, og der foreligger en del pejleboringer i IO (jf. tabel 7 for Danfoss A/S kildeplads).

Broballe
Broballe kildeplads som indvinder i filtre fra 39-45 m.u.t. er ikke kortlagt med TEM, men ca. 2/3-dele af oplandet er kortlagt med MEP, og derfor er der en rimelig god dækning omkring den overfladenære geologi. Omvendt mangler der informationer omkring den dybereliggende geologi, men da indvindingen foregår i den øvre del af magasinet er viden om de dybereliggende geologiske lag af mindre betydning i forhold til beregning af IO og GO.

Potentialeforholdene er meget dårligt beskrevet i området omkring IO, og der findes generelt ganske få pejlinger i området (2-3 stk.). Dette skal sammenholdes med at grundvandspotentialet er meget fladt i områder, hvilket i sig selv giver anledning til stor usikkerhed på hvor vandet stammer fra. Det vil derfor være ønskeligt med flere pejleboringer i området omkring for bedre at belyse de lokale potentialeforhold omkring IO (jf. tabel 7 for Broballe kildeplads).

Stevning
Stevning VV. Indvinder fra 2 boringer fra 75-80 m.u.t. IO er kortlagt med TEM, og derfor er der en god viden omkring de geologiske forhold i de dybereliggende lag, hvor der også indvindes fra. Omvendt er der hverken kortlagt med MEP eller PACES, og derfor bygger den geologiske viden for de øvre lag overvejende på boringsoplysninger. Det vil derfor være ønskeligt med fx. PACES inden for IO.

Potentialeforholdene er lige som ved Broballe meget dårligt beskrevet i hele IO, og der findes kun ganske få pejleboringer i området (3-4 stk.). Samtidig er grundvandspotentialet her også meget fladt, og derfor er der store usikkerheder forbundet med potentialeforholdene i området. Det vil derfor være ønskeligt med flere pejleboringer i området omkring IO. (jf. tabel 8 for Stevning kildeplads).

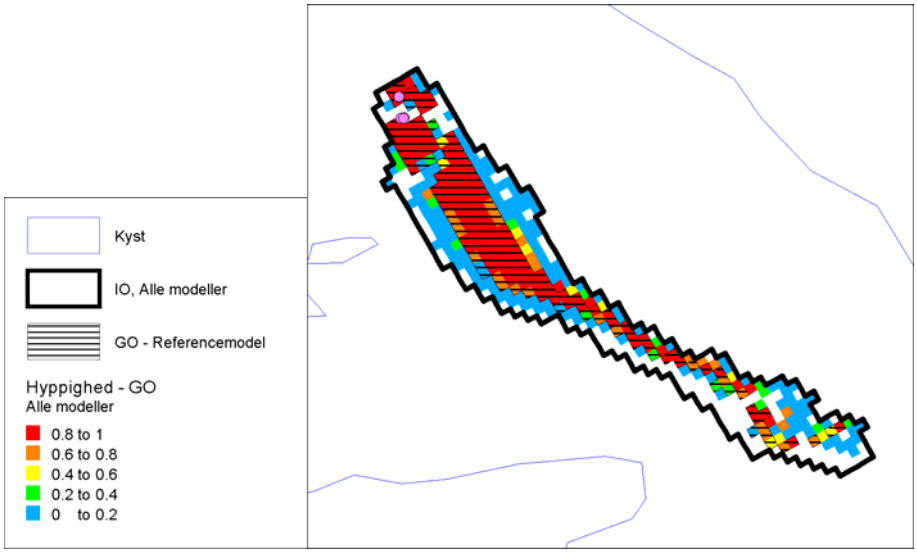
4.3.2 Scenarier for de 4 kildeplader (Nordborg, Broballe, Danfoss A/S og Stevning

Resultaterne af oplandene er vist for de 4 vandværker. For hvert vandværk er først vist oplandet baseret på usikkerhedsvurderingen fra modelparametrene sammenholdt med referenceoplandet for både IO og GO. Herefter er oplandsberegningerne på de hydrostratigrafisk varierende modeller vist for både IO og GO. Til sidst er alle scenarier sammenholdt og der er foretaget en afgrænsning af foreningsmængde- og fællesmængdeoplandet (jf. Kap. 3 for definition).

Opland 1: Nordborg kildeplads
Nordborg kildeplads består af 4 indvindingsboringer med DGU-nr.: 161.13B, 161.238, 161.239 og 161.181, som alle er filtersat fra 29-34 m.u.t. Den tilladte indvinding er på 350.000 m^3/år.

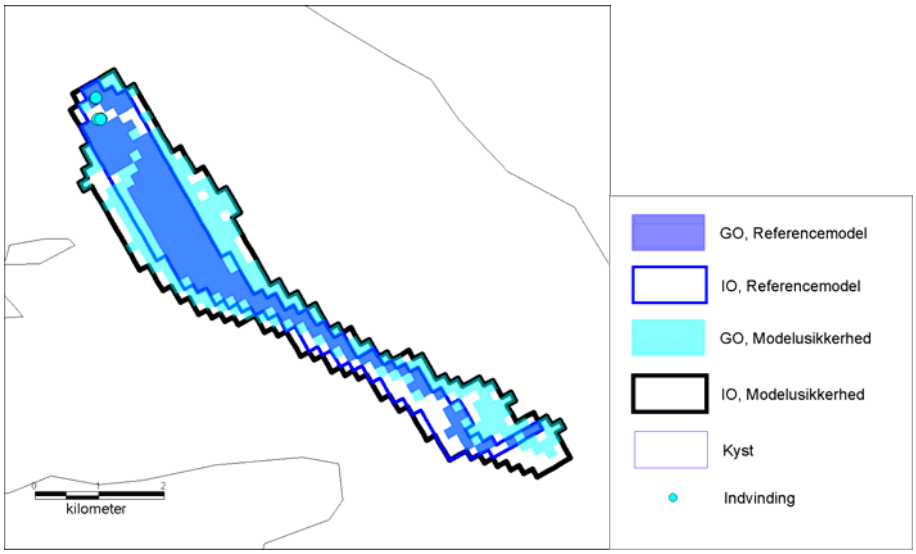
Oplandsberegningen kan behandles stokastisk. Fig. 7 viser sandsynligheden for grundvandsdannelse fra et givent områder ender i kildepladsens indvindingsboringer.. Fig. 7 svarer til det, man traditionelt betragter som det stokastiske GO opland til kildepladsen, hvor der i de røde områder (0,8 – 1) sker en grundvandsdannelse mellem 80 til 100 % af tilfældene inden for de 61 modeller.

Oplandet er beregnet vha. en optælling af, i hvor mange ud af de 61 kalibrerede modeller en modelcelle indgår som GO. Herved kan man se, at der er rimelig stor enighed i definition af det GO (røde celler), mens kun få modeller giver anledning til det brede GO (blå celler). Metoden giver ikke umiddelbart noget indikation af, hvor meget de enkelte områder bidrager med i forhold til grundvandsdannelsen til indvindingen.



Figur 7 Sandsynlighed for at grundvandsdannelse fra et givent område ender i kildepladsens indvindingsboringer.

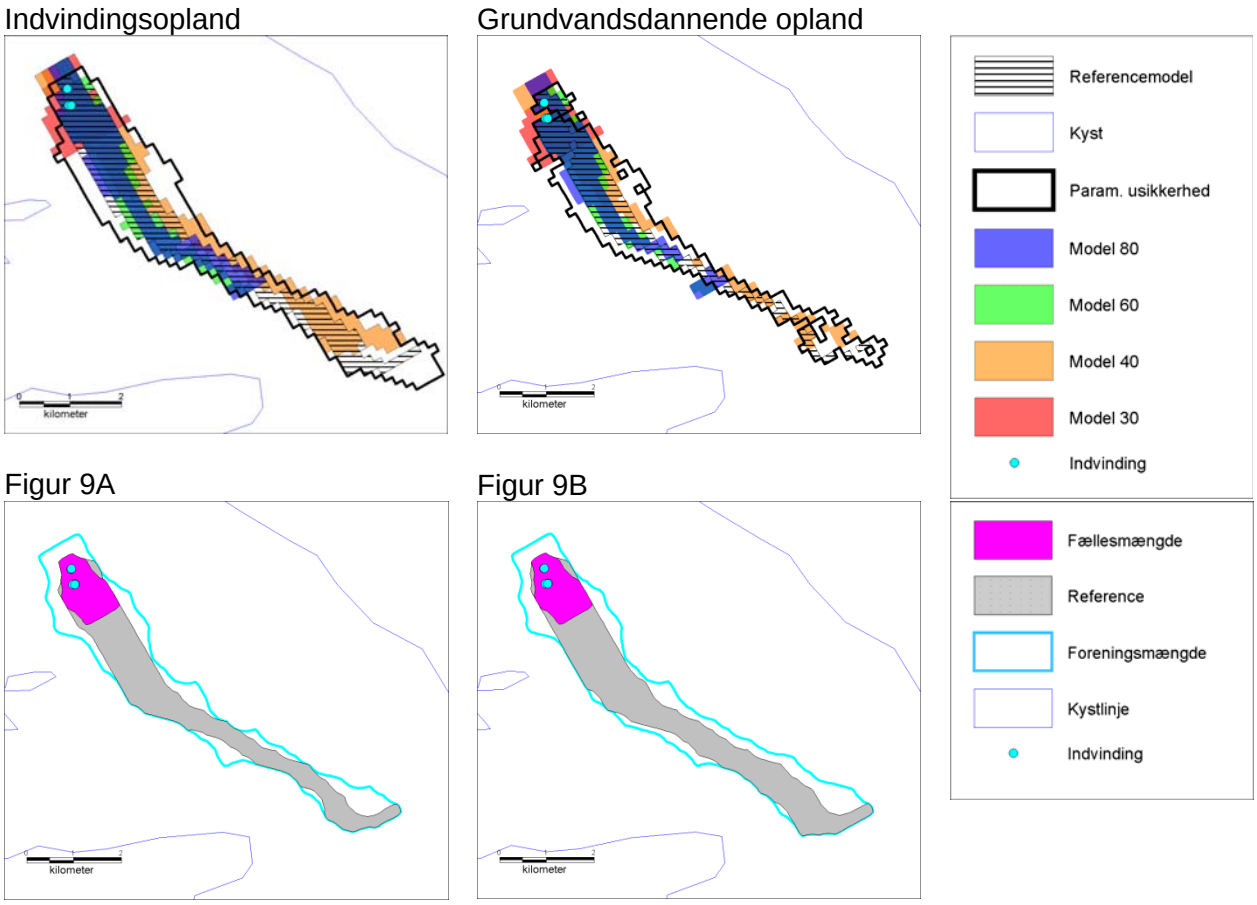
Fig. 8 viser afgrænsningen baseret på modellens parameterusikkerhed. Med mørkeblå linje er angivet referencemodellens IO, mens det GO opland er vist med mørkeblå udfyldning. IO til samtlige modeller, der indeholder parameterusikkerheden, også kaldet det stokastiske opland, er vist med den fede sorte linje. Dette opland er lidt bredere og arealmæssigt større end referencemodellens IO og GO tilsammen. Det GO opland for samtlige modeller (indeholdende parameterusikkerheden) er desuden bredere og når også længere ud i spidsen af oplandet sammenlignet med referenceoplandet for det GO. Referencemodellen udgøres af den kalibrerede model, mens modelparameter-usikkerheden er afgrænset og fundet på baggrund af de usikkerhedsanalyser, som er udført på de enkelte modelparametre.



Figur 8 Referencemodel for Nordborg kildeplads. IO og GO for referencemodel samt modelusikkerheder.

Fig. 9 viser oplandsberegningerne for de fire alternative modeller. Det fremgår, at M30 har et meget boringsnært opland, hvilket skyldes, at der ved boringerne i denne model optræder boringsnært et område med et større sandvindue. Dette sandvindue optræder ikke i de andre modeller, som har et opland, som udstrækker sig i en syd-østlig retning.

Der er generelt god overensstemmelse mellem oplandet for de hydrostratigrafiske modeller og afgrænsningen af området svarende til parameterusikkerheden. Dog er der en tendens til, at det boringsnære opland i referencemodellen ikke er stort nok.

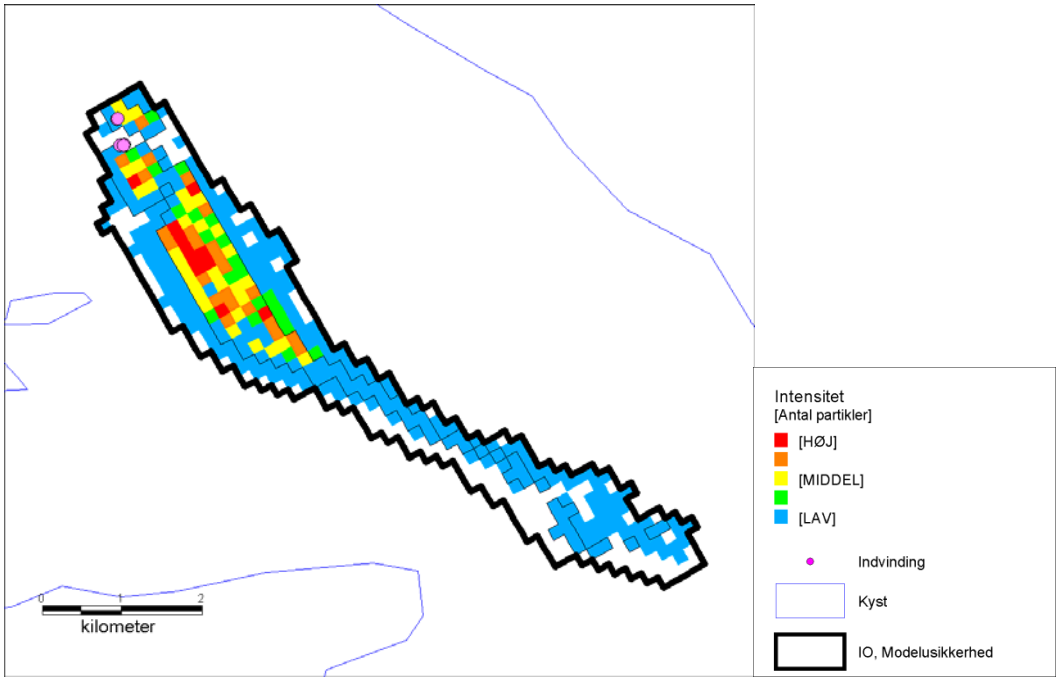


Figur 9 Indvindings- og grundvandsdannende opland. Øverst - Alternative modeller. Nederst - Fælles- og foreningsmængde af oplande

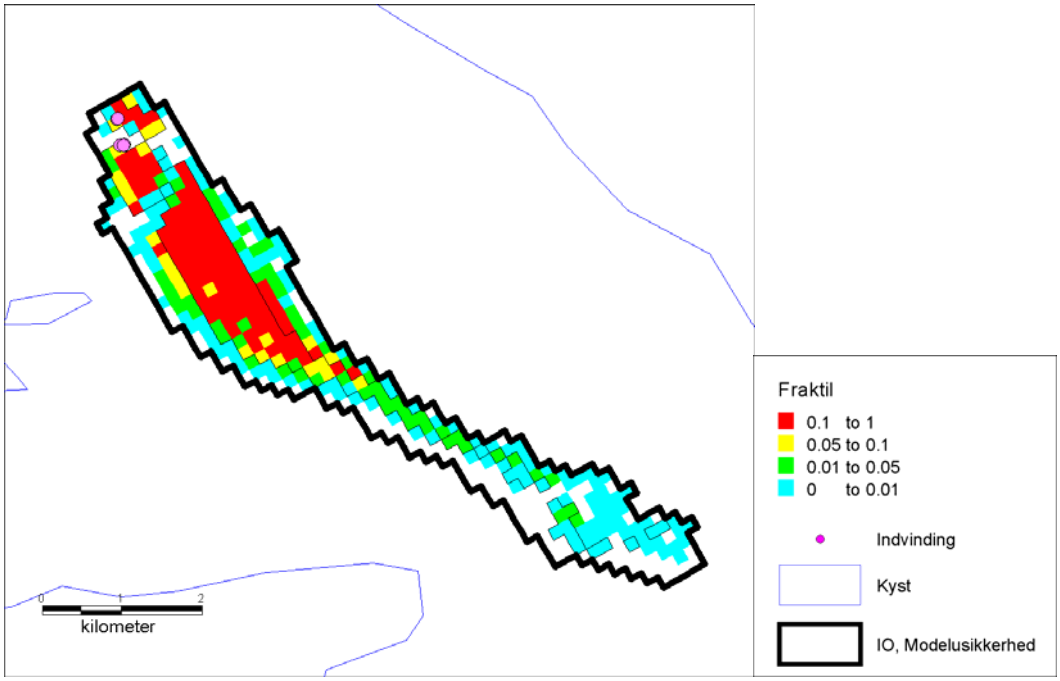
For at fremhæve betydningen af grundvandsdannelsen inden for hver af de enkelte modelceller inden for det grundvandsdannende område, kan man optælle antallet af partikler, som indgår i grundvandsdannelsen til indvindingsboringerne.

Fig. 10 viser en optælling af partikler på grundvandsspejlet (endepunktspartikler) på samtlige 61 modeller. Figuren viser tydeligt, at det betydende grundvandsdannende område ligger 1-3 km syd-øst for indvindingsboringerne, mens andelen af vand fra det boringsfjerne område angiveligt indgår som grundvandsdannende område i mange af modellerne, men ikke i væsentlig grad bidrager til indvindingen.

Sorteres modelceller med grundvandsdannelse-intensiteten, kan man udarbejde et fraktilkort over det grundvandsdannende opland. Fig. 11 viser et sådanne fraktilkort. Det røde område angiver det mindste areal, hvorfra 90 % af grundvandsdannelse foregår, og kombineres de røde og gule modelceller, opnår man 95 % af grundvandsdannelsen. Afgrænsningen kan herved prioriteres, afhængig af den sikkerhed man ønsker baseret på modelparameterusikkerheden. Denne beregning er kun udført for Nordborg kildeplads.



Figur 10 Grundvandsdannelsesintensitet - alle modeller. Figuren hvis i hvilke dele af indvindingsoplandet der er registreret flest 'endepunktspartikler' ved den opstrøms partikelbanesimulering svarende til mest "intensive grundvandsdannelse".

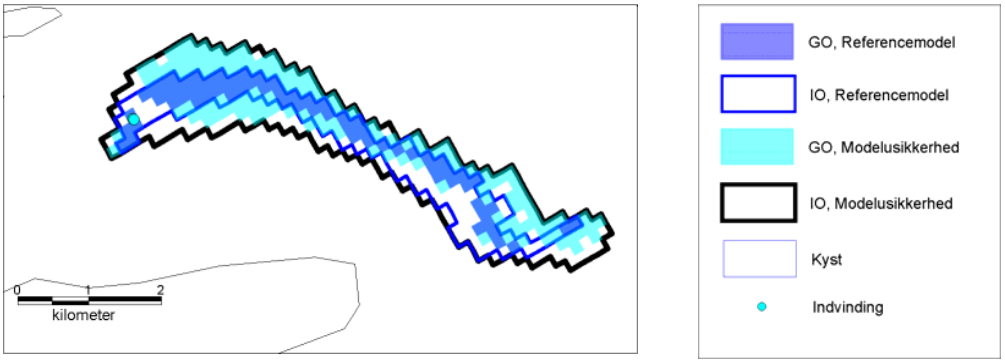


Figur 11 Fraktilplot af grundvandsdannelse - alle modeller. 90 % af grundvandsdannelsen finder sted indenfor det røde område.

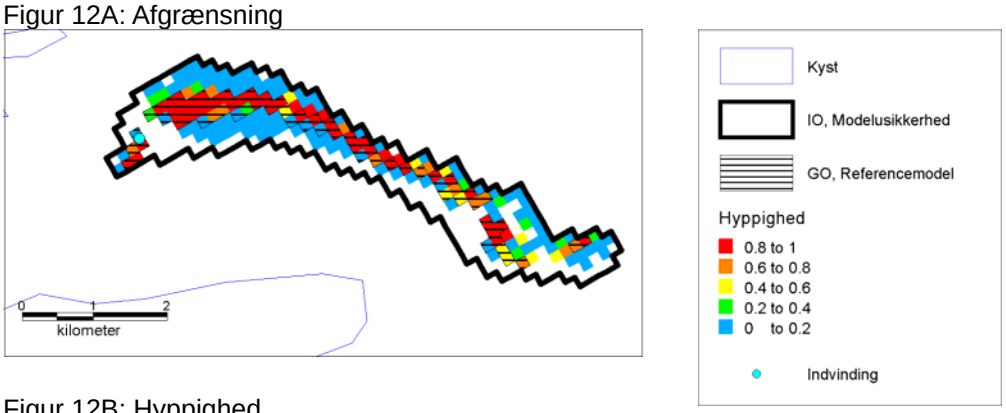
Opland 2: Broballe kildeplads

Broballe kildeplads består af 2 indvindingsboringer med DGU-nr.: 161.92 og 161.217. Boringerne er filtersat fra 39-45 m.u.t. Den tilladte indvinding er sat til 42.000 m3/år.

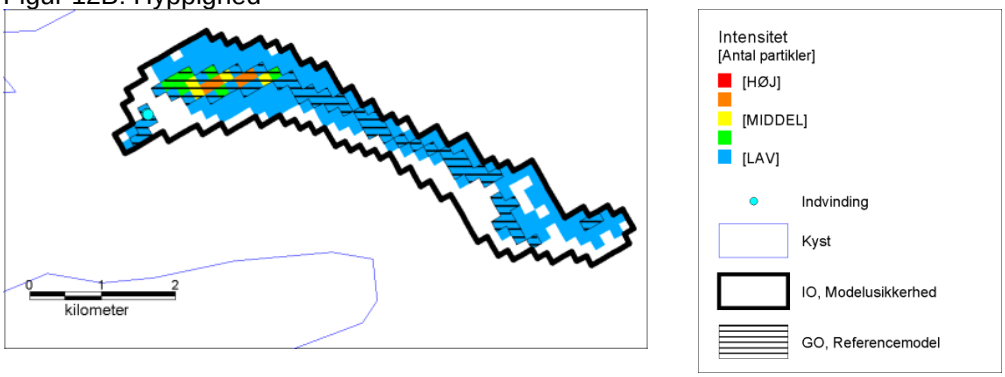
Indvindingsoplandet har en øst-syd-østlig retning (jf. Fig. 12A). På grund af den relativt beskedne indvinding beregnes der et smalt opland. Bestemmelsen af parameter usikkerheden (jf. Fig. 12 B) viser, at der er nogen usikkerhed i forhold til placeringen af det smalle opland og at både IO og GO for parameterusikkerheden (Modelusikkerheden) varierer noget fra referencemodellen for både IO og GO.



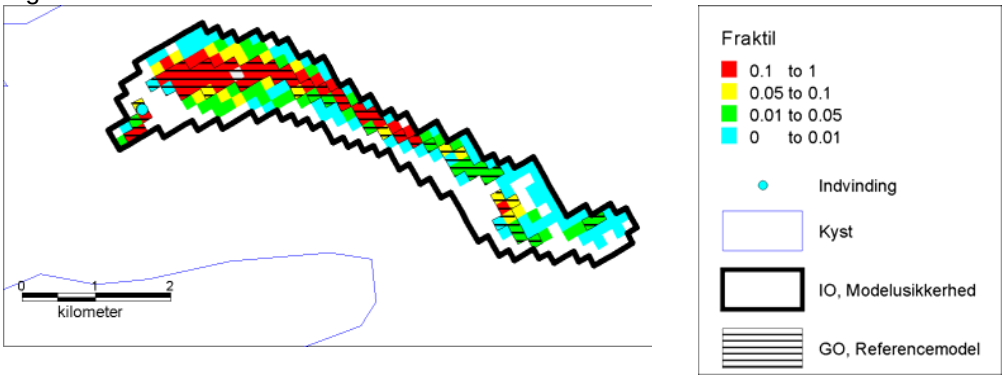
Figur 12A: Afgrænsning



Figur 12B: Hyppighed



Figur 12C: Intensitet



Figur 12D: Fraktil

Figur 12 Modelparameterusikkerhed for Broballe kildeplads.

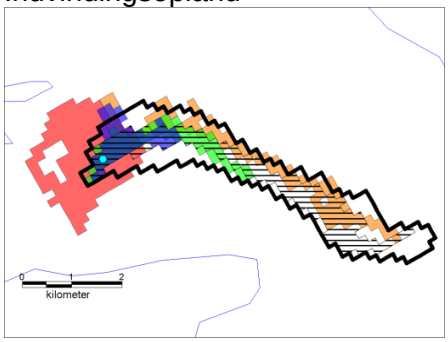
De fire alternative modeller giver noget anderledes oplande, sammenlignet med dem for parameterusikkerheden. I Model 30 opstår der et område med større sandvinduer vest for indvindingsboringen, og dette område med sand påvirker oplandet til boringen markant. Det fremgår af Fig. 13 at Model 30 har et opland, som når vest for indvindingsboringerne, mens de resterende modeller har et IO og GO, som ligger øst for indvindingsboringerne (Fig. 13A og Fig. 13B).

Grundvandsspejlet er i området meget fladt, og variationer kan forekomme. Der er derfor ikke grundlag for, at den afvigende model 30 ikke er valid for området. Man kan i dette tilfælde anbefale nogle supplerende undersøgelser, netop for at belyse om M30 i området kan være forkert. Det vurderes, at Model 30 i området er en sandsynlig model, og resultatet af oplandsberegningen benyttes til det videre arbejde.

Inddragelse af alternative hydrostratigrafiske tolkninger betyder således, at afgrænsningen af oplandet og dets areal bliver væsentlig større. *Foreningsmængde-oplandet* (jf. definition afsnit 3.3) bliver således større og inkluderer nu også et område vest for indvindingsboringerne.

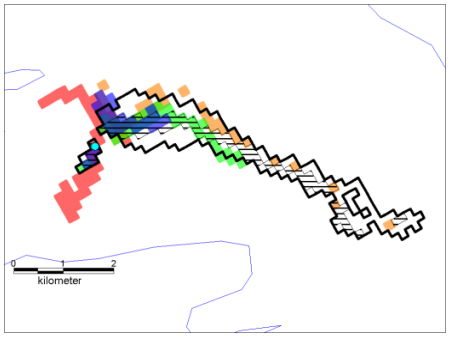
Oplandenes fællesmængde udgør et mindre område øst for indvindingsboringerne. Fællesmængden for det grundvandsdannende opland (Fig. 13C) inkluderer ikke hele området med 90 % grundvandsdannelse fra modellens parameterusikkerhed, hvilket er værd at bemærke (Fig. 13D).

Indvindingsopland

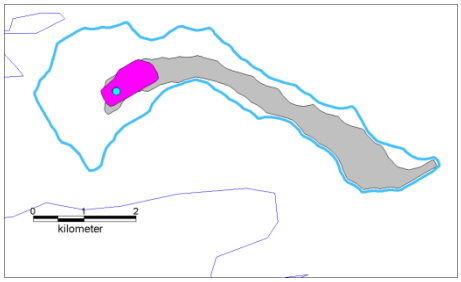


Figur 13A

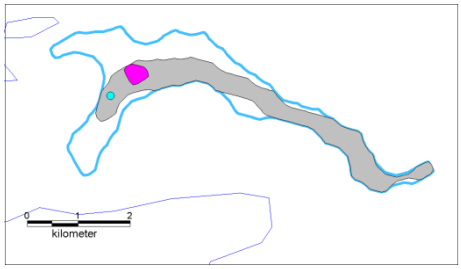
Grundvandsdannelse



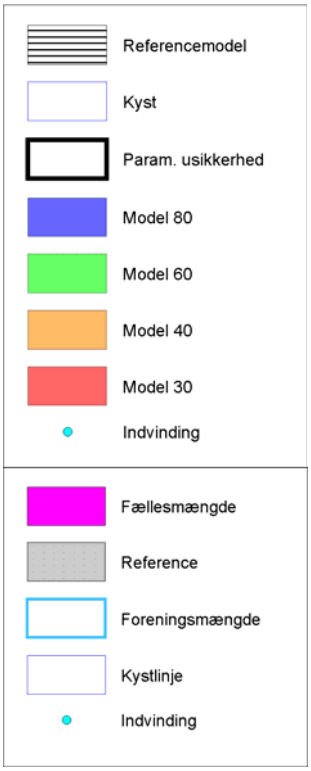
Figur 13B



Figur 13C



Figur 13D



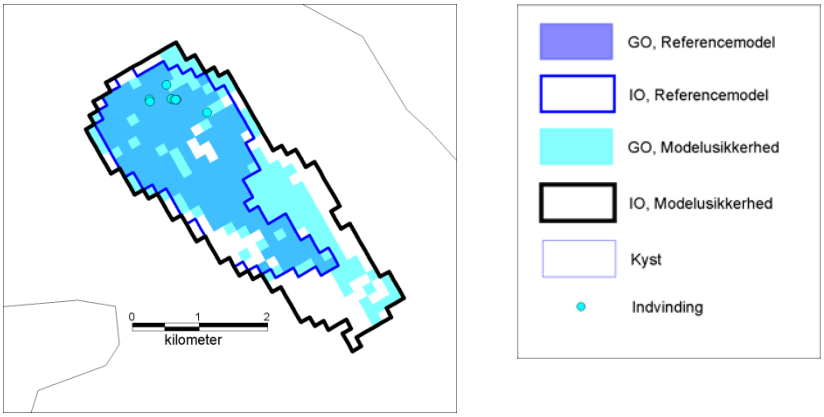
Figur 13 Indvindings- og grundvandsdannende opland. Øverst - Alternative modeller. Nederst - Fælles- og foreningsmængde af oplande

Opland 3: Danfoss A/S kildeplads ved Nordborg
Danfoss A/S kildeplads indvinder fra 5 indvindingsboringer med DGU-nr.: (162.142, 162.146, 162.44 som er filtersat fra 51-66 m.u.t.) og (162.45 og 162.23B er filtersat fra 34-41 m.u.t.). Den tilladte indvinding er sat til 200.000 m3/år.

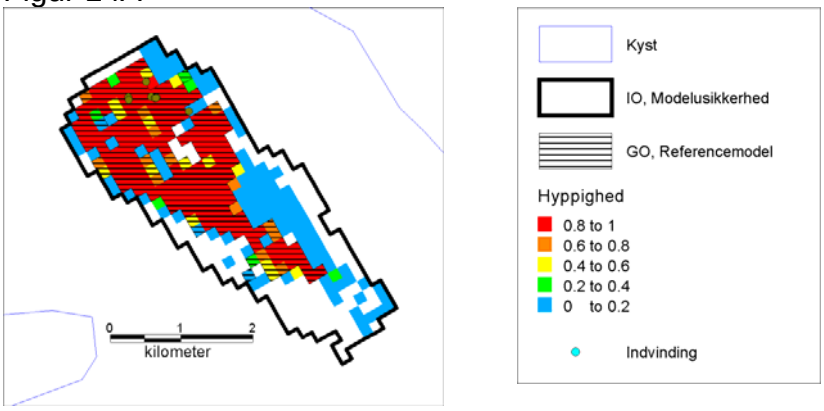
Indvindingen til dette opland ligger umiddelbart nord for området med kortlægning med geofysiske data, og den nordlige del af indvindingsoplandet er baseret på lithologisk variation i JUPITER data, mens den sydlige del af oplandet er i et område, hvor modellens zonering er baseret på TEM-data.

Sammenligner man hyppigheden af oplandsberegningerne baseret på modelparameterusikkerheden med referencemodellens GO, ser man, at der er stor overensstemmelse (Mørkeblåt område i Fig. 14A og rødt område i Fig. 14B), dog viser B, at der er nogle få modeller med et GO, som ligger uden for referencemodellens IO.

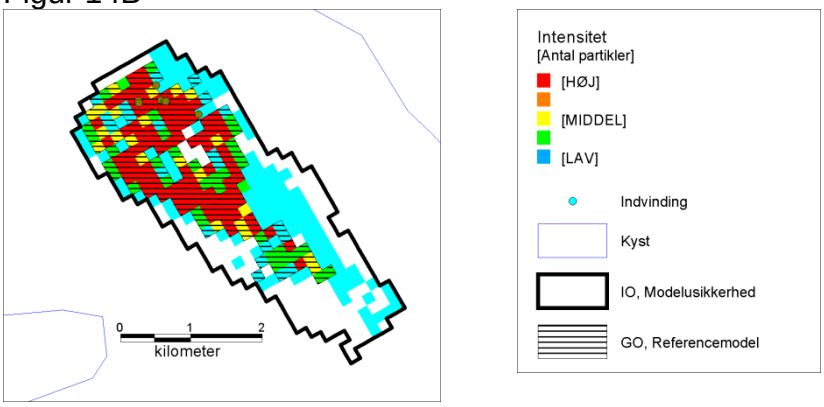
Der er god overensstemmelse mellem intensiteten af grundvandsdannelsen (Fig. 14C) og området med stor grundvandsdannelseshyppighed (Fig. 14D). Fraktilplottet tyder på, at grundvandsdannelsen til indvindingsboringerne sker i et mindre områder inden for referencemodellens GO.



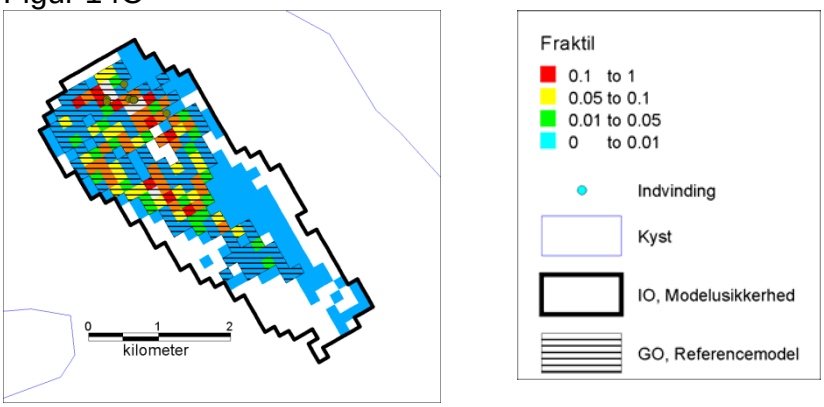
Figur 14A



Figur 14B



Figur 14C



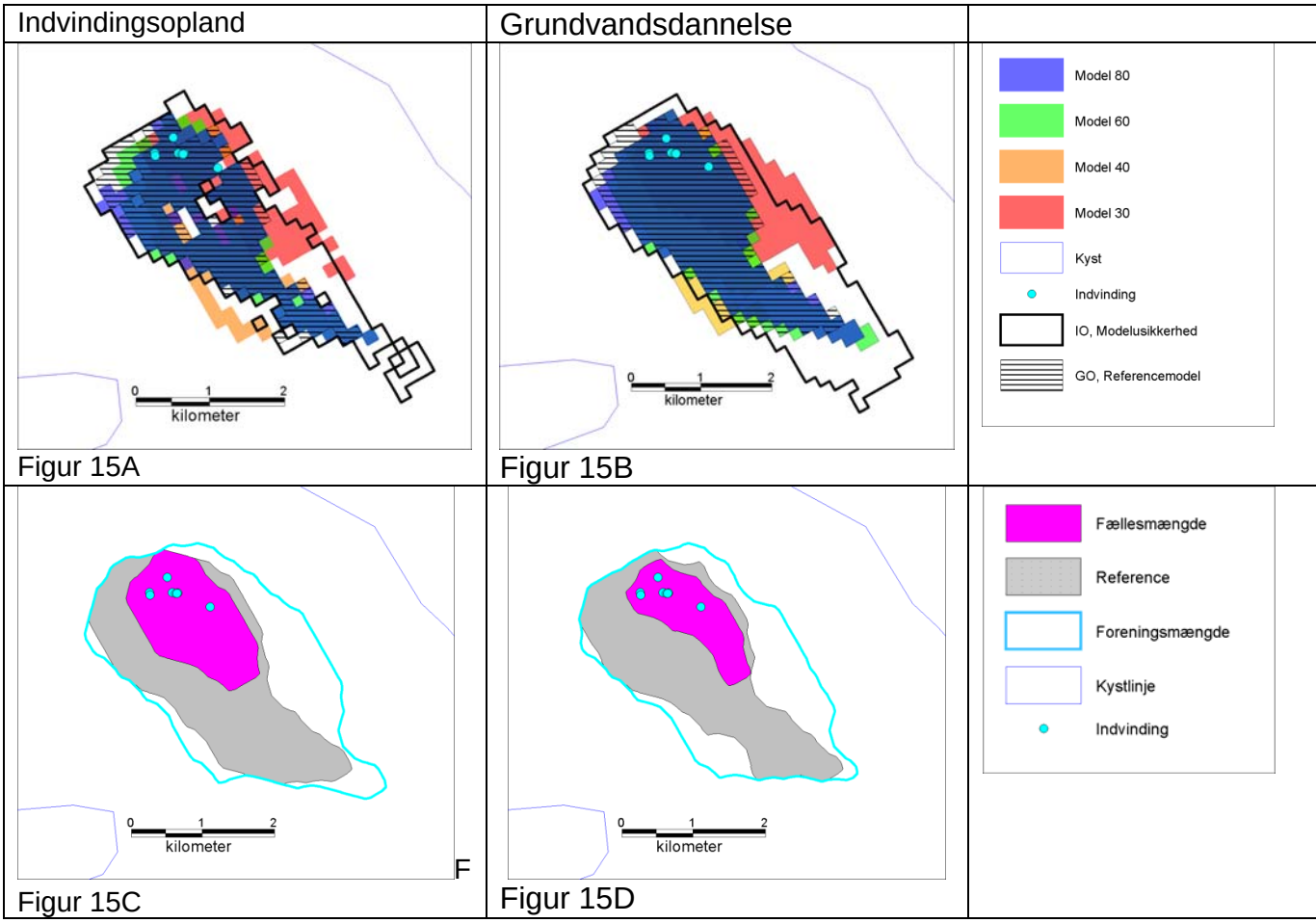
Figur 14D

Figur 14 Parameterusikkerheder og referencemodel for Nordborg kildeplads.

De fire alternative geologiske modeller viser, at der for Model 60 og Model 80 er god overensstemmelse mellem referencemodellens IO og GO og oplandene for de enkelte modeller (Fig. 15A og Fig. 15B). Model 40 har et mindre GO syd for referencemodellen, og Model 30 har et opland, som ligger nord for referencemodellen.

Foreningsmængden (Fig. 15C og 15D) for oplandene inkluderer herved områder, som ikke er med i oplandet for modelparameterusikkerheden. Dette gælder forenings-mængden for både IO og GO.

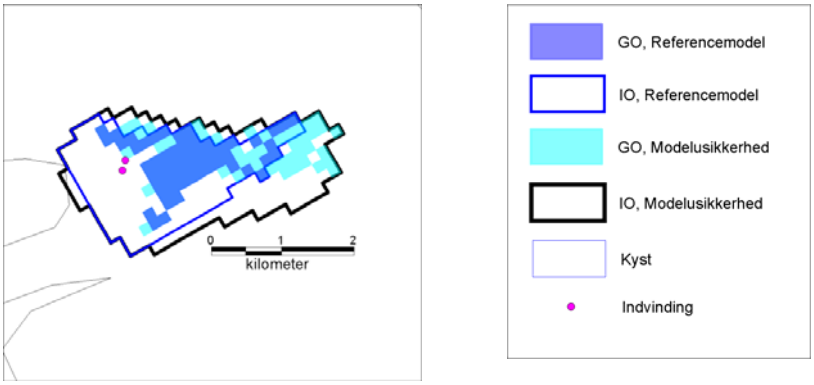
Fællesmængden (Fig. 15D) er et boringsnært område, som også repræsenterer det grundvandsdannende opland med stor intensitet (C), men afgrænsningen inkluderer ikke helt området med stor intensitet for referencemodellen. Dette eksempel illustrerer tydeligt at det her ikke er tilstrækkeligt at beregne det GO og vurdere usikkerheden alene ud fra modelparameterusikkerheden men at det også er nødvendigt at inddrage usikkerheden på den hydrostratigrafiske model.



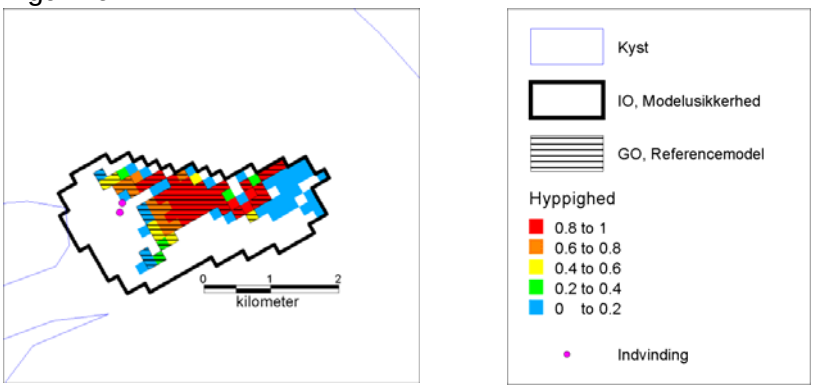
Figur 15 Indvindings- og grundvandsdannende opland. Øverst - Alternative modeller. Nederst - Fælles- og foreningsmængde af oplande

Opland 4: Stevning kildeplads

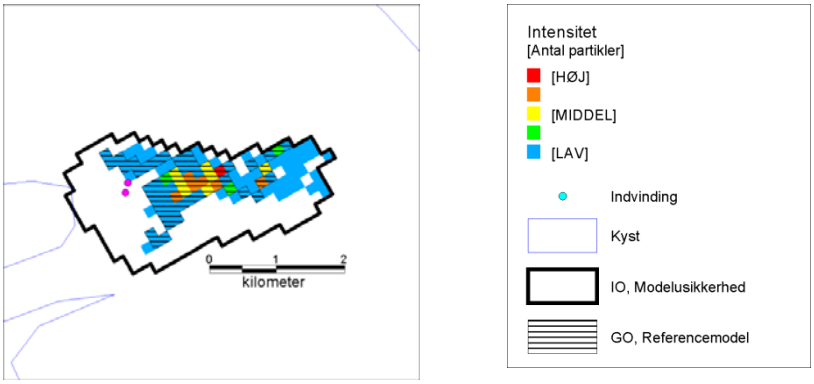
Stevning kildeplads består af 2 indvindingsboringer med DGU-nr. 162.147 og 162. 282 og er filtersat fra 75-80 m.u.t. Den tilladte indvinding er sat til 70.000 m3/år. Fig. 16A
viser IO og GO for referencemodellen med afgrænsning af oplandene baseret på modelparameterusikkerheden. Det GO ligger i den nordlige del af IO. Hyppigheden af det GO viser, at der er god overensstemmelse mellem referencemodellens GO og området med en hyppighed over 20 % (Fig. 16B).
Det GO med stor partikeltæthed (Fig. 16C) er da også inden for referencemodellens, og dette ses også i fraktilplottet (jf. Fig. 16D). .



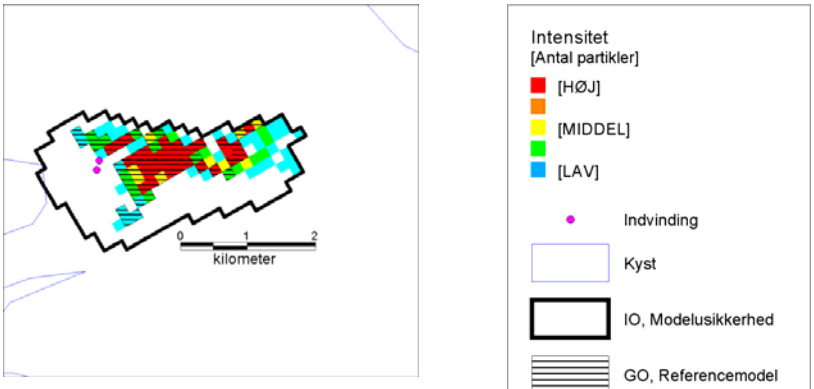
Figur 16A



Figur 16B



Figur 16C



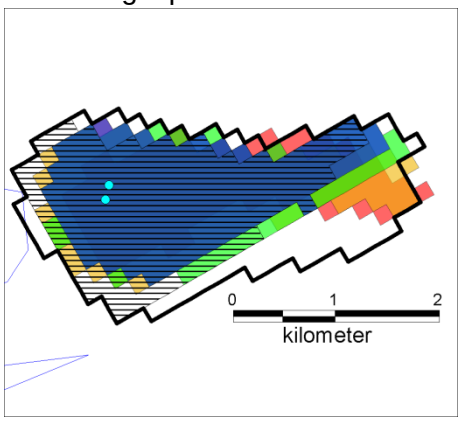
Figur 16D

Figur 16 Parameterusikkerhed på Referencemodel for Stevning kildeplads.

Fig. 17A og Fig. 17B viser afgrænsningen af IO og GO baseret på referencemodellen og de fire alternative hydrostratigrafiske modeller. Der er for dette vandværk god overensstemmelse mellem modellens parameterusikkerhed og de alternative

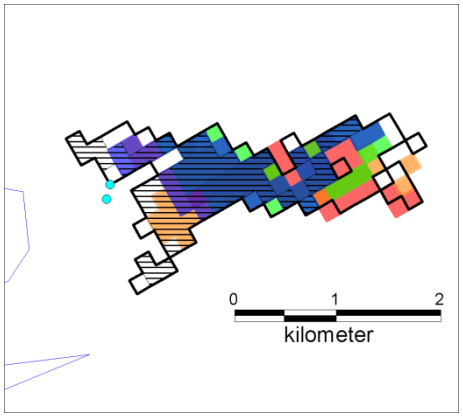
modeller. Desuden er der god overensstemmelse med fællesmængden for det GO (Fig. 17C) og 90 % fraktilen for oplandet (Fig. 17D).

Indvindingsopland

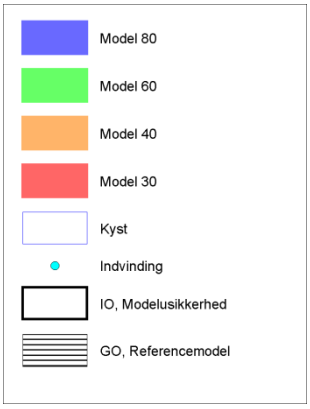


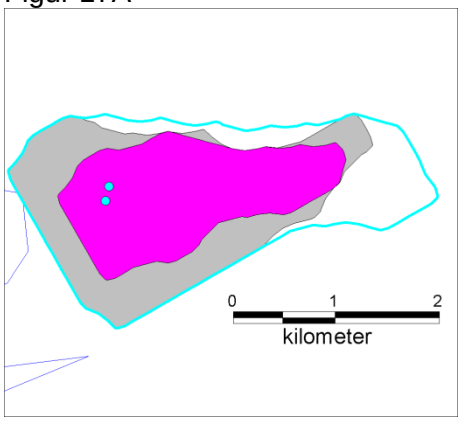
Figur 17A

Grundvandsdannelse

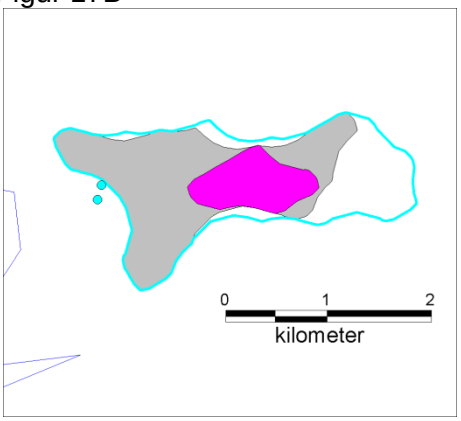


Figur 17B

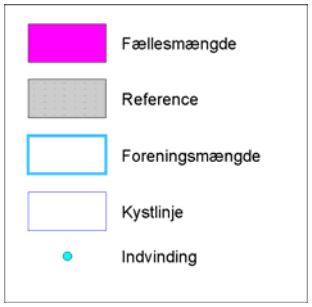




Figur 17C



Figur 17D



Figur 17 Indvindings- og grundvandsdannende opland. Øverst - Alternative modeller. Nederst - Fælles- og foreningsmængde af oplande

4.4 Dokumentation af oplande

IO og GO udarbejdes oftest i GIS, hvor rådgiver afslutningsvis i modelforløbet afleverer GIS-polygoner for henholdsvis IO og GO.

Ud over at rådgiver leverer GIS-polygoner er det vigtigt, at der tilknyttes relevante metadata i en GIS-tabel, som knyttes til de enkelte GIS-polygoner.

Formålet med GIS- tabellerne er at give mulighed for under sagsbehandlingen at få et hurtigt overblik over grundlaget for oplandsberegningen, og en eventuel subjektiv usikkerhedsvurdering. Sagsbehandleren skal således ud fra metadata-tabellen hurtigt kunne vurdere, om oplandet er beregnet på et tilstrækkeligt godt grundlag i forhold til den konkrete sag, som oplandets afgrænsning skal indgå i.

Hvis der derimod ikke foreligger en tilstrækkelig dokumentation omkring, hvordan de enkelte IO og GO er beregnet (metode, datagrundlag, indvindingsmængde etc.) kan det give anledning til misopfattelse om oplandets pålidelighed og anvendelighed. Endelig kan det også være, at der foreligger en alt for detaljeret dokumentation, som kan virke uoverskuelig og derfor ikke er anvendelig for den enkelte sagsbehandler. Derfor er det vigtigt med en let og overskuelig GIS-tabel med metadata, der indeholder de relevante i forhold til IO og GO.

Det anbefales derfor, at der i forbindelse med et modelprojekt tilknyttes standard metadata til GIS-tabellerne med oplande for både IO og GO. GIS-tabellerne følger med og ses som en opsummering af den tidligere udførte usikkerhedsmatrice (jf. skabelon til GIS-tabel med tilhørende metadata udfyldt for Nordborg Kildeplads, se tabel 9).

Tabel 9 Tabel over GIS-metadata for IO og GO med Nordborg kildeplads som eksempel.

Tabelnavn	Eksempel	Beskrivelse
Anlægsnavn / Vandværk	Nordborg Vandværk	Navn på anlæg/kildeplads
PLANTID / Anlægsnummer	777-81-0002-00	PLANTID fra JUPITER eller Anlægsnummer fra GEO-GIS eller anden database eller
Sagsansvarlig/Bruger/Initialer	THW / CHI	Hvem har viden omkring oplandet
DGU-nr	161.13B, 161.238, 161.239 og 161.181	Her angives alle boringer med tilhørende DGU-nr., som indgår i oplandsberegningen
Oplandstype	GO - reference	Området beskriver, om der er tale om et referenceopland, ydre afgrænsning
Modelgrundlag	Als_2010 model	Datagrundlag: Hvilken model er benyttet til beregning af oplandene. Det kan også være, at der er benyttet håndtegnede oplande (reference eller potentialekort), eller AEM
Modeldatabase	link / URL adresse	Link til GEUS modeldatabase, hvis modellen ligger i databasen

Model_reference	Als kortlægning, Alectia, 2010	Her beskrives en reference til undersøgelsen, hvor oplandet er udarbejdet. Kan også være et link til GEUS rapport database.
Model_tid	Stationær	Dynamisk / stationær model. Ved en dynamisk model kan man specificere den tidslige diskretisering
Model_rum	100 m	Rumlig diskretisering for oplandet. Ved variable diskretisering kan man eksempelvis angive 50-200 m
Model_stokastisk	64 modeller, 8 parametre, Monte Carlo	Her kan man angive, om der er medtaget parameterusikkerhed på baggrund af modellen.
Model_Alt_modeller	4 modeller	Indgår alternative hydrogeologiske modeller til oplandet.
Opland_klima	Nej	Indgår klima i oplandsberegningen. Eksempelvis forøget nettonedbør, fremtidige klima.
Opland_indvinding	350.000 m^3/år	Indvinding benyttet til oplandet. (Er der benyttet varierende indvinding, kan man angive et interval (10-50.000) eller periode (aktuel 1997 - 2005) eller Tilladt indvinding
Usikkerhedsmatrice	filnavn (ALS_UM_Område_1.pdf)	En reference til oplandets usikkerhedsmatrice
Geologisk-usikkerhed	MEP stor boringstæthed	En *subjektiv* vurdering på data som ligger til grund for oplandet i området
Oplands-usikkerhed	Middel	En *subjektiv* vurdering af oplandets endelige usikkerhed (Stor usikkerhed, mellem usikkerhed, lille usikkerhed). Kan baseres på en tolkning af modellens usikkerhedsmatrice.
Note	Det primære grundvandsdannende område er i den nordlige del af oplandet.	Her kan man tilføje lidt "fri-tekst".

4.5 Sammenfatning

Der er for 4 kildepladser beregnet IO og GO, hvor parameterusikkerheden, og usikkerheden på den geologiske model er inddraget ved at variere på de geofysiske skæringsmodstande for sand og ler. Der er herved beregnet forskellige IO og GO som er sammenlignet og sammenstillet med oprindelige reference- IO og GO for de 4 kildepladser. Sammenstillingen mellem de forskellige beregnede oplande har resulteret i udpegningen af henholdsvis et stort areal med alle de ovenfornævnte usikkerheder (foreningsmængdeopland) og et mindre areal, hvor alle oplande og kørsler falder inden for (fællesmængdeopland).

Undersøgelsen har vist, at 3 ud af 4 oplandsberegninger for henholdsvis IO og GO beregnet ud fra forskellige geologiske modeller ligger nogenlunde inden for oplandsafgrænsningen til det stokastiske opland svarende til parameterusikkerheden for både IO og GO. Dog er der en undtagelse for oplandsberegningerne tilhørende Broballe kildeplads, hvor oplandet for både IO og GO tæt ved kildepladsen ligger uden for det stokastiske opland for den geologiske model som har det største sandindhold. For de øvrige modeller hvor lerindholdet er større befinder både IO og GO inden for det stokastiske opland.

Nærværende metodik til at undersøge forskellige hydrostratigrafiske og geologiske modellers betydning for IO og GO er på ingen måde fuldt udtømmende. De mulige geologiske modeller der i princippet kan forekomme for undersøgelsesområdet vil give et større usikkerhedsbånd. Men metoden er en let og ligetil metode, der ikke kræver mange ressourcer i forhold til, at skulle generere nye geologiske lag og højdemodeller. Den anvender blot de geofysiske data som foreligger, og anvender således de muligheder der ligger i at tolke skæringsmodstande imellem sand og ler på forskellige måder.

At nærværende undersøgelse viser, at den introducerede geologiske usikkerhed for 3 modeller kan rummes inden for parameterusikkerheden på de hydrauliske parametre er enten en tilfældighed, eller kan skyldes at de strukturelle forskelle mellem de forskellige modeller er lidt begrænset, da der primært er tale om variationer og gradsforskelle mellem sand og ler, som kompenseres via kalibrering.

Opstilling af usikkerhedsmatrice og en GIS-tabel indeholdende vigtige metadata er en god måde at synliggøre de usikkerheder, der er forbundet med de enkelte oplandsberegninger og at præcisere, hvor der er behov for nye data i forbindelse med fremtidige beregninger af oplande. Samtidig er GIS-tabeller med tilhørende metadata vigtige i forhold til dokumentationen af, hvordan de enkelte oplande er beregnet og hvordan de kan anvendes i forbindelse med den efterfølgende ressource- og indsatsplanlægning i kommunerne.

5. Konklusioner og anbefalinger

5.1 Konklusioner

Rapporten har gennemgået de væsentlige elementer af betydning for usikkerhederne i forbindelse med beregning af IO og GO. Rapportens kap. 3, hvor der er givet en gennemgang af, hvordan man typisk håndterer indsamling af data, opstilling af model og simuleringer, er udarbejdet, så det med fordel kan læses sammen med Geo-Vejledning 7 (Refsgaard et. al., 2010a). Der skelnes mellem data, model og management scenarie usikkerhed (jf. usikkerhedsmatricen illustreret ved en "videnspyramide").

Litteraturstudiet har vist at "state-of-the-art" i usikkerhedsvurderinger for IO og GO har bevæget sig fra metoder der fokuserede på parameterusikkerhed over mod metoder der fokuserer på konceptuel model usikkerhed. Samtidig har modelleringsprocessen og kommunikationen mellem parterne fået stigende opmærksomhed i de senere år, ligesom erkendelsen af nødvendigheden af kvantitativt (og hvis ikke en kvantitativ analyse er gennemførlig så i det mindste kvalitativt) at belyse, hvad usikkerheden på data, model og managementscenarier betyder for usikkerheden på de afgrænsede IO og GO.

Undersøgelsen har vist at usikkerheden på geologi og den konceptuelle model kan håndteres ved opstilling af et antal alternative konceptuelle modeller. Det et kan fx være usikkerheder på forekomsten af dæklag over et magasin, men også lækagelag mellem primære og sekundære magasiner, men det kunne også være usikkerhed på grundvandsdannelse, randbetingelser, grundvandsafstrømning til vandløb og procesbeskrivelser. Der findes egentlige geostatistiske metoder, der evt. kan benyttes i forbindelse med generering af alternative geologiske modeller (TPROGS/sGeMS). Der findes en række værktøjer hvorved der kan foretages målrettede vurderinger af prediktionsusikkerhed (fx følsomhedsanalyser, PEST, Monte Carlo simulering mm.). Detaljerede observationsdata fx trykniveau, vandløbsafstrømning, transmissivitetsdata mm. er nødvendige, såfremt man skal kunne konditionere (diskriminere mellem) de opstillede alternative konceptuelle modeller, og evaluere hypoteserne der adskiller dem. Resultaterne af de kvantificere usikkerhedsbånd kan illustreres ved afbildning af reference-IO og –GO, forenings- og fællesmængde opland på kort.

Opstilling af usikkerhedsmatrice er et vigtigt styringsredskab i processen for valget af effektive analysemetoder. Usikkerhedsmatricen og opstilling af en GIS tabel indeholdende vigtige metadata er en god måde at synliggøre de usikkerheder, der er forbundet med de enkelte oplandsberegninger og at præcisere, hvor der er behov for nye data, eller fokus i forhold til lagene i videnspyramiden, i forbindelse med fremtidige beregninger af oplande.

5.2 Anbefalinger

I det følgende er de anbefalinger nævnt, som projektgruppen mener, er væsentlige at have fokus på, for at kunne håndtere usikkerheder på IO og GO. Anbefalingerne er ikke noget man *skal* udarbejde, men nogle gode trin og arbejdsrutiner, man med fordel bør indarbejde i forbindelse med beregning af IO og GO.

Samtidig er det vigtigt at være opmærksom på, at der hele tiden sker en udvikling inden for hydrologisk modellering med både nye teknikker og ny software. Dette betyder, at nedenstående anbefalinger ikke skal stå i vejen for en videre udvikling,

men skal ses som et forsøg på at komme frem imod en ensartet og fyldestgørende beskrivelse af usikkerheder på IO og GO inden for grundvandskortlægningen.

Det anbefales, at man i forbindelse med anvendelse af usikkerhedsmatricen (jf. afsnit 3.1) fremhæver de væsentlige og betydende usikkerheder, som er forbundet med oplandsberegninger. Matricen udfyldes som udgangspunkt for hele modelområdet, men der kan efter behov udfyldes flere usikkerhedsmatricer for delområder af modellen. Formålet med usikkerhedsmatricen er, at man på en systematisk og ensartet måde strukturerer de enkelte elementer og usikkerhedskilder i modelleringsprocessen. De enkelte usikkerhedskilder vurderes i forhold til deres usikkerhedsgrad og dækning.
Sammen med usikkerhedsmatricen anbefales det, at der for hvert IO og GO tilknyttes en GIS-tabel, som kan indeholde metadata, der udover fx at beskrive anlægsnavn og indvindingsmængde, også indeholder informationer omkring beregningsmetode og en vurdering af usikkerheden på det enkelte opland (jf. afsnit 4.5).

Det anbefales, at der som udgangspunkt altid foretages en vurdering af modellens hydrauliske parameterusikkerhed typisk gennem en invers kalibrering. Herigennem fås et godt overblik over, hvilke hydrauliske parametre som er hæftet med størst usikkerhed.

Det anbefales, at der foretages en afgrænsning af *foreningsmængde-oplandet* for både IO og det GO. *Foreningsmængdeoplandet* for henholdsvis IO og det GO er defineret som det areal, der dækker alle gennemførte modelkørsler, hvor parameterusikkerhedsvurderinger (stokastiske beregninger) samt mulige alternative geologiske modeller indgår. Foreningsmængdeoplandet for henholdsvis IO og det GO vil oftest være langt større i arealmæssig udbredelse end referenceoplandet.
Foreningsmængden kan benyttes til vurdering af en mulig risiko for anden forurening (eksempelvis punktkilder). Her indenfor kan der være behov for supplerende undersøgelser. Foreningsmængden til oplande kan godt overlappe andre oplande tilhørende andre kildepladser.

Det anbefales, at der altid udføres en beregning af *referenceoplandet*, der giver en god indikation omkring oplandets/GO faktiske areal i forhold til den aktuelle indvinding. Referenceoplandet for både indvindingsoplandet (IO) og det grundvandsdannende opland (GO) er defineret som det IO og GO, som fremkommer, når oplandene beregnes ud fra den tilladte indvindingsmængde $Q_{\text{tilladte/år}}$ som et gennemsnit over de sidste 3-5 år (m^3/år), og hvor den gennemsnitlige nettonedbør/infiltration er anvendt. Samtidig er de hydrauliske parametre i de betydende aquiferer fastholdt svarende til de værdier, som er anvendt i den kalibrerede model.

Det anbefales ligeledes, at der foretages en afgrænsning af *fællesmængde-oplandet*. *Fællesmængdeoplandet* for henholdsvis IO og det GO er defineret som det areal, der udgør en fællesmængde for alle modelkørsler af henholdsvis IO og det GO. Fællesmængdeoplandet vil ofte være et areal, som er betydeligt mindre end både referenceoplandet og foreningsmængdeoplandet, og vil typisk ligge ret boringsnært i forhold til kildepladsen. Fællesmængdeoplandet for det GO er det bedste bud på et sikkert areal, og må være det areal, som først og fremmest velegnet til afgrænsning af grundvandsbeskyttende foranstaltninger i forbindelse med udarbejdelse af indsatsplaner.
Det anbefales derfor, at der udføres oplandsberegninger på både de alternative hydrostratigrafiske modeller og på parameterusikkerhederne vha. stokastiske oplande for både IO og det GO.

5.3 Andre parametre og relevante følsomhedsanalyser

Betydningen af indvindingsmængden. Det er ikke uvæsentligt, at der udføres et scenarie eller flere, der belyser betydningen af en større fremtidig indvinding, der fx ligger 25-50 % over den tilladte indvinding. Man vil her få et godt overblik over, hvilke områder og arealer som vil blive berørt i forbindelse med en udvidelse af en eksisterende kildeplads.

Følsomhedsanalyser. Det anbefales at betydning af påtrykte randbetingelser, udveksling med vandløb, nedbør/fordamptning (fx ±25 % af nettonedbør), diskretisering, stationær versus dynamisk simulering, markvanding, drænopsætning mm. testes ved følsomhedsanalyser.

Endelig er det vigtigt at have fokus på betydningen af fremtidige ændringer i nedbørsfordelingen på årsbasis eller dekadevariationer. Klimascenarier med ændrede nettonedbørsmængder kan således have betydning for både størrelsen og beliggenheden af både IO og det GO. Det anbefales derfor, at man udfører klimascenarier, der kan belyse effekten af ændret nedbør og fordampning i fremtiden (incl. betydning for ændret arealanvendelse og vandindvinding), og hvilken betydning det har for de enkelte IO og GO´s udbredelse og usikkerhedsbånd.

6. Referencer

Bakker, M. and Strack, O.D.L. (1996) Capture zone delineation in two-dimensional groundwater flow models. *Water Resources Research* 32 1309-1315.

Bakr, M.I. and Butler, A.P. (2003) Worth of data in well-capture zone design: deterministic and stochastic analysis. *Journal of Hydrology* 290 202-216.

Bair, E.S., Springer, A.E. and Roadcap, G.S. (1991) Delineation of traveltime-related capture areas of wells using analytical flow models and particle-tracking analysis. *Ground Water 29* 387-397.

Beven, K. (2002) Towards a coherent philosophy for modelling the environment. *Proc Roy Soc London.* 458 (2026) 2465-84.

Beven, K. (2009) *Environmental modelling: An uncertain future?* Routledge. London.

Bhatt, K., (1993) Uncertainty in wellhead protection area delineation due to uncertainty in aquifer parameters values, *Journal of Hydrology*, vol. 149, pp. 1-8, 1993.

Brown JD, Heuvelink, GBM, Refsgaard JC (2005) An integrated framework for assessing and recording uncertainties about environmental data. *Water Science and Technology*, 52(6), 153-160.

Brugnach, M., Dewulf, A., Henriksen, H.J. and van der Keur, P. (2011) More is not always better: Coping with ambiguity in natural resource management. Journal of Environmental Management. 92 (1) 78-84.

Brown JD and Heuveling, GBM (2005) *Data uncertainty engine (DUE)* User's Manual. University of Amsterdam http://www.harmonirib.com

Carle, S.F. (1999) *T-PROGS: Transition Probability.* Geostatistical Software. Version 2.1.http://www.dinooption.com/bk21geo/data/t-progs.pdf

Carrera, J., Alcolea, A., Medina, A., Hidalgo, J. And Slooten, L.J. (2005) Inverse problem in hydrogeology. *Hydrogeol J* 13 206-222.

Cleary, T.C.B.F. and Cleary, R.W. (1991) Delineation of wellhead protection areas: Theory and practice. *Wat.Sci.Tech. 24 239-250.*

Council of Canadian Academies (2009) *The sustainable management of groundwater in Canada.* The Expert Panel on Groundwater. 254 pp.

Eaton, T.T. (2006) On the importance of geological heterogeneity for flow simulation. *Sedimentary Geology* 184 187-201.

EPA (1998) *Literature review of methods for delineating wellhead protection areas*. EPA 816-R-98-021. Office of Water (4606). United States Environmental Protection Agency.

Erfurt, P, 2010: Grundvandet på Als: Kortlægning af geologien og grundvandsforholdene – baggrund for indsatsplaner og forslag til beskyttelsesindsatser på Als. Miljøcenter Ribe (ikke officiel rapport endnu i skrivende stund).

Evers, S. and Lerner, D.N. (1998) How uncertain is our estimate of a wellhead protection zone? *Ground Water 36* 49-57.

Foster, C.B., Lachmar, T.E. and Oliver, D.S. (1997) Comparison of models for delineating wellhead protection areas in confined to semiconfined aquifers in alluvial basins. *Ground Water* 35 689-697.

Foster, S.S.D. (1994) *Managing land to protect groundwater sources: The English experience.* FCIHS.

Foster, S.S.D. and Skinner, A.C. (1995a) Groundwater protection: The science and practice of land surface zoning. ATV møde. Sikring af Danmarks fremtidige vandforsyning ved hjælp af grundvandsbeskyttelseszoner. ATV møde. SAS Scandinavia. 12. oktober 1995.

Foster, S.S.D. and Skinner, A.C. (1995b) *Groundwater protection: The science and practice of land surface zoning. Groundwater quality: remediation and protection.* IAHS publ. 225 471-482.

Frind, E.O., Muhammad, D.S. and Molson, J.W. (2002) Delineation of three-dimensional well capture zones for complex multi-aquifer systems. *Ground Water* 40 (6) 586-598.

Frind, E.O., Molson, J.W. and Rudolph, D.L. (2006) Well vulnerability: A quantitative approach for source water protection. *Ground Water* 44 (5) 732-742.

Gregersen, J., Refsgaard, A., Jacobsen, T. (1995) Anvendelse af numerisk partikel transport model til bestemmelse af tre-dimensionale transporttidsrelaterede indvindingsoplande. ATV møde. Sikring af Danmarks fremtidige vandforsyning ved hjælp af grundvandsbeskyttelseszoner. SAS Scandinavia. 12. oktober 1995.

Harrar, W.G., Sonenborg, T.O. and Henriksen, H.J. (2003) Capture zone, travel time, and solute-transport using inverse modelling and different geological models. *Hydrogeology Journal* 11 536-458.

Hendricks, H.J., Alcolea, A., Riva, M., Bakr, M., van der Wiel, N., Stauffer, F. and Guadagnini, A. (2009) A comparison of seven methods for the inverse modelling of groundwater flow. Application to the characterisation of well catchments. *Advances in water resources* 32 851-872.

Henriksen, H.J and Højberg, A.L. (2008) Model peer review and modeller-manager dialogues as an avenue to improved model credibility. In: (Eds) Refsgaard, J.C., Kovar, K., Haarder, E. and Nygaard, E. (2008) *Calibration and Reliability in Groundwater Modelling: Credibility and modelling*. ModelCARE 2007. IAHS Publication 320. 101-107.

Henriksen, H.J. og Rasmussen, P. (1997) Afprøvning af zoneringsprincipper i 3 områder: Simple eller modelbaserede metoder? ATV møde. Kan zonering redde vandværker? Hotel Marselis. 8. oktober 1997.

Henriksen, H.J. (2001) *Ståbi I grundvandsmodellering.* GEUS Rapport 2001/56.

Henriksen, H.J. (2003) Hvordan sikrer vi troværdige hydrologiske modeller. ATV mode. Vingstedcentret *4.-5. marts.*

Henriksen, H.J., Refsgaard, J.C., Højberg, A.L., Ferrand, N., Gisjbers, P. and Scholten, H. (2009) Harmonised principles for public participation in quality assurance of integrated water resources modelling. *Water Resour Manage* 23 2539-2554.

Iversen, C.H., Lauritsen, L.U, Nyholm, T. og Kürstein, J. 2008, *Geo-Vejledning nr. 2.* Udpegning af indvindings- og grundvandsdannende oplande, GEUS

Iversen, C.H., Wernberg, T. og Nyholm, T, 2009. Test af Analytisk Element Modeller (AEM) sammenlignet med den numeriske metode til udpegning af indvindingsoplande, GEUS.

Iversen C. H.; Troldborg, L.; Møller, R.R. og Christensen, S. 2010. *Dynamiske og stationære oplandsberegninger udført med tre semi-syntetiske modeller*, GEUS.

Jørgensen, F., Damgaard, J. & Olesen, H. (2008) Impact of geological modelling on groundwater models – a case study from an area with distributed, isolated aquifers. In: (Eds.) Refsgaard, JC, Kovar, K, Haarder, E and Nygaard, E (2008) *Calibration and reliability in groundwater modelling: Credibility and modelling.* IAHS Publication 320. ModelCARE 2007. 337-344.

van Keur, P, Brugnach, M, Dewulf, A, Refsgaard, JC, Zorrilla, P, Poolman, M, Isendahl, N, Raadgever, GT, Henriksen, HJ, Warmink, JJ, Lamers, M and Mysiak, J (2010) Identifying uncertainty guidelines for supporting policy making in water management illustrated for Upper Guadiana and Rhine Basins. *Water Resour manage.* DOI 10.1007/s11269-010-9640-x

Kinzelback, W., S. Vassolo & G-M. LI. 1996. Determination of capture zones of wells by Monte Carlo simulation. *Calibration and reliability in Groundwater Modelling*, Proceedings of the International Conference ModelCARE'96, IAHS Publ. n°237, 543-550.

Kramer, S.R., H.M. Haitjema & O.D.L Stack (1994): Capture zone modelling using the WhAEM (wellhead analytical element model), In: *Analytical Element Modelling and the Groundwater Flow*. Proceedings of the international Conference, school of Public and Enviromental Affairs, Indianan, 55-59.

Lerner, D. (1992) Well catchments and time-of-travel zones in aquifers with recharge. *Water Resources Research* 28 2621-2628.

van Leeuwen, M., te Stroet, C.B.M., Butler, A.P., and Tompkins, J.A. (1998) Stochastic determination of well capture zones. *Water Resources Research* 34 2215-2223.

van Loon E and Refsgaard JC eds. (2005) *Guidelines for assessing data uncertainty in hydrological studies.* HarmoniRiB report. Geological Survey of Denmark and Greenland. http://www.harmonirib.com

Martin, P.J. and Frind, E.O. (1998) Modeling a complex multi-aquifer system: The waterloo moraine. *Ground Water* 36 679-690.

Matthess, G., Foster, S.S.D. and Skinner, A.C. (1985) *Theoretical background, hydrogeology and practice of groundwater protection zones.* Contribution to UNESCO IHP II project A.3.7. UNESCO, IAH and IUGS, vol. 6.

Mielby, S., Ditlevsen, C. og Olesen, H., *Geo-Vejledning nr. 4* "Potentialekortlægning", GEUS, 2009.

Miljøstyrelsen (1995) *Metoder til udpegning af indvindingsoplande*. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen. Nr. 8. 1995. Vejle amt, Sønderjyllands amt og Rambøll, Hannemann & Højlund A/S.

Miljøstyrelsen (2000) *Zonering.* Vejledning Nr. 3. 156 pp.

Neumann S.P. and Wierenga, P.J. (2003) *A comprehensive strategy of hydrogeological modelling and uncertainty analysis for nuclear facilities and sites.* University of Arizona, Report NUREG/CR-6805.

Nordjyllands Amt, Vejledning i indvindingsoplande. (2003).

Pollock, D.W. (1988) Semianalytical computation of path lines for finite-difference models. *Ground Water* 26 743-750.

Rasmussen, P., Henriksen, H.J., Nyegaard, P., Hundahl, M., Thomsen, R., Brandt, G., Landt, M., Mogensen, A. og Kaalby, S. (1995) Zoneopdelt grundvandsdannelse. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen. Nr. 14.

Refsgaard, J.C. (2007) *Hydrological modelling and river basin management.* Doctoral Thesis. Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse. Særudgivelse 2007.

Refsgaard, J.C., Henriksen, H.J., Harrar, W.G., Scholten, H. and 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, J.C., van der Sluijs, J.P., Brown, J. and van der Keur, P. (2006) A framework for dealing with uncertainty due to model structure error. *Advances in water resources* 29 1586-1597.

Refsgaard, J.C., Sonnenborg, T.O. og Henriksen, H.J. (2009) Klimaændringer i Danmark – hydrologiske effekter og usikkerheder. *Vand og jord.* Nr. 4 (16). November 2009: 124-127.

Refsgaard, J.C., Henriksen, H.J, Troldborg, L. (2010a) Geo-Vejledning nr. 7. Hydrologisk modellering. GEUS.

Refsgaard, J.C., Højberg, A.L., Møller, I., Hansen, M. and Søndergaard, V. (2010b) Groundwater modelling in integrated water resources management – visions for

2020. *Ground Water. Volume 48, Issue 5,* pages 633–648, September/October 2010

Reilly, T.E. and Pollock, D.W., 1996. Sources of water to wells for transient cyclic systems. *Ground Water, 34* (6): 979-988.

Remy, N., Boucher, A. and Wu, J. (2009) *Applied Geostatistics with sGeMS*. Cambridge University Press. 260 pp.

Rojas, R., Feyen, L. and Dassargues, A. (2008) Conceptual model uncertainty in groundwater modelling: Combining generalized likelihood uncertainty estimation and Bayesian model averaging. *Water Resources Research 44*. doi:10.1029/2008WR006908.

Rojas, R., Feyen, L. and Dassargues, A. (2009) Sensitivity analysis of prior model probabilities and the value of prior knowledge in the assessment of conceptual model uncertainty in groundwater modellering. *Hydrological processes* 23 1131-1146.

Rojas, R., Feyen, L., Batelaan, O. and Dassargues, A. (2010) On the value of conditioning data to reduce conceptual model uncertainty in groundwater modelling. *Water Resources Research.* 46. doi:10.1029/2009WR008822.

van der Roosmalen, L., Sonnenborg, T. and Jensen, K.H. (2009) Impact of climate and land use change on the hydrology of a large-scale agricultural catchment. *Water Resources Research* 45. doi:10.1029/2007WR006760.

Seifert, D., Sonnenborg, T.O., Scharling, P. and Hinsby, K. (2007) Use of alternative conceptual models to assess the impact of a buried valley on groundwater vulnerability. *Hydrogeology Journal* 16 659-674.

Sonnenborg, T.O. og Henriksen, H.J. (2005) Håndbog i grundvandsmodellering. GEUS rapport nr. 2005/80. 280 pp.

Springer, A.E. and Bair, S. (1992) Comparison of methods used to delineate capture zones of wells: 2. Stratigied-drift buried-valley aquifer. *Ground Water* 30 908-917.

Sønderjyllands Amt, 2006: Dynamisk grundvandsmodel for Als og oplandsberegninger, Watertech A/S.

Sønderjyllands Amt, 2006: Als-undersøgelse: Revidering af stationær grundvandsmodel for Als, Watertech A/S.

Troldborg, L. (2004) *The influence of conceptual geological models on the simulation of flow and transport in Quaternary aquifer systems.* PhD. Thesis 2004. GEUS report 2004/107.

Troldborg, L.T., Refsgaard, J.C., Jensen, K.H. and Engesgaard, P. (2007) The importance of alternative conceptual models for simulation of concentrations in a multi-aquifer system. *Hydrogeology Journal 15* 843-860.

U.S. Army Corps of Engineers (1999) *Groundwater Hydrology.* Engineering and design. Department of the Army. Washington DC. Engineer Manual 1110-2-1421. CECW-EH.

Varljen, M.D. and Shafer, J.M. (1991) Assessment of uncertainty in time-related capture zones using conditional simulation of hydraulic conductivity. G*round Water* 29 737-748.

Vassolo, S., Kinzelbach, W. and Schäfer, W. (1998) Determination of a well head protection zone by stochastic inverse modelling. *Journal of Hydrology* 206 268-280.

Viborg Amt (2006) Indsatsplan for OSD-Breum, Roslev, Øster Grønning, Thise, Lyby, Jebjerg og Vihøj Vandværk.

Ye, M., Pohlmann, K.F., Chapman, J.B., Pohll, G.M. and Reeves, D.M. (2009) A model-averaging method for assessing groundwater conceptual model uncertainty. *Ground Water* doi: 10.1111/j.1745-6584.2009.00633.x

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

ISBN 978-87-7871-301-8
WEB ISBN 978-87-7871-302-5

USIKKERHEDER PÅ INDVINDINGS- OG GRUNDVANDS-DANNENDE OPLANDE

(DELPROJEKT 3 OM OPLANDE)

Som støtte for den nationale grundvandskortlægning udarbejder GEUS i samarbejde med Naturstyrelsen faglige vejledninger i forskellige aspekter inden for grundvandskortlægningen.

I 2008 udgav GEUS Geo-vejledning nr. 2 "Indvindings- og grundvandsdannende oplande". I forlængelse af denne udgivelse blev der igangsat nogle delprojekter, med specifikke underemner der anvendes i afgrænsning af oplande.

Denne rapport beskriver de metoder til usikkerhedsbetragtninger som man traditionelt anvender i forbindelse med opstilling af numeriske grundvandsmodeller samt hvordan man håndterer specielt usikkerheder på oplande. Med udgangspunkt i et pilotområde på Als i Sønderjylland er der ud fra fire kildepladsvurderinger testet en anbefalet arbejdsgang i håndtering af usikkerheder på oplande.

Formålet med undersøgelsen har været at opstille nogle retningslinier for, hvordan man håndterer usikkerheder i forbindelse med oplandsberegninger, og beskrive en anbefalet arbejdsgang i håndtering af de enkelte usikkerhedsparametre i modelleringsprocessen.

USIKKERHEDER PÅ INDVINDINGS- OG GRUNDVANDSDANNENDE OPLANDE

De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS)
Geological Survey of Denmark and Greenland

Øster Voldgade 10
1350 København K
Danmark

Telefon 38 14 20 00
Fax 38 14 20 50
E-post geus@geus.dk
Hjemmeside www.geus.dk

GEUS