

Review af modelarbejdet i Århus Syd-området

Torben O. Sonnenborg



Review af modelarbejdet i Århus Syd-området

Torben O. Sonnenborg

Indholdsfortegnelse

1	INTRODUKTION.....	1
2	BESKRIVELSE AF ÅRHUS SYD MODEL.....	5
2.1	GENEREL BESKRIVELSE	5
2.2	GEOLOGISK MODEL	5
2.2.1	<i>Overordnet geologi.....</i>	<i>5</i>
2.2.2	<i>Bestemmelse af geologiske enheder.....</i>	<i>5</i>
2.2.3	<i>De øverste 30 meter</i>	<i>6</i>
2.2.4	<i>Korrelation med boringsoplysninger.....</i>	<i>6</i>
2.3	VURDERING AF GEOLOGISK MODEL.....	7
2.3.1	<i>Opløselighed af geologien</i>	<i>7</i>
2.3.2	<i>Tolkning af hydrofacies.....</i>	<i>7</i>
2.4	GRUNDEVANDSINDVINDING	8
2.5	MODELKALIBRERING	9
2.5.1	<i>Kalibreringsopsætning.....</i>	<i>9</i>
2.5.2	<i>Kalibreringsresultater.....</i>	<i>11</i>
2.6	MODELVALIDERING	13
2.6.1	<i>Validering mod trykniveaudata.....</i>	<i>13</i>
2.6.2	<i>Dynamisk validering.....</i>	<i>15</i>
2.6.3	<i>Validering mod grundvandsaldre</i>	<i>15</i>
2.7	SAMLET VURDERING AF MODELLENS TROVÆRDIGHED.....	16
3	VURDERING AF KILDEPLADSSPECIFIKKE KERNEOPLANDE	19
3.1	METODE TIL UDPEGNING AF KERNEOPLANDE	19
3.1.1	<i>Vurdering af tolkningsmetoden.....</i>	<i>20</i>
3.2	KILDEPLADSSPECIFIK VURDERING AF KERNEOPLANDE	23
3.3	ADSLEV VANDVÆRK.....	25
3.4	BEDERVÆRKET, AJSTRUP.....	26
3.5	BEDERVÆRKET, BYAGERPARKEN.....	27
3.6	BEDERVÆRKET, SKOLEPARKEN	28
3.7	BEDERVÆRKET, VILHELMSBORG	29
3.8	BLEGIND VANDVÆRK	30
3.9	GL. HØRNING VANDVÆRK	31
3.10	HASSELAGER-KOLT, PILEGÅRDSVEJ	32
3.11	HASSELAGER-KOLT, VV SAMT VV. KOLT SKOVV.....	33
3.12	HØRNING ST. VANDVÆRK.....	34
3.13	JEKSEN VANDVÆRK	35
3.14	MALLING VANDVÆRK.....	36
3.15	MÅRSLEV VANDVÆRK	37
3.16	STILLINGVÆRKET.....	38
3.17	TESTRUP VANDVÆRK.....	39
3.18	ØSTERBYVÆRKET, RAVNHOLT/TISET.....	40
3.19	ØSTERBYVÆRKET, ØSTERBY.....	41
4	FORSLAG TIL YDERLIGERE UNDERSØGELSER	43
4.1	GEOLOGISK MODEL	43
4.2	NUMERISK NET	43
4.2.1	<i>Numerisk diskretisering</i>	<i>43</i>
4.2.2	<i>Grid design</i>	<i>44</i>
4.3	KALIBRERING AF STATIONÆR MODEL.....	45
4.4	ANALYSE AF ESTIMEREDE PARAMETERVÆRDIER	46
4.5	ÅRSAGER TIL FALSIFICERING AF MODELLEN	47
5	USIKKERHEDSANALYSE.....	49

5.1	UDVÆLGELSE AF FAKTORER TIL USIKKERHEDSANALYSE	49
5.2	METODER TIL KVANTIFICERING AF USIKKERHEDEN	52
5.3	KVANTIFICERING AF USIKKERHED PÅ UDVALGTE FAKTORER	53
	5.3.1 <i>Vurdering af usikkerhed og udfaldsrum</i>	53
	5.3.2 <i>Valg af udfald til følsomhedsanalyse</i>	54
6	KONKLUSIONER	55
7	REFERENCER	57
	APPENDIX 1: UDPEGNING AF KERNEOPLANDE	59

1 Introduktion

I forbindelse med indsatsplanlægningen i Århus Syd området (Åbo, Stautrup, Storskoven, Østerby og Beder indsatsområder) har Århus Amt i samarbejde med DHI – Institut for Vand og Miljø gennemført et modelstudium med det formål at understøtte udpegnen af arealer, der skal beskyttes mod forurening. Der er tidligere blevet opstillet grundvandsmodeller for kortlægningsområde Århus syd. Den første model, der blev opstillet i 1993, havde til formål at fastlægge størrelsen af den nødvendige regulering af de store vandindvindinger, der var blevet givet i 1960'erne. Grundvandssænkningen i området var på det tidspunkt i gennemsnit 0.5 meter per år, og det var tydeligt, at grundvandsressourcen var mindre end antaget, da oppumpningstilladelserne blev givet. Modellen blev kalibreret, så vandbalancen og den fremtidige oppumpning blev bæredygtig i forhold til sænkning af grundvandsspejlet og påvirkningen af vandløbene, og den samlede tilladelse til oppumpning blev på dette grundlag reguleret i 1993. I forbindelse med opstilling og kalibrering af modellen blev det klart, at den geologiske beskrivelse var meget usikker i dele af modelområdet. Århus Amt og Århus Kommune indledte derfor et samarbejde med Århus Universitet med det formål at detailkortlægge Århus Kommune med nyudviklede geofysiske metoder.

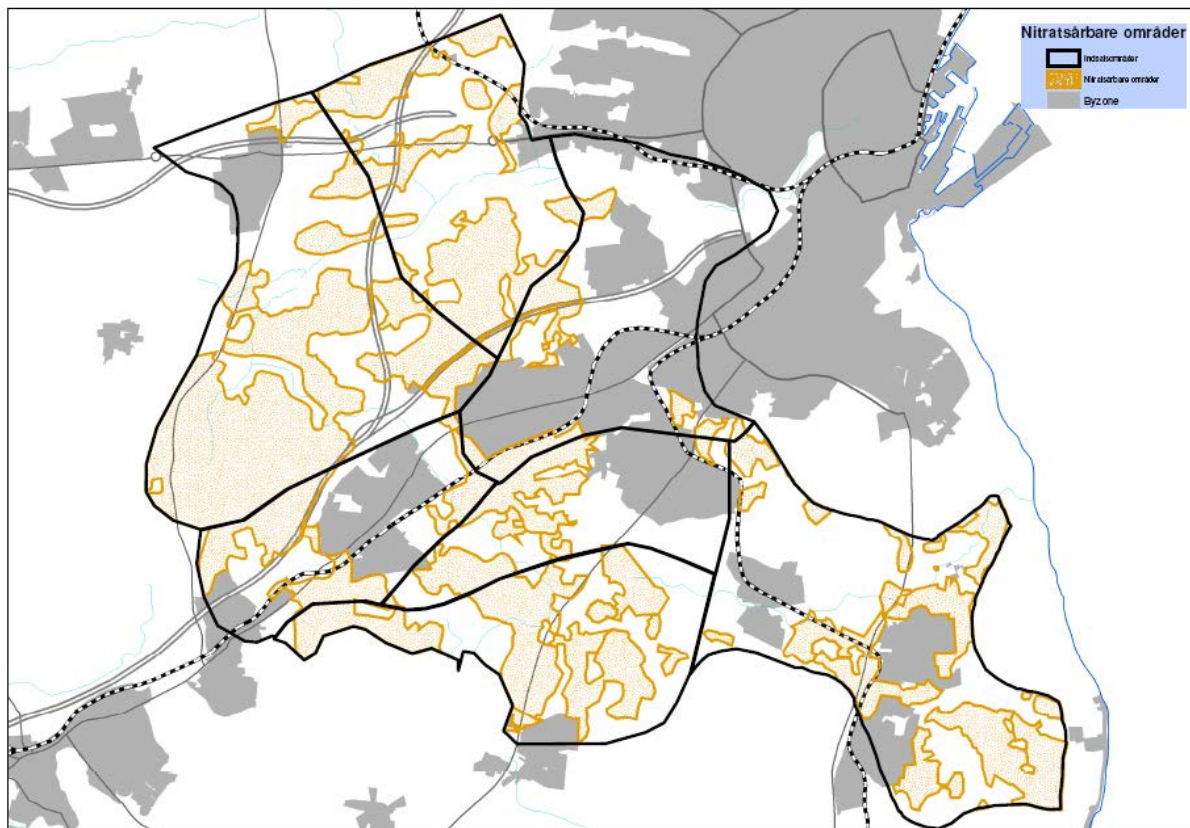
I årene derefter blev der gennemført en omfattende kortlægning. Kortlægningen har givet et meget præcis billede af grundvandsmagasinerne udbredelse og beskyttelse. I 1997 blev der opstillet en ny model for at kontrollere, om den nye viden om geologien gav anledning til en ny regulering af oppumpningen. Det blev konkluderet, at der ikke på det nye grundlag var behov for at ændre den tilladte oppumpning ved vandværkerne i området. I forbindelse med detailkortlægningen blev det muligt at udarbejde et lertykkelseskort, der nærmere angiver hvilke områder, der er særlig vigtige at beskytte imod forurening. Samme år blev områder med særlige drikkevandsinteresser udpeget i Regionplan 1997.

I forbindelse med udarbejdelse af indsatsplaner, som blev besluttet af folketinget i 1998, er der i de senere år blevet udført supplerende kortlægning for nærmere at kunne bestemme, hvilke områder der skal beskyttes med en indsatsplan. I forbindelse med kortlægningen er der blevet udarbejdet kort over sårbare områder (se figur 1), som skal beskyttes for at sikre, at grundvandet ikke forurenes. Den nye (i 2005) opdatering af grundvandsmodellerne fra 1993 og 1997 skal benyttes til at støtte vurderingen af, hvilke og hvor meget af de sårbare områder der skal beskyttes for dels at sikre de dybe grundvandsmagasiner og for dels for at fastlægge hvilke sårbare områder, der kan henføres til specifikke vandværkers grundvandsdannende oplande.

Modellen skal derfor bruges til at besvare følgende spørgsmål:

1. Vil nedsivningen fra de sårbare områder indenfor indsatsområdet indgå i grundvandsdannelsen til de dybe magasiner, der benyttes til vandforsyning?

2. Indenfor indsatsområdet påvirker oppumpningen fra vandværkerne hinanden kraftigt. Er det muligt med partikelbaneberegninger at fastlægge, hvilke dele af de grundvandsdannende oplande der med en rimelig sikkerhed kan henføres til et specifikt vandværk? Der arbejdes med såkaldte kerneoplande, hvor det vurderes, at der med stor sikkerhed dannes vand til kildepladserne, og et sandsynlighedsområde omkring kerneoplandet, som med en vis sandsynlighed udgør en del af infiltrationsoplandet. Ønsket om at kunne henføre kerneoplande til specifikke vandværker har baggrund i, at det må forventes at kunne komme på tale at betale erstatning til landbruget for at sikre beskyttelsen af grundvandet. Udpegnen af kerneoplande kan samtidig benyttes til en prioritering af beskyttelsesforanstaltninger indenfor de sårbare grundvandsområder i indsatsområdet.



Figur 1 Illustration af Århus Syd området, hvor placeringen af indsatsområder og nitratsårbare områder er vist.

Nærværende rapport beskriver resultatet af et review af opgaven, som GEUS efterfølgende har gennemført for Århus Amt. Opgaven har været delt op i en generel del og en konkret del, hvor der i den konkrete del fokuseres på enkelte specifikke problemstillinger, som specielt kan give anledning til kritiske kommentarer.

Den generelle del af opgaven inkluderer en vurdering af metoden, som er anvendt til udpegning af områder med hhv. høj, middel og lav beskyttelsesprioritet. Analysen indeholder en vurdering af:

- 1) modelleringsteknikken der er anvendt til bestemmelse af infiltrationsområder for de enkelte kildepladser (stationær model, horisontal og vertikal diskretisering, partikelbaseret simulering), herunder:
 - vurdering af kalibrerings- og valideringsresultater, samt betydningen af at der i den nordlige del af modellen er boringer, der løber tørre i én af scenarieberegningerne, og betydningen heraf på bestemmelsen af usikkerheden på infiltrationsoplande
 - vurdering af, hvilke konsekvenser det har haft at anvende en stationær strømningsmodel: (a) Har det betydning for udpegningen af kerneoplande og sandsynlighedsområder, (b) ville en dynamisk model have kunnet løse opgaven bedre og i givet fald på hvilke punkter.
 - en vurdering af skalaproblemstillinger, dvs. på hvilken skala kan modellens resultater anvendes

- 2) metoden, der benyttes til at prioritere beskyttelsesindsatsen, dvs. bestemmelsen af hhv. kerneoplande (områder med høj prioritet) og sandsynlighedsområder (områder med middel prioritet), herunder:
- en vurdering af, hvor godt kerneoplandet til hver enkelt af de 33 kildepladser er bestemt. Pga. forskelle i modellens troværdighed indenfor modelområdet, mængden af vand, der indvindes ved kildepladsen, mm. vil der være forskel på troværdigheden af de kerneoplande, som modellen genererer for de enkelte kildepladser.

Reviewet har resulteret i (a) en nøgtern beskrivelse af de anvendte metoder set med reviewers øjne og (b) en kvalitativ bedømmelse af de anvendte analysemetoder på et generelt niveau, hvor egnetheden af metoderne til den aktuelle type opgave vurderes. Analysen inkluderer en vurdering af, i hvor høj grad de anvendte metoder kan tilvejebringe et grundlag for vurdering af sikkerheden (eller usikkerheden), hvormed de definerede beskyttelsesområder er bestemt.

Reviewet er struktureret i 4 afsnit. Først beskrives Århus Syd modellens opbygning, og modellens troværdighed evalueres. Endvidere vurderes modellens anvendelighed i forhold til at udpege kerneområder i vandværkernes grundvandsdannende oplande. Derefter vurderes metoden, som er anvendt til at foretage en prioritering af beskyttelsesindsatsen, og kerneoplandene for hvert enkelt kildeplads evalueres. De to sidste afsnit indeholder forslag til, hvordan modellens evne til at reproducere historiske data (primært trykniveaudata) kan forbedres, samt hvordan en mere grundig usikkerhedsanalyse kan struktureres og gennemføres.

Konklusioner draget i nærværende rapport er primært baseret på informationer uddraget af rapportererne DHI (2005a, b, c, d, e), Århus Amt (2005), samt personlig kommunikation med Signe Weng Grønhøj (Århus Amt) og Michael Kristensen (DHI).

2 Beskrivelse af Århus Syd model

2.1 Generel beskrivelse

Der er opstillet en grundvandsmodel for et område på ca. 412 km², som inkluderer indsatsområderne Åbo, Stautrup, Storskoven, Østerby og Beder lokaliseret vest og syd for Århus by. Modellen er opstillet i modelsystemet MIKE SHE, der er benyttet i sin stationære version, som inkluderer 3D grundvandsstrømning, drænastrømning samt udveksling mellem grundvand og vandløb/søer. Nedbørsinput til modellen i form af nettonedbør er beregnet ved anvendelse af rodzonemodellen Daisy.

2.2 Geologisk model

Den geologiske model er opbygget som en pixelmodel af samme type som eksempelvis DK-model Jylland. Der er defineret 27 geologiske lag, hvor de 3 øverste har variabel tykkelse, mens de nederste 24 lag alle har en tykkelse på 5 m. Den horisontale opløsning af den geologiske model er 125 m. Den geologiske model beskriver primært de kvartære aflejringer. Prækvartæret består af fed tertiært ler med begrænsede vandføringsegenskaber og udgør derfor bunden af modellen.

2.2.1 Overordnet geologi

Geologien i Århus Syd området er strukturelt kompleks pga. tilstedeværelsen af begravede dale. Overordnet er området imidlertid domineret af to større relativt velafgrænsede dalstrukturer: Brabranddalen og Beder-Mårslet-Stillingdalen (efterfølgende refereret til som blot Bederdalen). Begge dale er orienteret vest-øst og er mod øst forbundet med Århus-bugten. Den interne geologiske opbygning af dalene består af vekslende lag af smeltevandssand, silt-ler samt moræneaflejringer (DHI, 2005a). Udenfor dalene ligger prækvartæret generelt højt (over kote nul), og da prækvartæret udgøres af tertiært ler, er de vandindvindingsmæssige interesser derfor centreret om dalstrukturene. Det er i tolkningen af geologien i kortlægningsområdet tydeligt, at de sydlige smalle dale er betydeligt mindre komplicerede end den brede Brabranddal.

2.2.2 Bestemmelse af geologiske enheder

Der er defineret 5 geologiske enheder, som kan karakteriseres efter stigende lerindhold på følgende måde: Sand, sand med ler, ler/sand, ler med sand og ler. Den litologiske beskrivelse af de enkelte pixels er i ca. 2/5 af modelområdet (se figur 2) baseret på tolkede modstande fra TEM-sonderinger, hvor metoden udviklet under arbejdet med Århus Nord området (DHI, 2002) er benyttet. Modstande er udtrykt i dybderne 0-5 m, 5-15m, 15-30 m, samt i 5 meters intervaller i dybden 30 – 150 m. Lave modstande (< 50 ohmm) tolkes som ler, mens høje modstande (> 70 ohmm) tolkes som sand. Modstande herimellem klassificeres som en af de resterende 3 geoenheder ved lineær interpolation mellem 50 og 70 ohmm.

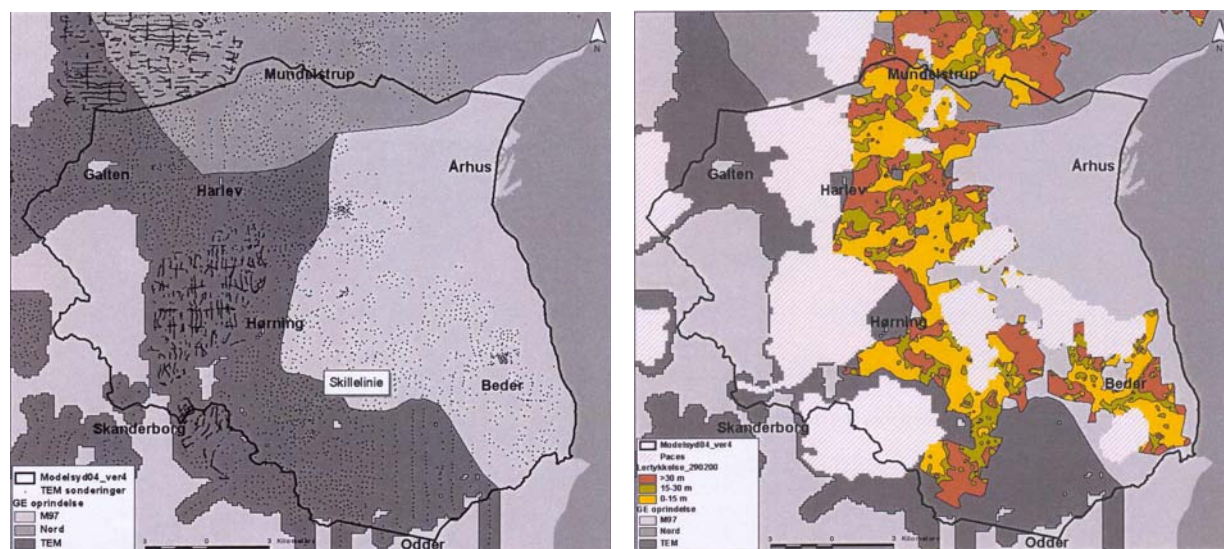
I den nordligste del af området er geoenheder fra Århus Nord modellen (DHI, 2002) benyttet. Geologien i den østlige halvdel samt i et mindre område ved den vestlige rand er baseret på en 4-lagstolkning af geologien foretaget i forbindelse med opsætning af en regional model fra 1997 (DHI, 1998), herefter benævnt Model97. I dette arbejde er der foretaget en distribueret kalibrering af hydraulisk ledningsevne indenfor hvert lag. På basis af estimaterne for hydraulisk ledningsevne er der foretaget en kategorisering på de fem geologiske enheder

beskrevet ovenfor. Fordelingen af geoenheder afhænger dermed primært af parameterestimerne fundet under kalibreringen af Model97, mens der er en implicit relation til den direkte tolkning af geologiske data. Geoenhederne fundet på basis af Model97 vil alt andet lige være behæftet med større usikkerhed end de øvrige geologiske datatyper.

2.2.3 De øverste 30 meter

I de områder, hvor der er PACES data eller lertykkelseskort til rådighed, er den geologiske model blevet gentolket i de øverste 30 m. PACES data er tolket i 3 lag med hhv. 5, 10 og 15 meters tykkelse. De tolkede PACES data er oversat til geoenheder på principielt samme måde, som der er anvendt for TEM-data. I områder, hvor der ikke forefindes PACES målinger, er den terrænnære geologiske model suppleret med en tolkning af lertykkelseskortet til geoenheder. Lertykkelseskortet, som angiver lermægtigheden D i de øverste 30 meter under terræn, er omsat til geoenheder vha. følgende metode: Hvis $D \geq 30$ m sættes geoenheden til ler; hvis $15 \leq D < 30$ m sættes geoenheden til ler med sand, og hvis $D < 15$ m sættes geoenheden til sand med ler. Denne metode resulterer i, at der til forskel fra PACES-tolkningen genereres en homogen geologi over dybden i de 3 øverste geologiske lag.

I områder, hvor der hverken forefindes PACES data eller lertykkelseskort, er den overfladenære geologiske model konstrueret på baggrund af TEM-data, Århus Nord modellen eller Model97, som beskrevet i afsnittet ovenfor.



Figur 2 Til venstre ses hvilke data den dybe geologi er baseret på. Til højre ses datagrundlaget for de øverste 30 m (DHI, 2005a).

2.2.4 Korrelation med boringsoplysninger

Den geologiske model opbygget som beskrevet ovenfor er efterfølgende blevet kontrolleret mod boringsoplysninger. Dette er i praksis foretaget ved at optegne et stort antal profiler, hvor både boringer og geologiske enheder baseret på geofysiske data er indlagt. Ved uoverensstemmelse mellem de to sæt informationer, er de geologiske enheder blevet justeret, så der opnås overensstemmelse med boringsoplysningerne. Det er imidlertid ikke muligt på baggrund af det tilgængelige materiale at afgøre, i hvor stor afstand fra boringerne denne justering er foretaget.

2.3 Vurdering af geologisk model

2.3.1 Opløselighed af geologien

Som det ses af ovenstående, er den geologiske model for dybder større end 30 meter baseret på tre forskellige datagrundlag, hvilket resulterer i, at beskrivelsen af geologien vil fremstå uhomogen. I den centrale del af modelområdet udgøres datagrundlaget af relativt høj opløselig TEM-data. I den nordlige del af området benyttes resultaterne fra Århus Nord modellen, hvor der har været anvendt en tilsvarende metode til generering af geologien. Den sidste del af området (vest og øst) skiller sig ud ved at være baseret på Model97, som oprindeligt er tolket i en 4-lagsmodel. Opløseligheden af den Model97-baserede geologi vil derfor være betydelig grovere end den TEM-baserede geologi. Det skal desuden bemærkes, at store dele af Brabranddalen og det meste af Bederdalen er beskrevet på baggrund af Model97.

Tilsvarende vil den overfladenære geologiske model fremstå uhomogen pga. varierende datagrundlag indenfor modelområdet. Den bedste opløsning haves i områder, hvor der er PACES-data til rådighed for tolkningen. Dette resulterer i en høj opløsning af geologien i både horisontal og vertikal retning. I andre områder er geologien i de øverste 30 meter baseret på lertykkelseskort, hvilket resulterer i en god horisontal opløsning men en relativ dårlig vertikal opløsning. I de resterende områder er den overfladenære geologiske tolkning baseret på samme metode som for de dybe lag.

Det fremgår, at detaljeringsgraden, hvormed geologien beskrives, varierer over området. Det vurderes imidlertid ikke som værende et problem for modellens anvendelighed. I nogle områder opnås der en høj opløsning af de geologiske heterogeniteter, hvilket kan være vigtigt i forbindelse med kvantificering af transporttider og stoftransport. Det har generelt mindre betydning for beregning af vandflukse, den overordnede trykniveauvariation og bestemmelsen af indvindingsoplande/infiltrationsområder. Det skal understeges, at ovenstående betragtninger kun gælder mht. skalaen, hvorpå kortlægningen foretages og ikke tolkningsmetoden, der benyttes.

2.3.2 Tolkning af hydrofacies

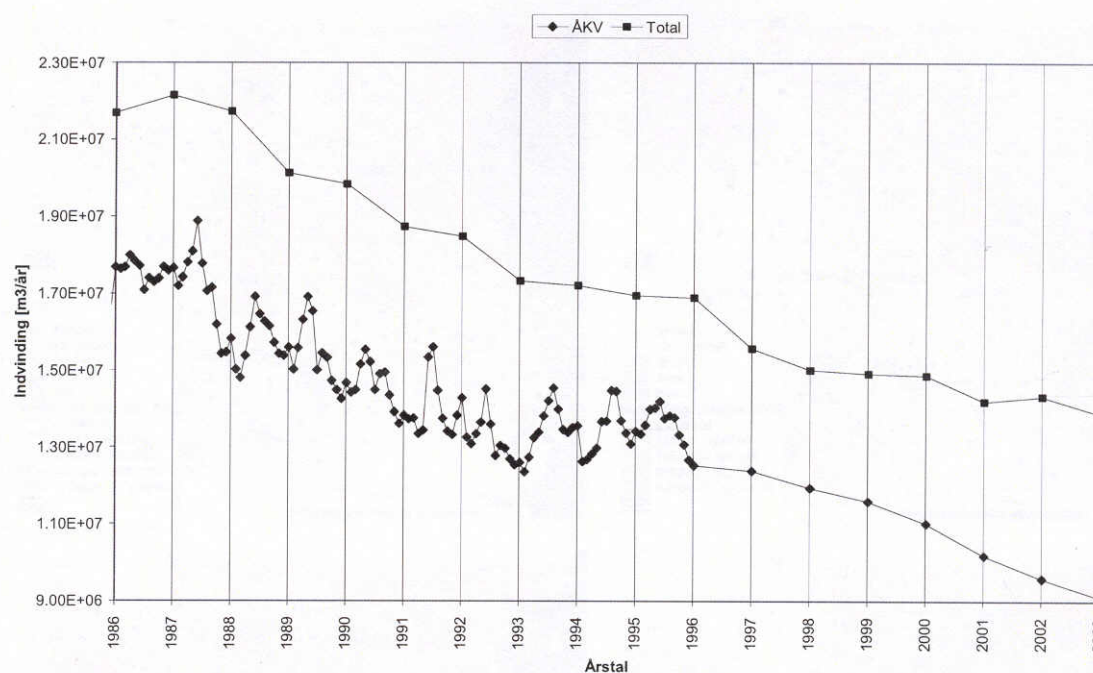
De geofysiske undersøgelser (TEM og PACES) giver, som beskrevet ovenfor, mulighed for at generere en geologisk model med forholdsvis høj opløselighed. Det er imidlertid ikke klart, hvad nøjagtigheden på metoden er eller hvor stor usikkerhed, der er på tolkningen. TEM-data benyttes i det meste af modelområdet til fastlæggelse af dybden til prækvartæroverfladen, som udgøres af tertiært ler. TEM-data benyttes i denne sammenhæng til at bestemme dybden til den gode leder, hvilket er en velkendt og acceptabel måde at udnytte dataene på.

De geofysiske data anvendes også til en rumlig tolkning af geoenheder i intervallet mellem den gode leder (tertiært ler) og terræn. Tolkningen af den interne geologiske opbygning af de kvartære aflejringer forudsætter, at der er en entydig sammenhæng mellem resistivitet og hydrauliske ledningsevne. Som anført i DHI (2005a), kan der være flere årsager til, at en sådan entydig sammenhæng ikke eksisterer. GEUS har ikke kendskab til videnskabelige undersøgelser, der dokumenterer metodens nøjagtighed, usikkerhed og begrænsninger. Det kunne derfor være ønskeligt, om den benyttede tolkningsmetode blev underkastet en analyse og testet mod geologiske data (se afsnit 4 for yderligere detaljer). På basis af erfaringer fra Århus Nord arbejdet (DHI, 2002) fremstår metoden imidlertid som lovende i forbindelse med kortlægning af geologien i områder med meget komplekse aflejringer.

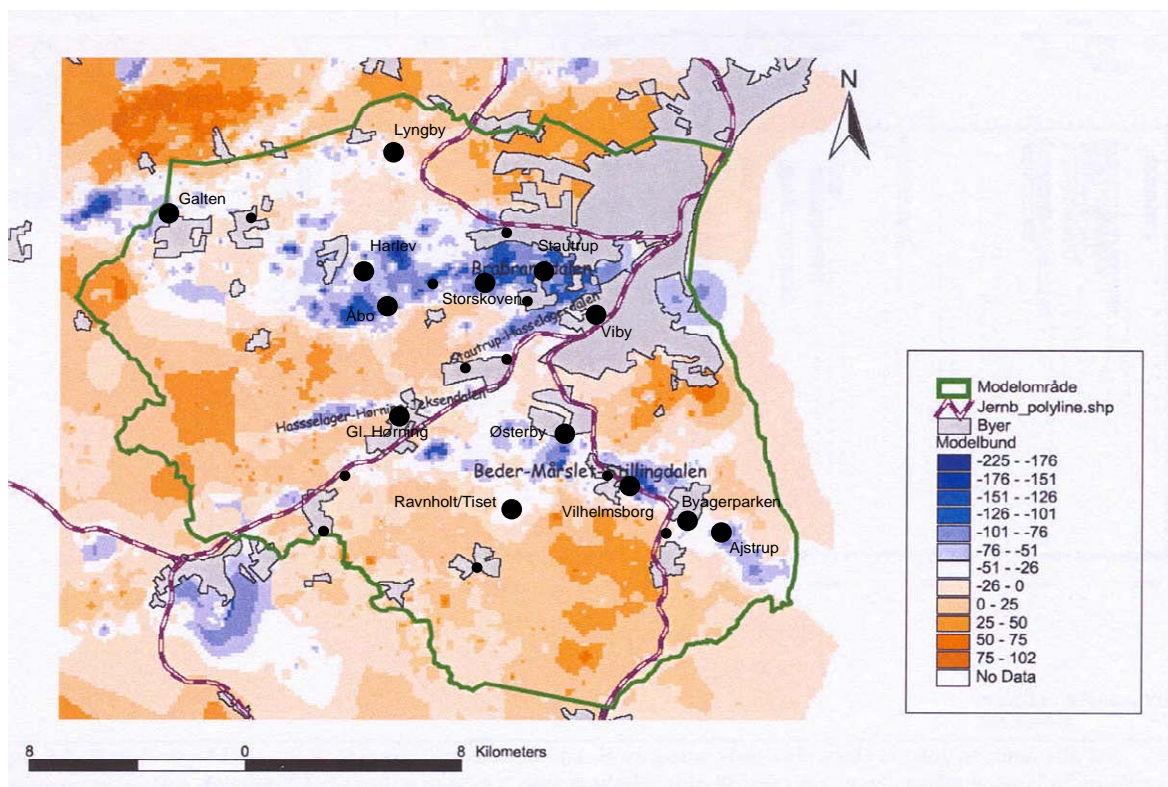
2.4 Grundvandsindvinding

Da der benyttes en stationær model til simulering af grundvandsstrømningen i Århus Syd området, er det relevant at kigge nærmere på ændringer i områdets randbetingelser (nettonedbør, grundvandsindvinding) over tid. Mens der ikke umiddelbart kan identificeres en trend i nettonedbørens udvikling i perioden 1981-2004, har der været en tydelig udvikling i grundvandsindvindingen.

Fra 1986 til 2003 er den totale grundvandsindvinding i modelområdet faldet jævnt fra ca. 22 mio. m³/år til ca. 15 mio. m³/år, se figur 3. Udtrykt som fladebelastning svarer det til et fald fra 53 til 36 mm/år. I 2003 blev ca. halvdelen af den totale indvinding produceret fra Århus Kommunale Værkers (ÅKV) fem største kildepladser: Stautrupværket (2.1 mio. m³), Bederværket – Vilhelmsborg (1.6 mio. m³), Bederværket – Byagerparken (1.4 mio. m³), Ravnholt/Tiset kildeplads (1.2 mio. m³) samt Vibyværket (1.1 mio. m³), se figur 4 for placering. Den årlige indvinding fra de enkelte kildepladser har varieret relativt kraftigt siden 1981, hvilket bl.a. skyldes, at nogle kildepladser (f.eks. Holmstrupværket, Holmeværket, Lysengværket) er taget ud af drift. Eksempelvis har den årlige indvinding ved Stautrupværket varieret mellem 1.9 mio. m³ (1999) og 4.2 mio. m³ (1987).



Figur 3 Indvindingspres i modelområdet i perioden 1986-2003. ÅKV betegner Århus Kommunale Værker (DHI, 2005a).

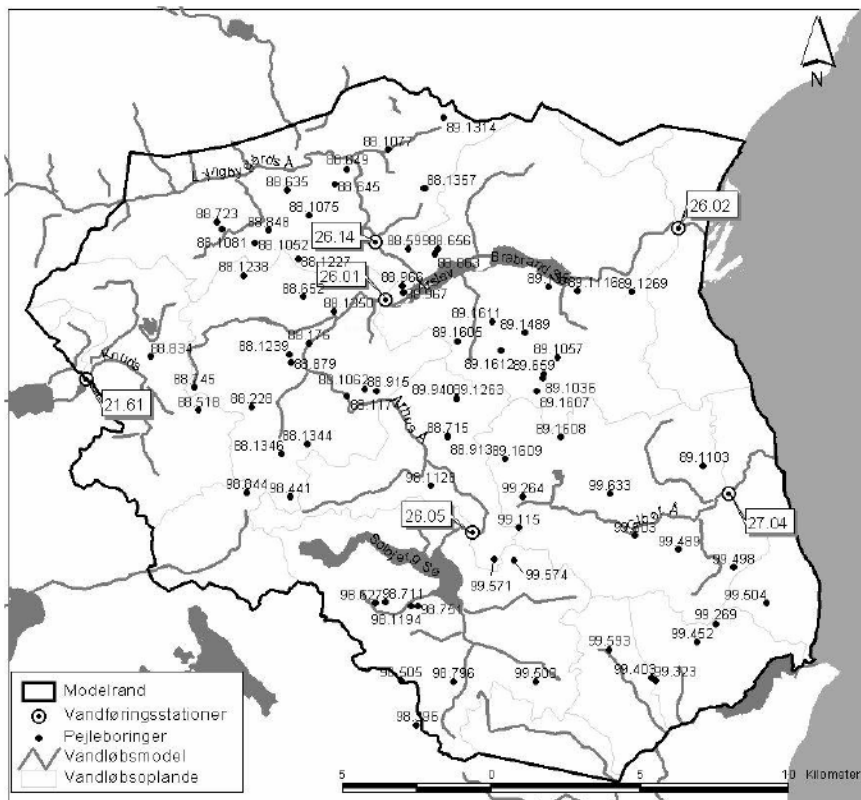


Figur 4 Illustration af dybden til prækvartæroverfladen, som tydeligt viser placeringen af de begravede dale i området. De største kildepladser i 1999 er angivet med sorte cirkler, hvor en stor cirkel markerer årlig indvinding på mere end 250000 m³, mens små cirkler repræsenterer indvindinger i intervallet 100000–250000 m³/år (baseret på DHI, 2005a).

2.5 Modelkalibrering

2.5.1 Kalibreringsopsætning

Modellen er kalibreret med anvendelse af en nettonedbør, der repræsenterer middelværdien i perioden maj 1999 – maj 2004. Den samme periode er anvendt til beregning af middelvandløbsafstrømning, der benyttes som kalibreringsdata. Indvindingsdata baseres for Århus Kommunale Værkers vedkommende på perioden januar – september 2004, som ekstrapoleres til at dække årlige indvindinger. For øvrige vandværker benyttes indvindingsdata fra 2003. Der kalibreres mod hydraulisk trykniveau fra synkronpejlinger udført primært i maj – juni 2004, se figur 5 for fordeling. Dette datasæt giver en relativ jævn geografisk dækning, og alle de pejlede borer er præcist indmålt. Samtidig ligger de pejlede borer generelt så langt væk fra større indvindinger, at målingerne er relativt upåvirkede af indvindingsboringernes sænkningstragt (DHI, 2005a).



Figur 5 Fordeling af trykniveaudata og vandløbsafstrømning anvendt til kalibrering. (DHI, 2005b).

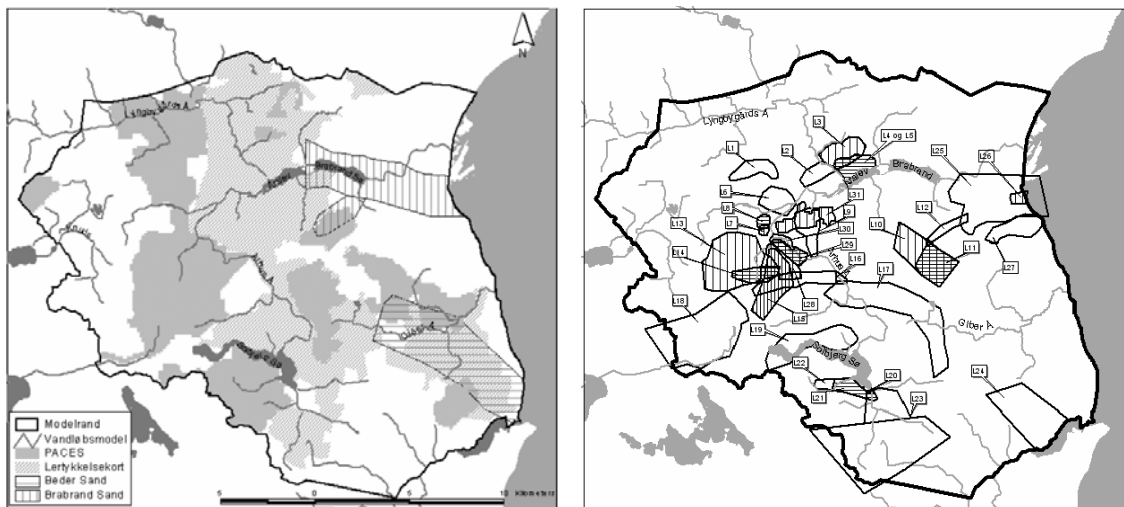
Der er forholdsvis god overensstemmelse mellem perioden, hvorpå randbetingelserne (nettonedbør og grundvandsindvinding) og kalibreringsdata (vandløbsafstrømning og hydraulisk trykniveau) er baseret. Ideelt set ville det være ønskeligt at basere trykniveaudata på målinger, der repræsenterer perioden maj 1999 – maj 2004 eller årsmiddelt fra 2004, som er grundlaget for indvindingsdata. Det kræver imidlertid, at der for hver boring er et tilstrækkeligt godt pejledatasæt til rådighed, således at repræsentative middelværdier kan beregnes.

Modellen kalibreres vha. optimeringsprogrammet AUTOCAL (DHI, 2004), som er baseret på en global optimeringsalgoritme benævnt shuffled complex evolution metoden. Der kalibreres både mod observationer af hydraulisk trykniveau og vandløbstilstrømning. Kalibreringsparametrene udvælges på baggrund af en sensitivitetsanalyse, der initielt resulterer i udvælgelse af 13 parametre, som efterfølgende estimeres.

I kalibreringsprocessen blev det klart, at det ikke var muligt at tilpasse parameterværdierne af de fem definerede hydrofacies således, at der kunne opnås en tilfredsstillende overensstemmelse mellem observerede data og modelresultater (DHI, 2005b, bilag A). På figur 6 ses hvilke ændringer, der er foretaget på den oprindelige geologiske model beskrevet i afsnit 2.2, for at opnå et bedre kalibreringsresultat. Ud over større zoner, som har fået egne hydrofacies tilknyttet (figur til venstre), er der introduceret 31 større og mindre linser (figur til højre), hvor de oprindelige geoenheder er udskiftet med andre af de allerede definerede geoenheder (f.eks. sand med ler).

Pga. problemer med vandløbstilstrømningen til Århus Å er der under kalibreringsfasen opstillet en alternativ geologisk model, hvor den østligste del af den geologiske linse i Jeksendalen (L16 på figur 6 til højre) er fjernet, og der er indført ændringer i beskrivelsen af kontak-

ten til Århus Å umiddelbart nord for Jeksen-dalen. Den nye model benævnes model 25. februar, mens modellen baseret på den oprindelige geologi benævnes model 18. februar.

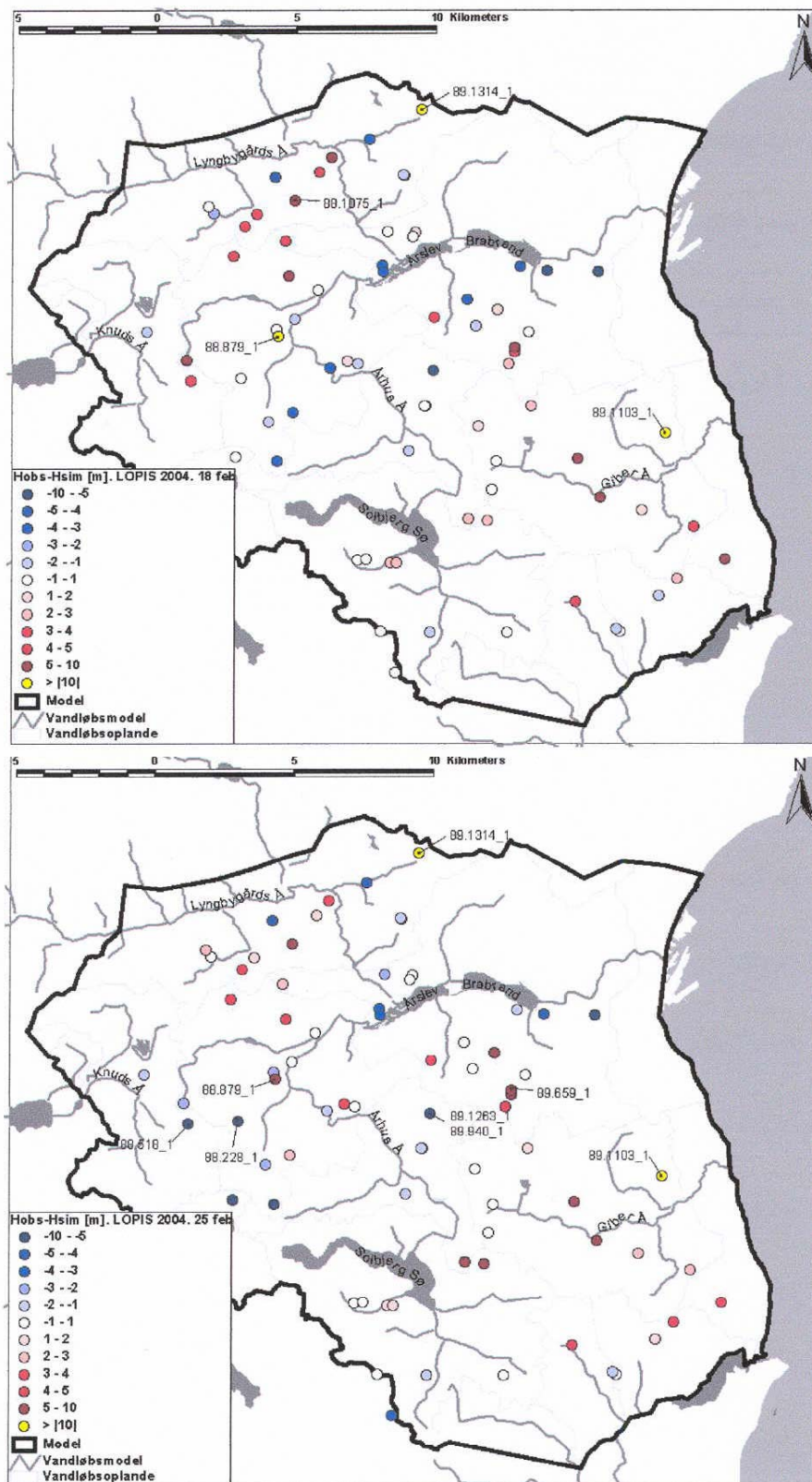


Figur 6 Illustration af zoner og linser introduceret i den geologiske model. Til venstre ses større zoner bestående af Brabrand dalen, Beder dalen, PACES områder og Lerdykkese kortområder. Til højre ses linser indført gennem kalibreringsprocessen. (DHI, 2005b).

2.5.2 Kalibreringsresultater

Begge modeller kalibreres således, at der opnås en overensstemmelse mellem observeret og simuleret hydrauliske trykniveau, der overholder kravene til en HiFi model angivet i Sonnenborg (2001). Den gennemsnitlige fejl (ME) findes for begge modeller til 2 centimeter, mens RMS-værdier for de to modeller findes til 3.94 m og 4.20 m for hhv. 18. februar og 25. februar modellen. På figur 7 ses residualernes fordeling for de to modeller. Den geologiske heterogenitet taget i betragtning fremstår overensstemmelsen med tryknivaudata acceptabel. Mht. vandløbsafstrømning opnås der en marginalt bedre overensstemmelse i beskrivelsen af tilstrømningen til station 26.01 Skibby (på Århus Å) med model 25. februar. Model 25. februar simulerer 5% mere tilstrømning til station 26.01, hvilket resulterer i, at kalibreringskravet på en Fbal-værdi mindre end 10% opfyldes.

Mht. parameterestimater opnås der for et par af de definerede hydrofacies problematiske værdier. For sand i Brabranddalen estimeres en horisontal hydrauliske ledningsevne på $7.4 \cdot 10^{-6}$ m/s med 18. februar model, mens der med 25. februar modellen opnås en værdi på $1.2 \cdot 10^{-5}$ m/s. Resultatet for 18. februar modellen falder udenfor det interval, der i DHI (2005a, tabel 4.3) er defineret som grænserne for acceptable parameterestimater, mens estimatet fra 25. februar modellen er tæt på den nedre grænse i intervallet ($1 \cdot 10^{-5}$ - $1 \cdot 10^{-3}$ m/s). Begge værdier er overraskende lave taget i betragtning, at der er tale om et magasin, hvorfra der oppumpes adskillige mio. m³ vand om året.



Figur 7 Øverst: Kalibreringsresultat for model 18. februar. Nederst: Kalibreringsresultat for model 25. februar (DHI, 2005b).

For geoenheden "Sand med ler" tolket på baggrund af lertykkelseskortet estimeres der en vertikal hydrauliske ledningsevne på hhv. $1.11 \cdot 10^{-8}$ og $1.04 \cdot 10^{-8}$ m/s for model 18. februar og 25. februar, hvilket er under den værdi, der i DHI (2005a, tabel 4.3) er vurderet realistisk. Samtidig opnås der anisotropifaktorer på ca. en faktor 1000, hvilket vil betyde, at vandet i denne enhed vil have meget lettere ved at strømme horisontalt frem for vertikalt. Det kan ikke afvises, at et så højt anisotropiforhold kan være realistisk, men det vil sandsynligvis kræve en ganske veludviklet stratificering af sedimenterne.

Umiddelbart indikerer kalibreringsresultatet, at der er problemer med estimation af parameterværdierne for Brabrandssand. Da der anvendes en global optimeringsalgoritme, hvor sandsynligheden for at havne i et lokalt minimum er relativt lille, og da den inverse models resultater i øvrigt ikke indikerer, at der er problemer med ekstreme parameterusikkerheder eller høj parameterkorrelation, må det antages, at eventuelle fejl på de estimerede parametre kun kan skyldes to faktorer: (1) Fejl på de kalibreringsdata, som modellen fittes imod, og (2) fejl på den konceptuelle model, dvs. randbetingelser, geologisk model, etc. Det antages her, at kvalitetskontrollen på kalibreringsdata har været så grundig, at der kun optræder mindre deciderede fejl på disse data. Hvis der er fejl på den konceptuelle model, vil optimeringsalgoritmen kompensere for disse fejl ved at finde tilsvarende fejlagtige parameterestimater, således at de to fejl så vidt muligt ophæver hinanden. Resultaterne indikerer derfor, at der er problemer med den konceptuelle model omkring Brabranddalen, hvilket bl.a. kan skyldes, at de geologiske forhold i Brabrand dalen er meget komplicerede, fordi dalen er bred og opfyldningen er foregået under meget vekslende afstrømnings forhold. Problematikken behandles yderligere i afsnit 4.

2.6 Modelvalidering

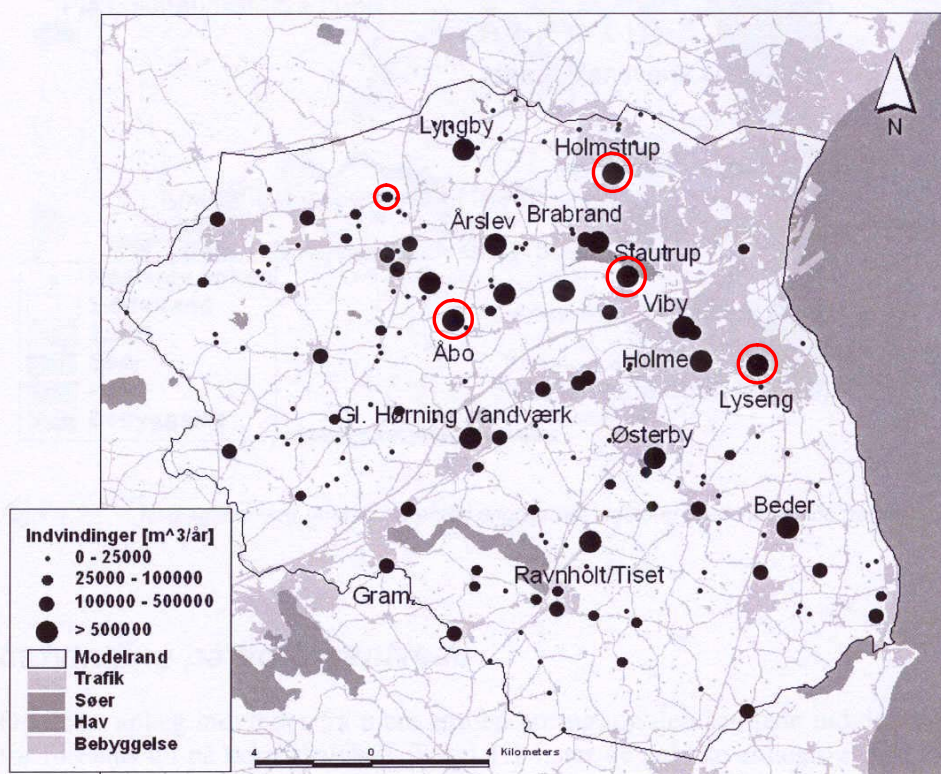
2.6.1 Validering mod trykniveaudata

DHI (2005b) præsenterer en metode til validering af en stationære model, som på en fornuftig måde udnytter den tilgængelige informationen om inputvariable og kalibreringsdata. Der er udvalgt to år (2001 og 1995), hvor der eksisterer et repræsentativt observationsdatasæt, som modelresultaterne kan sammenlignes med. Der benyttes nettonedbør, som er midlet over en fire- til fem-årig periode forud for tidspunktet for måling af observationerne, mens der benyttes en indvindingsmængde fra kildepladserne, der er midlet over det forudgående år. Dette valg er foretaget ud fra en forventning om systemets responstid på de to inputvariable, og valgene virker umiddelbart fornuftige. Endelig er der foretaget en dynamisk simulering, som kan bidrage til vurdering af modellens prediktionsevne.

Valideringsdataene fra 2001 dækker næsten udelukkende den sydlige del af modelområdet, og kan således primært anvendes til validering af forholdene i Bederdalen og de omkringliggende magasiner. Valideringstesten resulterer i en overensstemmelse mellem observeret og simuleret observationsdata, som svarer nøje til kalibreringsresultatet, og det må derfor konkluderes, at modellen passerer denne test uden problemer.

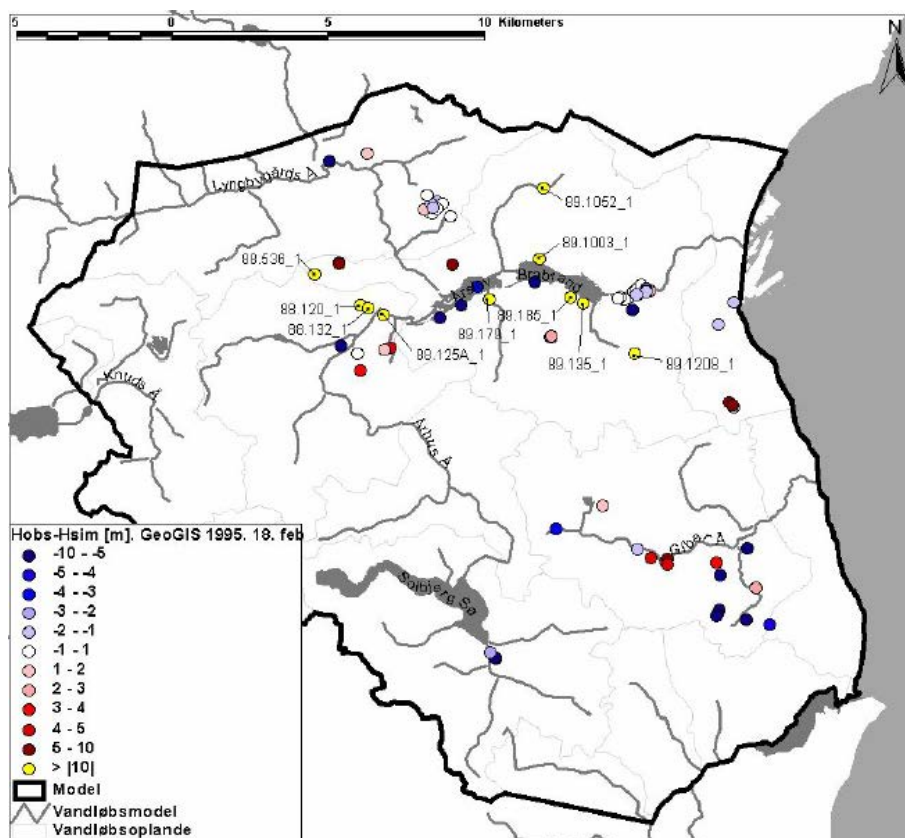
Valideringstesten mod data fra 1995, som primært dækker den nordlige del af modelområdet, viser, at adskillige indvindingsboringer primært lokaliseret i Brabranddalen bliver tør-lagte, se figur 8. Dette kunne tilskrives, at der benyttes en stationær model, og at der ikke er stationære tilstande i magasinet, men da 1995 ligger midt i en periode, hvor indvindingsstryk- ket er på vej ned, anses det ikke for en sandsynlig forklaring. Yderligere er der tilsvarende problemer ved stort set de samme kildepladser i den dynamiske simulering, hvilket underbyg-

ger, at tørlægningen ikke skyldes, at der anvendes en stationær model. I stedet antyder resultatet, at de hydrauliske ledningsevner for de højpermeable enheder er underestimeret og/eller at fordelingen af hydrofacies omkring de tørlagte borer er fejlagtigt beskrevet.



Figur 8 Indvindinger i Århus Syd området. De røde cirkler omkranser kildepladser, hvor indvindingsboringer løber tørre i både model 18. februar og 25. februar i 1995-valideringstesten (baseret på DHI, 2005b).

Valideringstesten på 1995-data resulterer i en RMS-værdi på hhv. 7.34 m og 7.93 m for model 18. februar og 25. februar, hvilket er ca. dobbelt så højt som for kalibreringsperioden. RMS-værdier på 7-8 m svarer ifølge ståbien (Sonnenborg, 2001) til, at modellen overholder kravene til en såkaldt "konservativ" akvifer simulering. Ses der på den rumlige fordeling af afvigelserne mellem observeret og simuleret hydraulisk trykniveau i 1995, se figur 9, findes der specielt i Brabranddalen mange afvigelser på mere end 10 m. Ifølge DHI (2005b) medfører valideringsresultatet, at modellen ikke er velegnet til at beskrive potentialeforhold under væsentlig anderledes indvindings- og klima-forhold end dem, der er kalibreret mod.



Figur 9 Valideringsresultat for model 18. februar (DHI, 2005b).

2.6.2 Dynamisk validering

Den dynamiske simulering viser generelt, at systemets dynamik (responstid på ændringer i drivende variable) simuleres fornuftigt, men at niveauet for det hydrauliske trykniveau reproduceres mindre godt. Sammenligninger med målt vandløbsafstrømning og opgørelser af vandbalancer viser, at modellen med stor sandsynlighed reproducerer vandbalancen i området korrekt. Der opnås gode vandbalancer for de enkelte år, og taget i betragtning at der ikke er kalibreret på de dynamiske parametre, opnås der et fornuftigt resultat mht. simulerede afstrømningshydrografer. Dette indikerer, at den anvendte nettonedbør er præcist estimeret.

2.6.3 Validering mod grundvandsaldre

I Århus Amt (2005) gennemføres en sammenligning af grundvandsaldre for udvalgte kildepladser baseret på hhv. partikelbanesimuleringer (foretaget med både model 18. februar og 25. februar) og aldre vurderet ud fra vandkemiske data. Indledningsvist skal det bemærkes, at det kan være problematisk at sammenligne målte og simulerede grundvandsaldre i indvindingsboringer, når der anvendes en stationær strømningsløsning. De fleste kildepladser er installeret efter anden verdenskrig, hvor vandbehovet har udviklet sig dramatisk. Der har derfor eksisteret et andet strømningsystem før grundvandsindvindingen for alvor udviklede sig. Ændringen i indvinding betyder, at strømningsløsninger baseret på aktuelle indvindingsrater vil adskille sig fra strømningsløsningen for det upåvirkede system. Det vand, der blev dannet for eksempelvis 200 år siden, har derfor været udsat for gradientforhold, der adskiller sig fra

de aktuelle, i de første ca. 150 år af den samlede opholdstid, mens det kun har været påvirket af det pumpepåvirkede strømningssystem i de sidste ca. 50 år. Hvis transporttiden til indvindingsboringen er så stor, at vandet i indvindingsoplandet er dannet før boringen blev installeret, vil der blive simuleret fejlbehæftede aldre, når resultaterne udelukkende baseres på en indvindingspåvirket strømningssløsning. Hvis det for simpelhedens skyld antages, at vandet følger de samme strømningsveje i de to situationer, men pga. øgede gradienter opnår en højere hastighed i pumpesituationen, vil modellen prediktere en alder, der er lavere end den sande alder. I virkeligheden vil indvindingen naturligvis også påvirke strømningmønsteret i magasinet, og det er derfor ikke muligt at opstille generelle regler for, på hvilken måde de simulerede aldre adskiller sig fra de sande aldre.

Ud over problemet beskrevet ovenfor, vil en sammenligning af aldre baseret på vandkemi og CFC-analyser med aldre baseret på partikelbanesimuleringer lide under, at partikelbaneløsningen resulterer i en såkaldt kinematisk alder, mens CFC-resultater resulterer i tilsyneladende aldre (se Sonnenborg et al., 2005, for en uddybende forklaring). Endelig er der en betydelig usikkerhed på aldre vurderet ud fra vandkemi og CFC analyser. Modellens evne til at reproducere de ”målte” grundvandsaldre kan derfor kun give en indikation af, om modellen simulerer opholdstiderne korrekt.

Under disse forbehold viser resultaterne præsenteret i Århus Amt (2005), at der er tendens til god overensstemmelse mellem observerede og simulerede grundvandsaldre for indvindingsboringer i Beder-dalen, mens der for flere af boringerne i Brabrand-dalen (Constantinborg, Harlev, Viby kildepladser) er tendens til, at modellerne simulerer for gammelt vand. Der er stor forskel på de to modellers simulerede grundvandsaldre for indvindingsboringer i og umiddelbart omkring Jeksen-dalen (Adslev, Gl. Hørning, Jeksen vandværker), hvilket understreger den store betydning, de strukturelle ændringer i dette område har.

Pga. problemerne forbundet med at teste modellens alderssimuleringer mod observerede aldre for indvindingsboringer, kan der ikke drages entydige konklusioner mht. modellens evne til at simulere opholdstidsfordelingerne. Sammenholdes tendensen til simulering af for gammelt vand i Brabranddalen med de lave estimater for de hydrauliske ledningsevner, er der imidlertid grund til stille spørgsmålstejn ved modellens prediktionsevne i dette område.

2.7 Samlet vurdering af modellens troværdighed

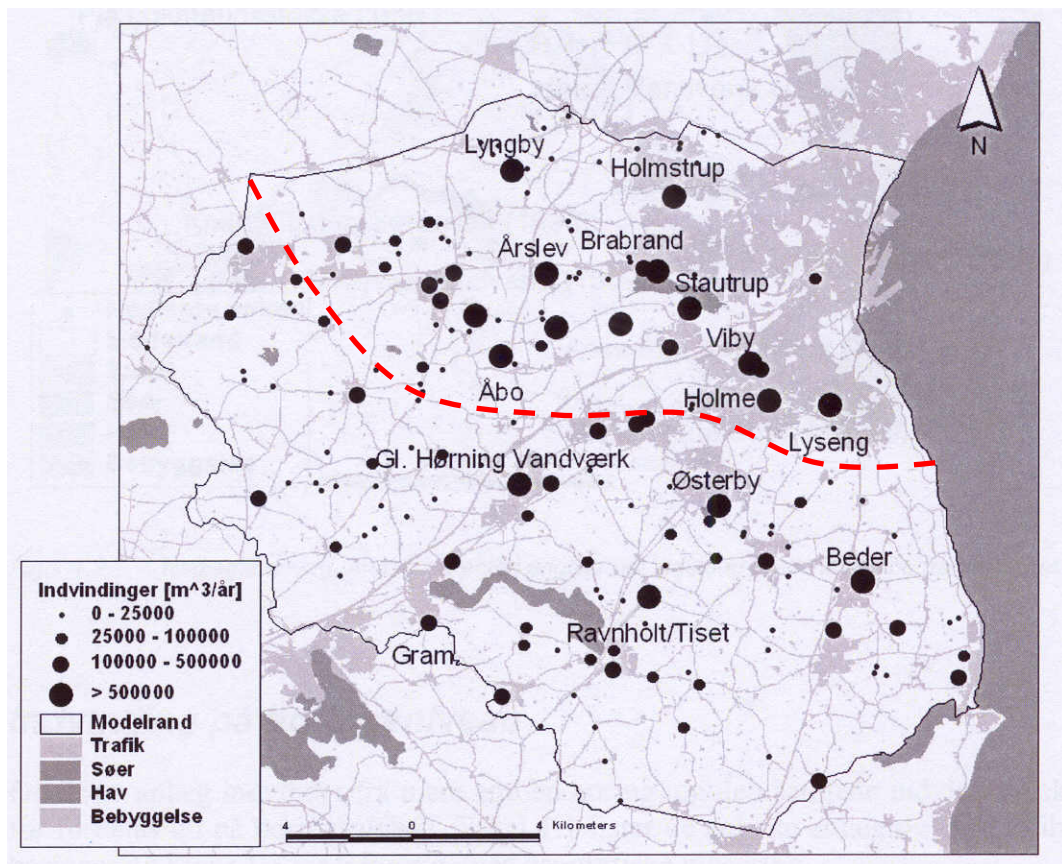
Kalibreringsresultaterne indikerer, at der opnås en grundvandsmodel, der med høj præcision simulerer hydraulisk trykniveau og gennemsnitlig vandløbsafstrømning i kalibreringssituationen. Det må derfor forventes, at modellen for denne situation giver en forholdsvis nøjagtig beskrivelse af strømningsveje (som er styret af trykniveaufordelingen) og vandbalancer.

Det konkluderes, at modellen er falsificeret i forbindelse med simulering af trykniveau i og omkring Brabranddalen under klima- og indvindingsforhold der afviger signifikant fra niveauet anvendt under modelkalibreringen. Denne konklusion er baseret på følgende resultater: (1) der opnås parameterestimater, der ligger udenfor, hvad der anses som realistisk for geoenheden Brabrandssand, (2) der opnås et forholdsvis ringe match til valideringsdata fra 1995, samt (3) flere indvindingsboringer i og omkring Brabranddalen løber tørre i valideringstesten. Da der er en tæt sammenhæng mellem simulering af trykniveaufordeling og infiltrationsområder vha. partikelbanesimulering vurderes det, at modellen i det nordlige område ikke er egnet som grundlag for udførelse af managementscenarier, hvor nettonedbør eller indvinding ændres markant fra værdierne benyttet under kalibrering af modellen.

På figur 10 ses, hvor i modelområdet det vurderes, at modellen har en begrænset anvendelighed (se nedenfor). Placeringen af skillelinien mellem områder med hhv. høj og lav trovær-

dighed er primært baseret på figur 8 og 9, samt figur 6 (venstre side) hvor placeringen af Brabrand sand er vist. Syd for den angivne skillelinie vurderes det, at modellen har en høj troværdighed, og at modellens resultater kan benyttes både i kalibreringssituationen og i prediktionssituationer til evaluering af vandbalancer, trykniveaufordeling og placering af kildepladsernes infiltrationsområder.

I det nordlige område, hvor modellen ikke passerede valideringstesten, vurderes det kun rimeligt at benytte de kildepladsspecifikke resultater fra model 18. februar og 25. februar i det tilfælde, hvor randbetingelserne (bl.a. indvinding og nettonedbør) svarer til kalibreringssituationen. Det frarådes derfor at basere udpegningen af hhv. sandsynlighedsområder og kerneområder på scenarieberegninger, hvor indvinding og/eller nettonedbør ændres markant. Desuden frarådes det at anvende scenarieberegningerne til (bl.a. fordi indvindingsmængder omfordes mellem kildepladser og indsatsområder) at udføre evalueringer af vandbalance og grundvandsdannende områder på kildepladsniveau eller for de enkelte indsatsområder. Til gengæld vurderes det at være rimeligt at benytte scenarieberegningerne i det nordlige område til evaluering af den samlede vandbalance og det samlede grundvandsdannende område indenfor fokusområdet under et. Der skal i den forbindelse tages forbehold for, at modellen i det nordlige område har en ringere evne til at prediktere trykniveaufordelingen (jvnf. valideringstesten på 1995-data), og at der derfor må forventes en relativ stor usikkerhed på det samlede grundvandsdannende områdes udstrækning og placering op mod den nordlige grænse af modelområdet. Analysen af kerneoplande bør i det nordlige område kun baseres på resultater fra de to kalibreringskørsler. Det anses derfor ikke som muligt på baggrund af modelresultaterne alene at kvantificere sikkerheden, hvormed et givet delområde af de bestemte infiltrationsområder (grundvandsdannende oplande til kildepladser) udgør infiltrationsområde til kildepladsen. For at foretage en differentiering af de simulerede infiltrationsområder er det nødvendigt at inddrage yderligere information, f.eks. i form af rimelighedsbetragtninger baseret på infiltrationsområdets placering. Pga. problemer med den hydrauliske ledningsevne for Brabrand Sand skal partikelaldre i denne del af området benyttes med forsigtighed.



Figur 10 Syd og vest for den stiplede linie vurderes modellen at have høj troværdighed, mens den nord for linien vurderes at have begrænset anvendelighed.

3 Vurdering af kildepladsspecifikke kerneoplande

3.1 Metode til udpegning af kerneoplande

For at belyse usikkerheden på infiltrationsområder til kildepladserne i Århus Syd området er der gennemført partikelbanesimuleringer med fem forskellige modelopsætninger. Foruden de to kalibrerede modeller (hhv. 18. februar og 25. februar), er det på baggrund af en evaluering af de to modellens resultater for primært grundvandsaldre (Århus Amt, 2005) valgt at benytte modellen benævnt 25. februar som basis for tre management scenarier. I scenarium 1 er der ændret på indvindingsraterne ved kildepladserne, så der opnås en fordeling, der svarer til Århus Kommunale Værkers 2005-indvinding, men hvor den totale indvinding er den samme som benyttet i kalibreringen. I scenarium 2 er indvindingerne fastsat til tilladte mængder, og den samlede grundvandsindvinding er dermed stærkt forøget i forhold til kalibreringssituationen (ca. 30% forøgelse). Scenarium 3 benytter en nettonedbør, der udgør 70% af nettonedbøren specificeret i kalibreringssituationen. Scenarium 2 udpeges til basismodellen, som der lægges størst vægt på. Det skal bemærkes, at det er indvindingsraten ved samtlige kildepladser, der samtidigt er øget til den tilladte mængde, der er simuleret i scenarium 2.

Der benyttes følgende metode til udpegning af sårbare områder (se også appendix 1): Først udpeges områder, hvor alle fem modeller har partikler, som ender i kildepladsens indvindingsboringer (dvs. infiltrationsområder til kildepladsen). Disse områder benævnes fællesmængden. Fællesmængden udpeges med basis i scenarium 2 resultaterne. Partikler i scenarium 2, hvor der indenfor en radius på 25 m forefindes mindst én partikel fra hver af de fire andre simuleringer, defineres som hørende til fællesmængden.

Herefter udpeges et bruttokerneopland, der som udgangspunkt dækker et område, som omkranser fællesmængden. Undtagelser herfra inkluderer områder med isolerede og få/spredte partikler, der som hovedregel udelades af bruttokerneoplandet. Desuden vurderes det, ved at sammenligne scenarium 1 og 2, om indvindingsraten har stor indflydelse på placeringen af infiltrationsområdet. Hypotesen er, at der ved store kildepladser skabes en signifikant sænkningstragt, hvilket betyder, at modellens simulering af det generelle potentiale er mindre betydningsfuld. Omvendt antages, at ved små kildepladser, hvor der ikke genereres en stor sænkningstragt, vil det lokale grundvandspotentiale være bestemmende for placeringen af infiltrationsoplandet til kildepladsen. I sidstnævnte tilfælde er det derfor vigtigt, at modellen reproducerer de observerede gradientforhold tilfredsstillende.

Endelig foretages der en vurdering af datagrundlaget (en implicit vurdering af usikkerheden) i det definerede bruttokerneopland, og kerneoplande udpeges kun i områder, hvor usikkerheden på data og model anses for relativ lille. For den dybe geologi (> 30 m) anses Model97-baseret geologi for relativ usikker. For den overfladenære geologi (< 30 m) vurderes geologi baseret på Model97 samt områder, hvor lertykkelseskortet viser lertykkelser under 15 m, som værende relativ usikker. Hvis både den overfladenære og den dybe geologi under bruttokerneoplandet vurderes at være usikker, udpeges der kun undtagelsesvist kerneoplande.

Det er ikke klart, om det er fordelingen af geoenheder eller de estimerede hydrauliske ledningsevner, der anses som den primære kilde til usikkerheden. Fremgangsmåden viser imidlertid, at den interne geologi i store dele af modelområdet anses for relativ usikker. Det ville derfor have været ønskeligt, om denne usikkerhed var blevet kvantificeret gennem modelscenarier. Hvis usikkerhedsanalysen f.eks. viste, at geologien baseret på det dårlige datagrundlag kun have marginal betydning på placeringen af infiltrationsområdet, ville det være uhensigtsmæssigt at tillægge det dårlige datagrundlag stor betydning for udpegningen af infiltrationsområder.

Det er i Århus Syd arbejdet valgt at tilstræbe maksimal sikkerhed ved udpegningen af kerneoplande. Derfor vil kun områder, hvor alle fem modeller har samme infiltrationsområde kunne udgøre et potentielt kerneområde. Generelt må det anbefales, at der defineres en sandsynlighed, f.eks. 90% sandsynlighed for at et område tilhører infiltrationsområdet. Metoden, der benyttes i Århus Syd, bygger grundlæggende på eksistensen af områder, hvor alle fem modeller har samme infiltrationsområde. Denne fremgangsmåde vil teoretisk set kunne resultere i, at det ikke er muligt at udpege et kerneopland, da de forskellige modeller kan have infiltrationsområder, som ikke er overlappende. Problemet øges, hvis man tænker sig en situation, hvor der gennemføres et stort antal usikkerhedsscenarier. Sandsynligheden for at kunne identificere et område, hvor alle modeller har partikler, der tilhører de respektive infiltrationsområder, vil falde med antallet af scenarier, der gennemføres. En grundig usikkerhedsanalyse vil med den anvendte metode derfor være utilbøjelig til at udpege bruttokerneoplande, alternativt resultere i meget små bruttokerneoplande. I det aktuelle tilfælde, hvor der kun er gennemført fem scenarier, vurderes den anvendte fremgangsmåde imidlertid at være acceptabel, da der samtidig foretages en subjektiv vurdering af resultaterne.

Efter at kerneoplandet er fastlagt, udpeges der et såkaldt sandsynlighedsområde omkring kerneoplandet, indenfor hvilket det vurderes, at infiltration til kildepladsen kan finde sted. Sandsynlighedsområdet udgøres generelt af området mellem kerneoplandet og foreningsmængden. Så mens kerneoplandet angiver et område, hvor det infiltrerende vand med meget stor sikkerhed vil blive oppumpet ved kildepladsen, så angiver sandsynlighedsområdet et område indenfor hvilket, der kan være relativ stor usikkerhed om, hvorvidt det infiltrerende vand ender i indvindingsboringerne. Hvis der benyttes sandsynligheder, så vil der, baseret på de fem modelsimuleringer, være tæt på 100% sandsynlighed for, at vand, der infiltrerer indenfor kerneoplandet, vil havne i kildepladsens indvindingsboringer. Sandsynlighedsområdet er omvendt defineret således, at risikoen for ikke at inkludere arealer, hvor infiltrerende vand kan strømme til kildepladsen, er relativ lille.

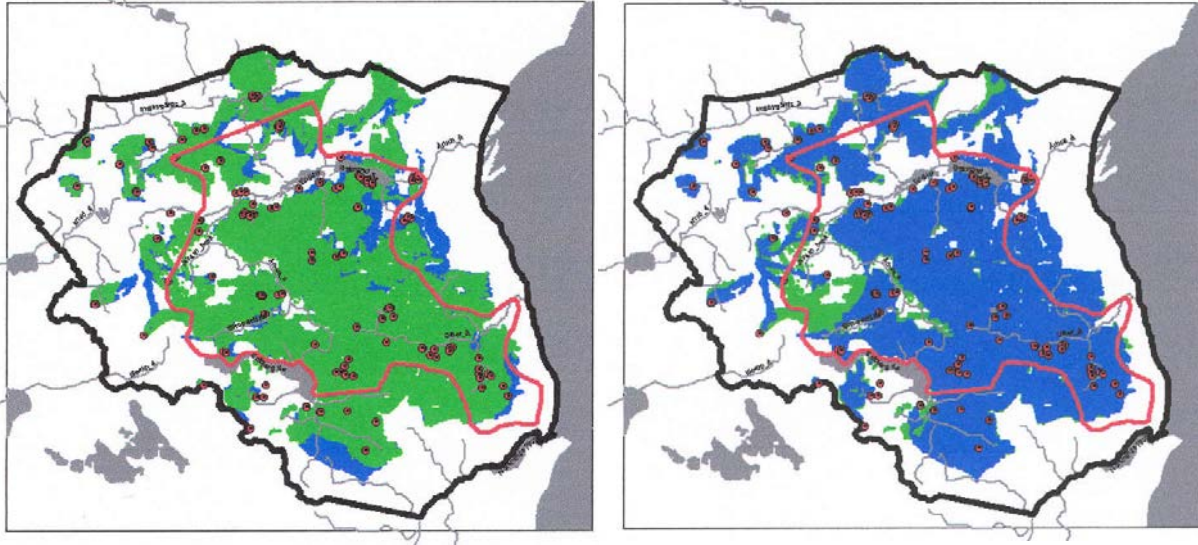
Det skal bemærkes, at mens der for grundvandsindvinding og nettonedbør foretages ændringer i hele modelområdet, er der kun lokale forskelle i geologi mellem 18. og 25. februar modellerne. Der er derfor ikke tale om en stringent analyse af den geologiske usikkerhed, som det normalt opfattes, hvor der eksempelvis benyttes to alternative tolkninger af hele den geologiske model. Baseret på resultaterne i DHI (2005b) vurderes forskellen mellem geologien i de to modeller imidlertid at have så stor betydning for trykniveau og strømningsfelt, at det er rimeligt at vurdere de to sæt resultater som udtryk for en delvis undersøgelse af geologisk usikkerhed.

3.1.1 Vurdering af tolkningsmetoden

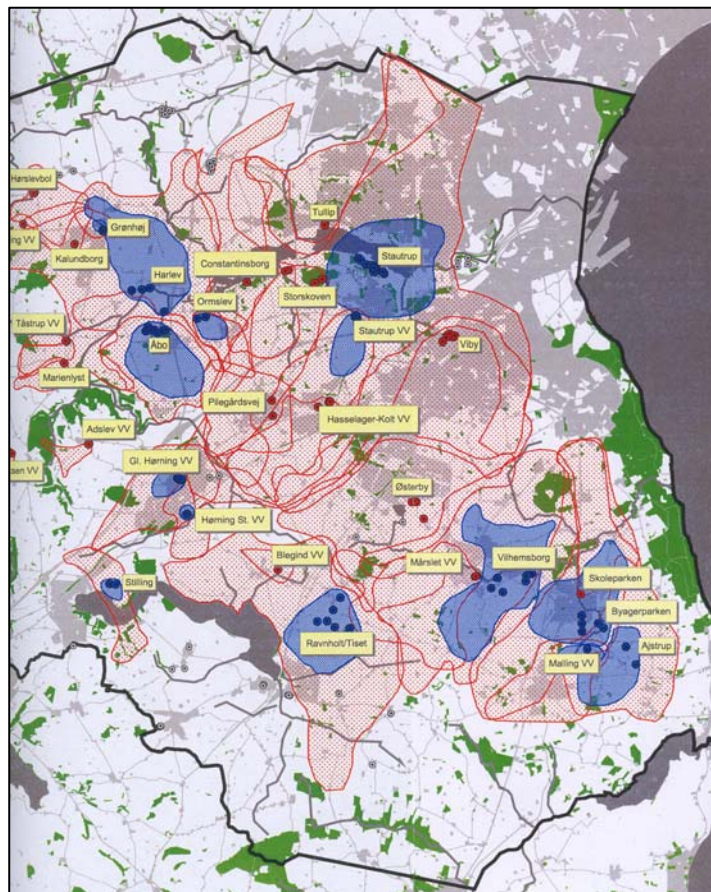
Selve metoden, der benyttes til definition af bruttokerneoplande på basis af fællesmængden af de fem modelsimuleringers infiltrationsområder, vurderes at være en acceptabel metode. Ved udpegningen af kerneoplande er det imidlertid ønskeligt, at de geologiske enheder, der vurderes som værende specielt usikre (Model97 samt ”lertykkelser på under 15 m”), blev inddraget i en usikkerhedsanalyse som eksempelvis et scenarium 6 og 7. Metoden, der benyttes til bestemmelse af bruttokerneoplandet, kunne dermed anvendes direkte til udpegning af kerneoplandet.

Da metoden, der aktuelt er anvendt i Århus Syd opgaven, er meget konservativ, er der risiko for, at der vil ske en undervurdering af antallet og størrelsen af kerneoplande. Ud af de 33 kildepladser i området er der kun defineret kerneoplande for de 14 kildepladser. I gennemsnit udgør grundvandsdannelsen indenfor kerneoplandene kun 40% af den mængde vand, der oppumpes fra de 14 kildepladser (baseret på tal i DHI, 2005c). Denne tendens kan også illu-

streres grafisk. I figur 11 ses det samlede infiltrationsområde fundet med hhv. model 18. februar og 25. februar. Til sammenligning ses i figur 12 områderne, der er defineret som kerneoplande. Det ses, at til trods for, at modellen predikterer, at langt den største del af fokusområdet udgør et infiltrationsområde til en af kildepladserne i området, så er det kun muligt at udpege kildepladsspecifikke kerneoplande, der dækker en lille del af fokusområdet.



Figur 11 Simulering af infiltrationsområder til de eksisterende kildepladser. Til venstre ses model resultater fra model 18. feb. (grøn) over resultater fra model 25. feb. (blå). Til højre er der byttet om på rækkefølgen af de to modellers resultater (DHI, 2005d).



Figur 12 Lokalisering af hhv. kerneoplande (blå) og sandsynlighedsområder (rød) baseret på usikkerhedsanalysen (DHI, 2005c).

3.2 Kildepladsspecifik vurdering af kerneoplande

I det følgende given en vurdering af de enkelte kildepladsers kerneoplande udpeget i DHI (2005c). På det foreliggende grundlag vurderes det, at modellen kan benyttes til at foretage en bestemmelse af kerneoplande på baggrund af en usikkerhedsanalyse ved kildepladserne opskrevet i tabel 1.

Tabel 1 Kildepladser, hvor der med modellen kan udpeges kerneoplande.

Kildeplads	Kerneopland udpeget i DHI (2005c)?	Kommentarer
Adslev	Nej	OK
Bederværket: Ajstrup	Ja	OK
Bederværket: Byagerparken	Ja	OK
Bederværket: Skoleparken	Nej	OK
Bederværket: Vilhelmsborg	Ja	OK
Blegind	Nej	Kerneopland kan udpeges
Gl. Hørning VV	Ja	OK
Hasselager-kolt, Pilegårdsvej	Nej	Kerneopland kan udpeges
Hasselager-kolt, Samlet	Nej	Kerneopland kan udpeges
Hørning St. VV	Ja	Kerneopland kan ikke udpeges
Jeksen	Nej	OK
Malling	Ja	Kerneopland for lille
Mårslev	Nej	Kerneopland kan udpeges
Stillingværket	Ja	Kerneopland for lille
Testrup	Nej	OK
Østerbyværket: Ravnholt/Tiset	Ja	Kerneopland for lille
Østerbyværket: Østerby	Nej	Kerneopland kan udpeges

Pga. modellens begrænsninger nord for skillelinien angivet på figur 10, foretages der kun en vurdering af kerneoplande til kildepladser i den sydlige del af modelområdet.

Der er i det følgende ikke foretaget en kildepladsspecifik vurdering af de udpegede sandsynlighedsområder i det sydlige område. Sandsynlighedsområderne er generelt fremkommet som foreningsmængden af de fem modellers infiltrationsoplande (se afsnit 3.1), hvilket vurderes som en hensigtsmæssig metode, når der ønskes stor sikkerhed for at inddrage alle områder, der potentielt kan bidrage med vand til kildepladsen. Det vurderes derfor som overflødigt at kommentere de enkelte kildepladsers sandsynlighedsområde, da de generelt vurderes som fornuftigt afgrænset.

Vurderingen af kerneoplande foretages på baggrund af følgende principper:

1. Modellens troværdighed

Syd for skillelinien angivet på figur 10 er modellen kalibreret til hifi-niveau og den har passeret de udvalgte valideringstest. Det antages derfor, at modellen er i stand til at simulere trykniveaufordelingen med høj troværdighed i både kalibreringssituationen og i prediktionssituationer. Som følge heraf er modellen også i stand til at fastlægge infiltrationsområder til kildepladserne med høj troværdighed.

2. Usikkerheder

Det antages, at resultaterne fra de to kalibrerede modeller samt de tre scenarietørsler belyser de vigtigste usikkerhedskilder mht. infiltrationsområder til kildepladserne. Analysen forudsætter derfor, at øvrige usikkerhedsfaktorer, hvis effekt ikke er kvantificeret (parameterusikkerhed, geologisk opbygning af Bederdalen, etc.), er forholdsvis sekundær sammenlignet med de faktorer, der er belyst i de fem modelkørsler.

Da forskellen mellem tilladt indvindingsmængde og indvinding anvendt under kalibreringen varierer fra kildeplads til kildeplads, foretages der for hver enkelt kildeplads en vurdering af, hvor godt usikkerheden mht. indvinding belyses.

3. Sensitivitet vs. robusthed

For hver enkelt kildeplads vurderes, i hvor høj grad infiltrationsområdet er sensitivt overfor forskellene i de fem modeller. Hvis resultaterne fra de forskellige kørsler er forholdsvis ens, vurderes infiltrationsområdet at være relativt robust overfor ændringer i systemet, og det antages derfor, at der med stor sikkerhed kan udpeges et kerneopland. Hvis de forskellige modelresultater er meget forskellige, konkluderes det, at infiltrationsoplandet er sensitivt overfor ændringer i systemet, og det vil derfor være forbundet med større usikkerhed at udpege et kerneopland.

4. Skala

Der er foretaget en vurdering af skalaen, hvorpå modelresultaterne for infiltrationsområder kan anvendes. Pga. den endelige nøjagtighed, hvormed det hydraulisk trykniveau i de enkelte numeriske celler er beregnet samt unøjagtigheder i forbindelse med interpolation af trykniveauer ved udregning af hastighedskomponenter til partikelbaneløsningen vurderes det, at der er en usikkerhed på placeringen af partikler i infiltrationsområderne svarende til \pm sidelængden af én numerisk celle, dvs. 250 m i det aktuelle tilfælde. Derfor anses det for relativt usikkert at udpege kerneoplande, der har et areal på af størrelsesorden 0.25 km² eller mindre, svarende til arealet af ca. 4 numeriske celler. For områder med større areal anbefales det at ekskludere de yderste ca. 250 m af periferien af arealet, der udgør fællesmængden af infiltrationsområderne.

3.3 Adslev Vandværk

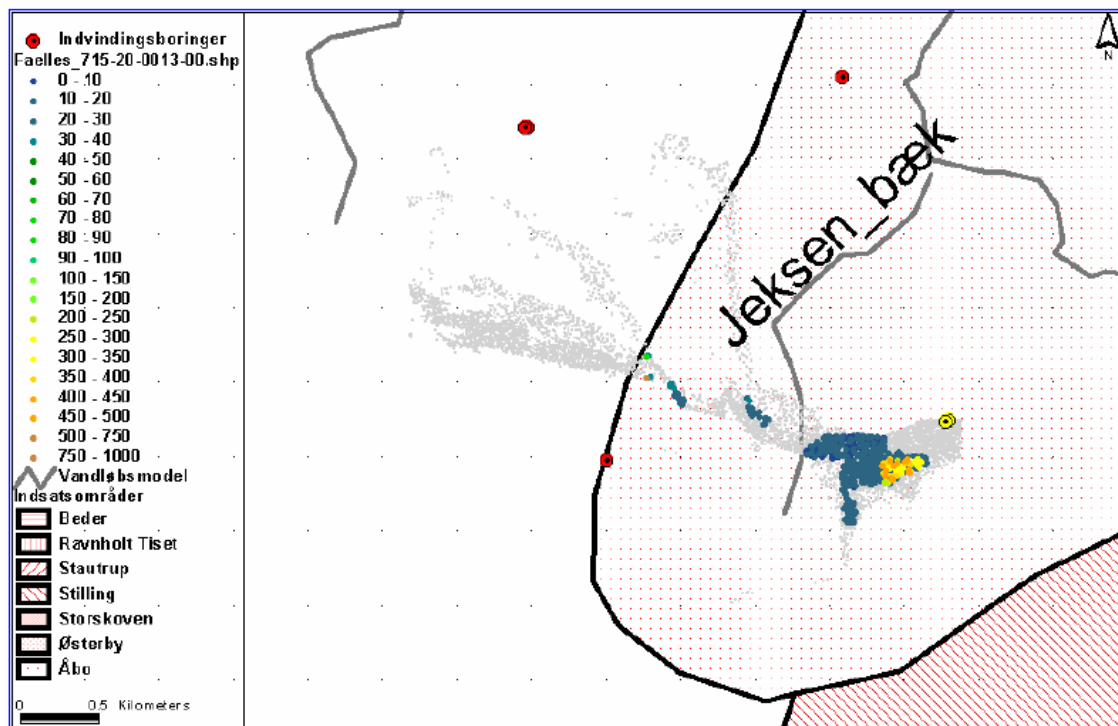
Indvinding: Kalibrering; Tilladelse ($10^3 \text{ m}^3/\text{år}$)	10,0	15,0
Kerneområde, % kildepladsområde	0	

Kommentarer:

Pga. indvindingens begrænsede størrelse samt usikkerhed omkring den overfladenære geologi (baseret på PACES men lerlinse indført i model 18. feb.), findes det i DHI (2005c) ikke muligt at udpege et kerneopland.

Der er relativt stor forskel mellem de fem modellers infiltrationsområder, og infiltrationsområdet vurderes derfor at være følsomt overfor ændringer i systemet.

Pga. det meget begrænsede område med fælles infiltrationsområde (fællesmængden dækker et areal på mindre end $\frac{1}{2} \text{ km}^2$) vurderes det som fornuftigt ikke at definere et kerneområde.



3.4 Bederværket, Ajstrup

Indvinding: Kalibrering; Tilladelse ($10^3 \text{ m}^3/\text{år}$)	683,8	756,2
Kerneområde, % kildepladsoppumpning	63	

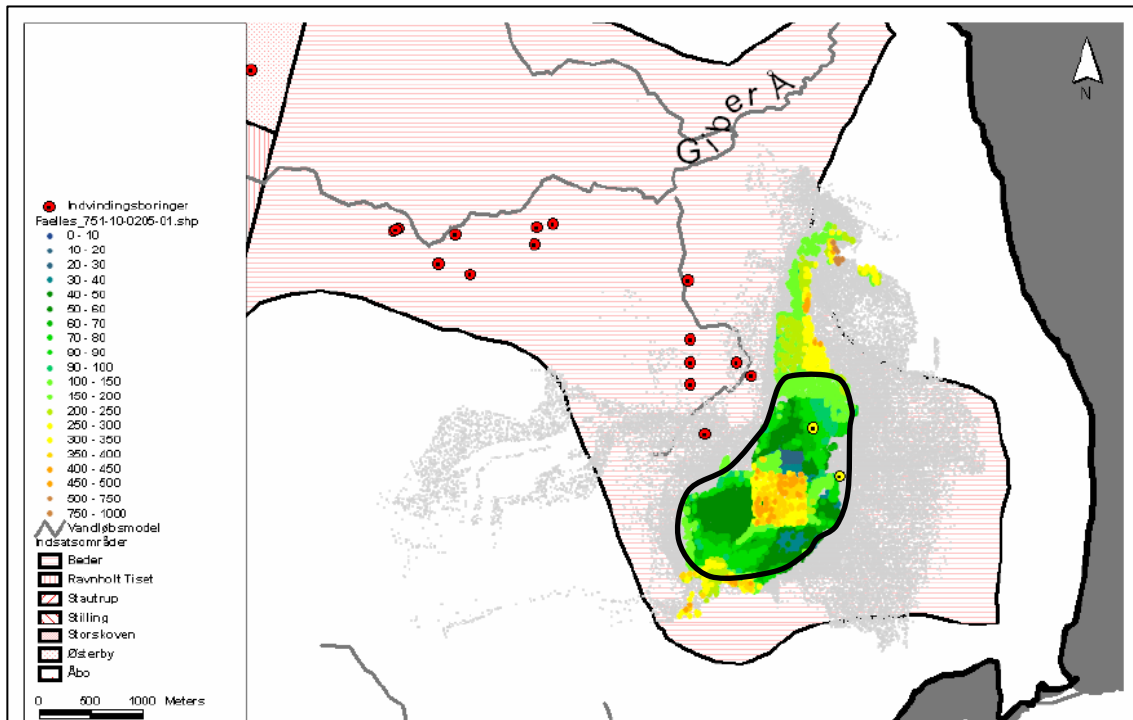
Kommentarer:

Indvindingen i scenarium 2 er ca. 10% højere end i kalibreringssituationen, og effekten af øget indvinding belyses til en vis grad.

Der er en del forskel på de forskellige modelresultater, hvilket vidner om, at infiltrationsområdet til kildepladsen er forholdsvis sensitiv overfor de undersøgte usikkerhedskilder. Fællesmængden er imidlertid forholdsvis veldefineret, idet den udgør et stort sammenhængende område i midten af foreningsmængden.

Fællesmængden dækker et areal på omkring 2 km^2 , og der er dermed ikke noget skalamæssigt problem i at udpege et kerneområde til kildepladsen.

Det udpegede kerneopland vurderes rimeligt.



3.5 Bederværket, Byagerparken

Indvinding: Kalibrering; Tilladelse ($10^3 \text{ m}^3/\text{år}$)	798,5	883,0
Kerneområde, % kildepladsoppumpning	58	

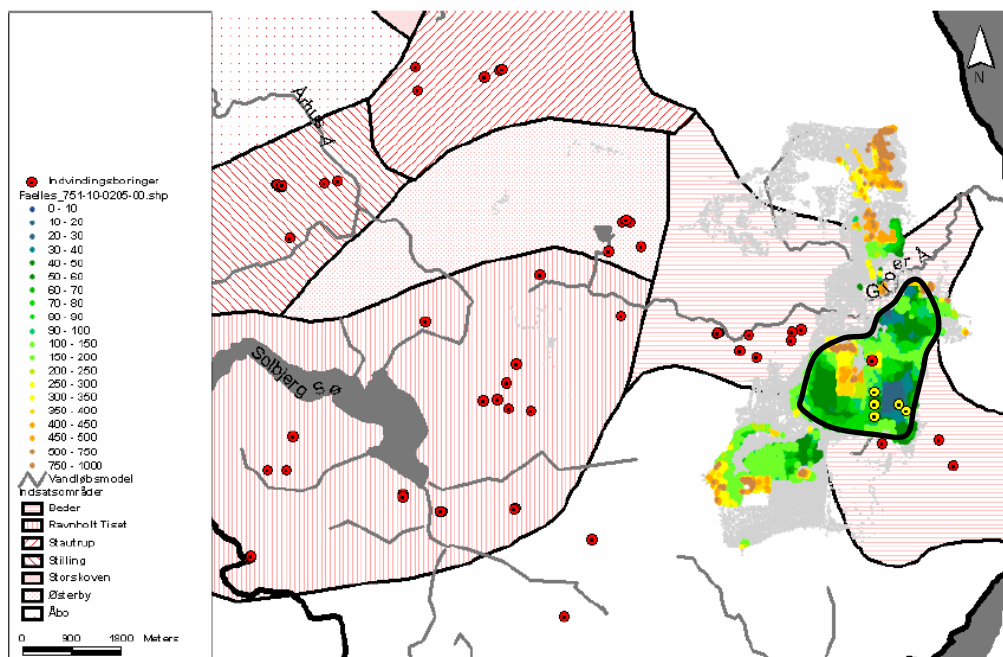
Kommentarer:

Indvindingen i scenarium 2 er ca. 10% højere end i kalibreringssituationen, og der opnås dermed en vis kvantificering af usikkerheden på indvindingen.

Den centrale del af fællesmængden er forholdsvis veldefineret, idet den udgør et stort sammenhængende område. To mindre områder med fælles infiltrationsområde findes hhv. nord og sydvest for kildepladsen. Disse to områder er mindre veldefinerede, og medtages i DHI (2005c) ikke i kerneoplandet.

Fællesmængden dækker et areal på omkring 4 km^2 , og der er derfor ingen skalamæssige problemer i at udpege et kerneopland til kildepladsen.

Det udpegede kerneopland vurderes rimeligt.



3.6 Bederværket, Skoleparken

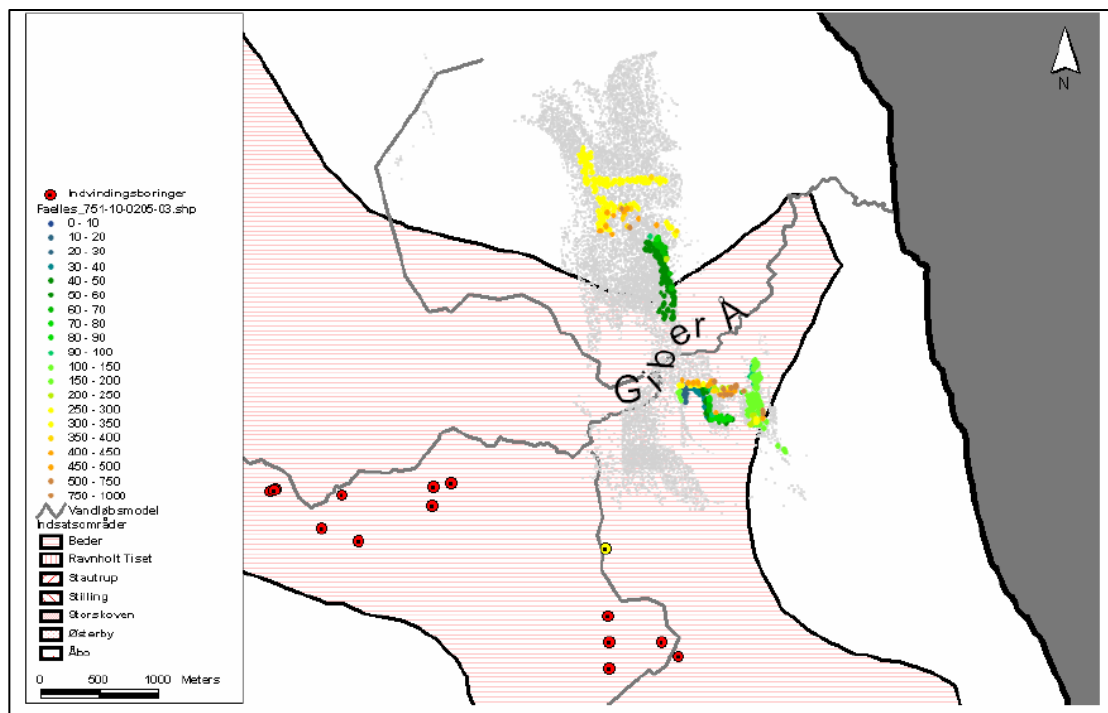
Indvinding: Kalibrering; Tilladelse ($10^3 \text{ m}^3/\text{år}$)	51,8	57,3
Kerneområde, % kildepladsoppumpning	0	

Kommentarer:

Indvindingen i scenarium 2 er ca. 10% højere end i kalibreringssituationen, og der opnås dermed en vis kvantificering af usikkerheden på indvindingen.

Fællesmængdens areal er lille og diffust. Dette viser, at infiltrationsområdet til kildepladsen er følsomt overfor ændringer i de undersøgte usikkerhedsfaktorer. Det vurderes derfor som forholdsvist svært at udpege et kerneopland.

På denne baggrund vurderes det fornuftigt, at der i DHI (2005c) ikke udpeges noget kerneopland.



3.7 Bederværket, Vilhelmsborg

Indvinding: Kalibrering; Tilladelse ($10^3 \text{ m}^3/\text{år}$)	907,6	1003,6
Kerneområde, % kildepladsoppumpning	47	

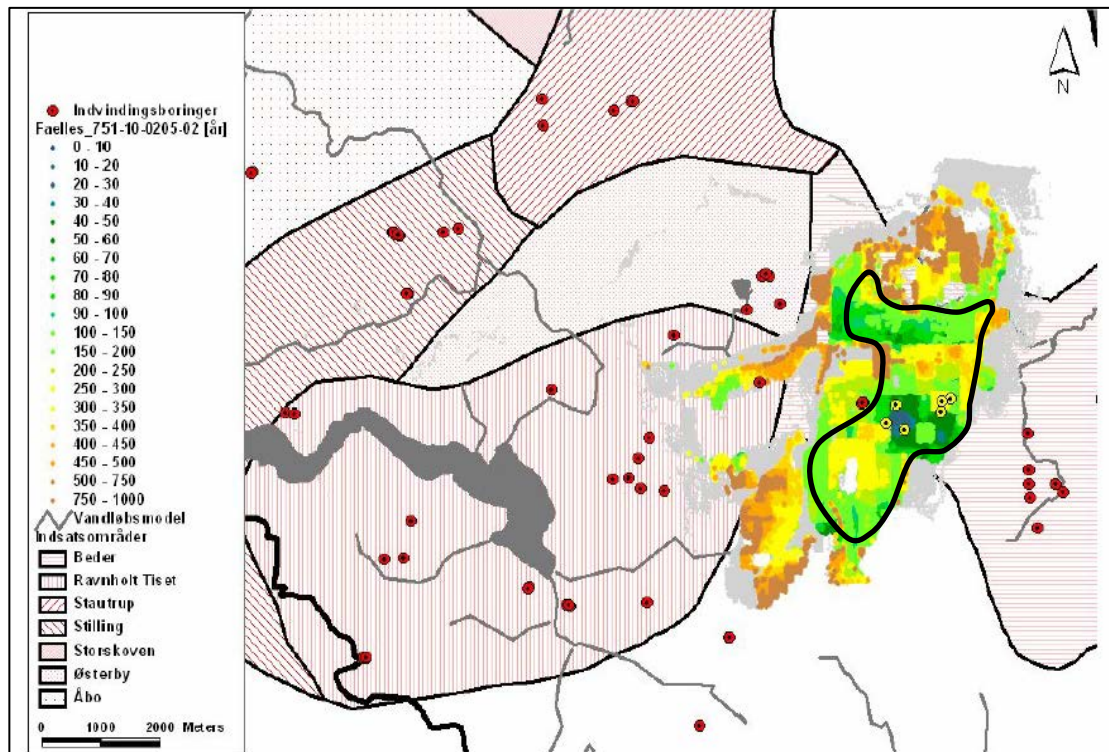
Kommentarer:

Indvindingen i scenarium 2 er ca. 10% højere end i kalibreringssituationen, og der opnås dermed en vis kvantificering af usikkerheden på indvindingen.

Der er lille forskel på de fem modellers infiltrationsområde til kildepladsen. Det vurderes derfor, at kildepladsens infiltrationsområde er meget robust overfor ændringer i de undersøgte usikkerhedsfaktorer.

Kerneoplandet udpeget af DHI (2005c) dækker et areal på adskillige kvadratkilometer, og der er derfor ingen skalproblemer forbundet med at identificeret et kerneområde.

Det vurderes, at det udpegede kerneopland er rimeligt.



3.8 Blegind Vandværk

Indvinding: Kalibrering; Tilladelse ($10^3 \text{ m}^3/\text{år}$)	33,5	40,0
Kerneområde, % kildepladsoppumpning	0	

Kommentarer:

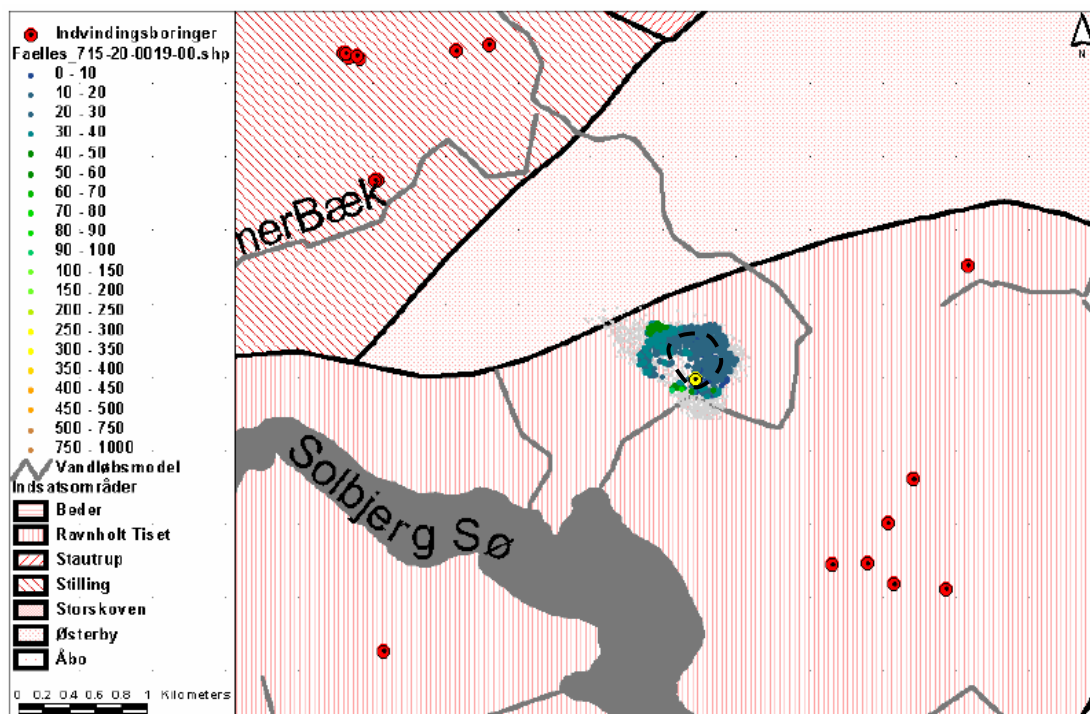
Indvindingen i scenarium 2 er ca. 20% højere end i kalibreringssituationen, og der opnås dermed en forholdsvis god kvantificering af usikkerheden på indvindingen.

Der er meget lille forskel på de fem modellers infiltrationsområde til kildepladsen. Det vurderes derfor, at kildepladsens infiltrationsområde er meget robust overfor ændringer i de undersøgte usikkerhedsfaktorer, hvilket taler for, at et kerneopland kan udpeges.

Pga. fællesmængdens begrænsede areal samt usikkerhed omkring datagrundlaget for både den overfladenære og den dybe geologi, konkluderes det i DHI (2005c), at der ikke kan udpeges et kerneopland.

Fællesmængdens areal (af størrelsesorden $\frac{1}{2} \text{ km}^2$) taler for, at der ikke udpeges et kerneopland. Robustheden overfor ændringer i systemet og den forholdsvis gode kvantificering af usikkerheden på indvinding (øges med 20% i scenarium 2), giver imidlertid grundlag for, at der med rimelig sikkerhed kan defineres et kerneopland.

På baggrund af ovenstående diskussion bør det overvejes at udpege et mindre kerneopland omkring kildepladsen, se nedenstående figur, hvor forslag til kerneområde er angivet med punkteret linie.



3.9 Gl. Hørning Vandværk

Indvinding: Kalibrering; Tilladelse ($10^3 \text{ m}^3/\text{år}$)	311,8	455,0
Kerneområde, % kildepladsoppumpning	24	

Kommentarer:

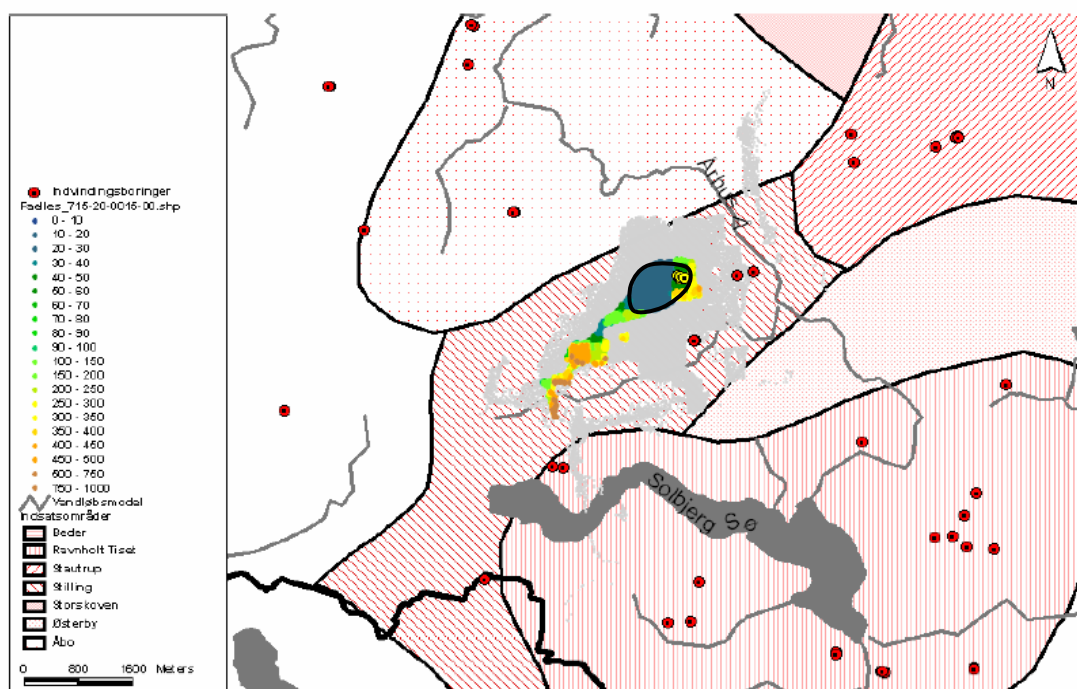
Indvindingen i scenarium 2 er ca. 45% højere end i kalibreringssituationen, og der opnås dermed en god kvantificering af usikkerheden pga. indvindingen.

De fem modeller infiltrationsområde varierer en del og det vurderes derfor, at kildepladsens infiltrationsområde er forholdsvist sensitivt overfor ændringer i de undersøgte usikkerhedsfaktorer.

DHI (2005c) udpeger en relativt lille kerneopland, indenfor hvilket 24% af den oppumpede vandmængde dannes.

Det udpegede kerneopland dækker et areal på ca. $1,5 \text{ km}^2$, og der er derfor ingen skalamæssige problemer.

Det udpegede kerneopland vurderes rimeligt.



3.10 Hasselager-Kolt, Pilegårdsvej

Indvinding: Kalibrering; Tilladelse ($10^3 \text{ m}^3/\text{år}$)	156,6	199,2
Kerneområde, % kildepladsoppumpning	0	

Kommentarer:

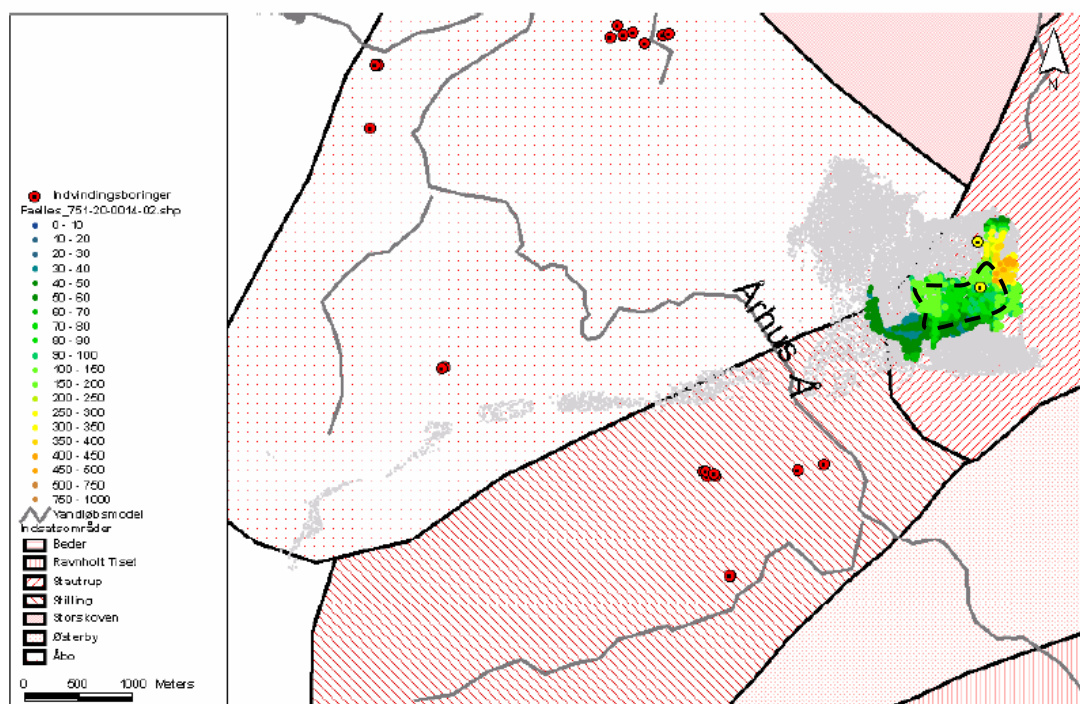
Indvindingen i scenarium 2 er ca. 25% højere end i kalibreringssituationen, og der opnås dermed en relativ god kvantificering af usikkerheden pga. indvindingen.

De fem modellens infiltrationsområde varierer en del, specielt afviger resultaterne fra model 18. februar fra de øvrige resultater. Det vurderes derfor, at kildepladsens infiltrationsområde er forholdsvist sensitivt overfor ændringer i geologi, hvorimod der er større robusthed overfor indvindingsrate og nettonedbør. Den centrale del af fællesområdet udgør et større sammenhængende område.

Fællesmængden har et areal på knap 1 km^2 , og udpegning af et kerneopland kan derfor ikke afvises pga. skalamæssige problemer.

Pga. potentialemæssige forhold, fællesområdets placering under by, usikker geologi baseret på lertykkelseskort og Model197, vurderes det i DHI (2005c) for usikkert at udpege et kerneopland.

På trods af usikkerhederne nævnt ovenfor, vurderes det rimeligt at udpege et mindre kerneopland omkring den sydligste af kildepladsens boringer, se punkteret linie på nedenstående figur.



3.11 Hasselager-Kolt, VV samt VV. Kolt Skovv.

Indvinding: Kalibrering; Tilladelse ($10^3 \text{ m}^3/\text{år}$)	175,9	223,8
Kerneområde, % kildepladsoppumpning	0	

Kommentarer:

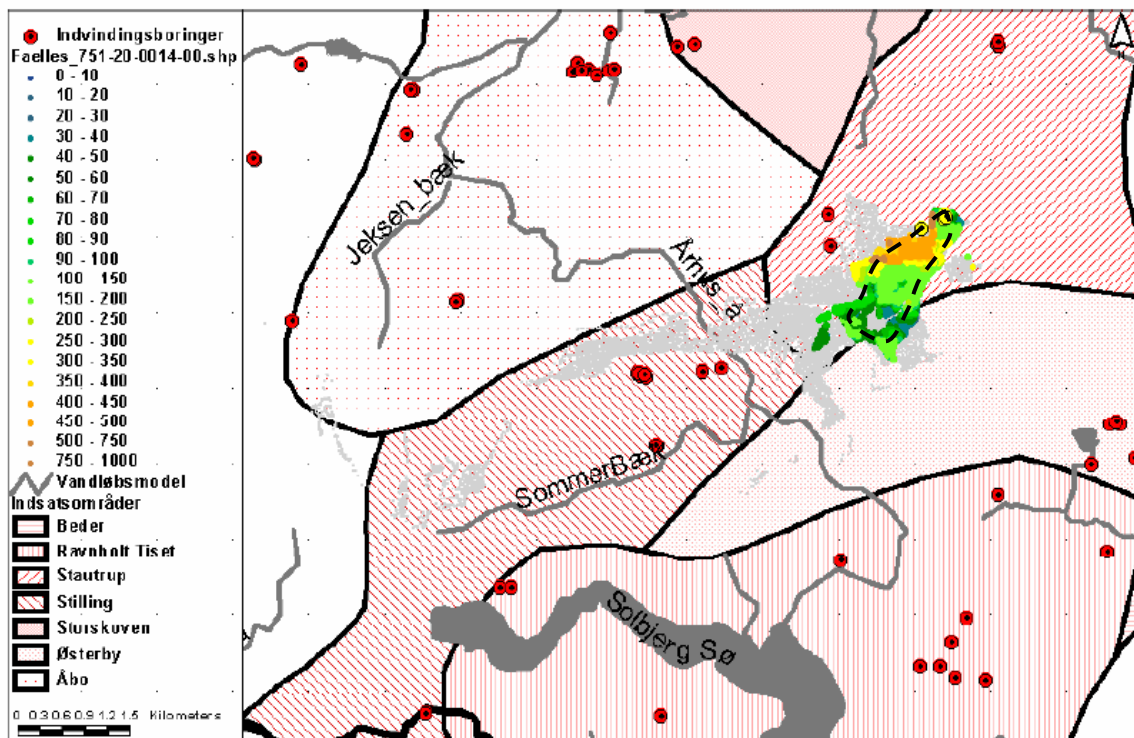
Indvindingen i scenarium 2 er ca. 25% højere end i kalibreringssituationen, og der opnås dermed en relativ god kvantificering af usikkerheden pga. indvindingen.

Infiltrationsområdet for model 18. februar afviger en del fra de øvrige resultater (lang hale mod vest). Det vurderes derfor, at kildepladsens infiltrationsområde er forholdsvist sensitivt overfor ændringer i geologi, mens der er større robusthed overfor indvindingsrate og netto-nedbør. Den centrale del af fællesområdet udgør et relativt veldefineret sammenhængende område.

Fællesmængden har et areal på over 1 km^2 , og der er derfor ikke skalamæssige problemer forbundet med udpegning af et kerneopland.

Pga. små hydrauliske gradienter, usikker geologi baseret Model97, samt stor konkurrence om vandet i denne del af området vurderes det i DHI (2005c) for usikkert at udpege et kerneopland.

Da en del af usikkerhederne nævnt ovenfor belyses af de gennemførte følsomhedsanalyser, vurderes det rimeligt at udpege et kerneopland, se punkteret linie på nedenstående figur.



3.12 Hørning St. Vandværk

Indvinding: Kalibrering; Tilladelse ($10^3 \text{ m}^3/\text{år}$)	38,5	51,0
Kerneområde, % kildepladsoppumpning	47	

Kommentarer:

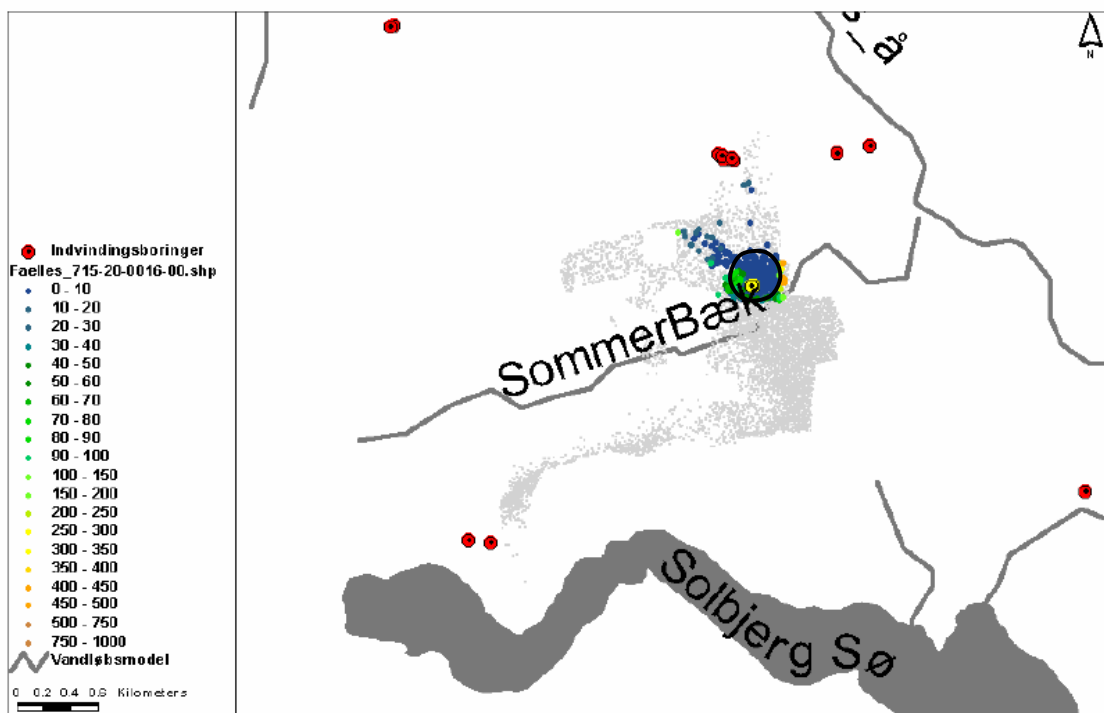
Indvindingen i scenarium 2 er ca. 45% højere end i kalibreringssituationen, og der opnås dermed en god kvantificering af usikkerheden pga. indvindingen.

Placeringen af infiltrationsområderne varierer en del mellem modellerne, og det vurderes derfor, at infiltrationsområdet til kildepladsen er forholdsvis sensitivt overfor ændringer i systemet.

DHI (2005c) udpeger en relativt lille kerneopland, indenfor hvilket 47% af den oppumpede vandmængde dannes.

Kun i et lille område (ca. $0,25 \text{ km}^2$) omkring kildepladsen optræder der et fælles infiltrationsområde. Det vurderes, at fællesmængden udgør et så begrænset område, at det pga. skalamæssige forhold er problematisk at udpege et kerneopland.

Baseret på ovenstående argumenter vurderes det ikke rimeligt på baggrund af modelresultaterne at udpege et kerneopland til Hørning St. Vandværk.



3.13 Jeksen Vandværk

Indvinding: Kalibrering; Tilladelse ($10^3 \text{ m}^3/\text{år}$)	13,1	16,0
Kerneområde, % kildepladsoppumpning	0	

Kommentarer:

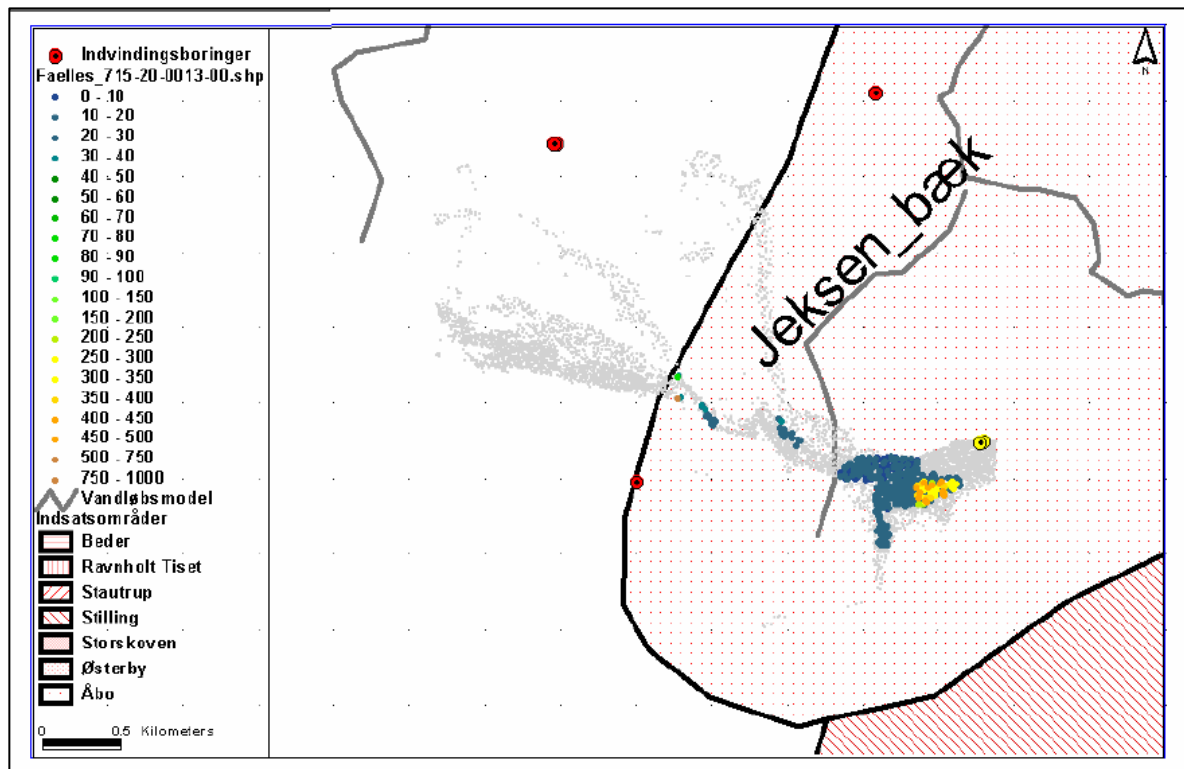
Indvindingen i scenarium 2 er ca. 20% højere end i kalibreringssituationen, og der opnås dermed en vis kvantificering af usikkerheden pga. indvindingen.

De fem modelleres infiltrationsområde varierer en del og det vurderes derfor, at kildepladsens infiltrationsområde er forholdsvist følsomt overfor ændringer i de undersøgte usikkerhedsfaktorer.

Fællesmængden dækker et lille areal på ca. $0,25 \text{ km}^2$, og af skalamæssige årsager er det derfor problematisk at definere et kerneopland til kildepladsen.

Pga. det meget lille fællesområde vurderes det i DHI (2005c), at der ikke kan udpeges noget kerneområde.

Det vurderes, at konklusionerne i DHI (2005c) er fornuftige.



3.14 Malling Vandværk

Indvinding: Kalibrering; Tilladelse ($10^3 \text{ m}^3/\text{år}$)	201,5	250,0
Kerneområde, % kildepladsoppumpning	28	

Kommentarer:

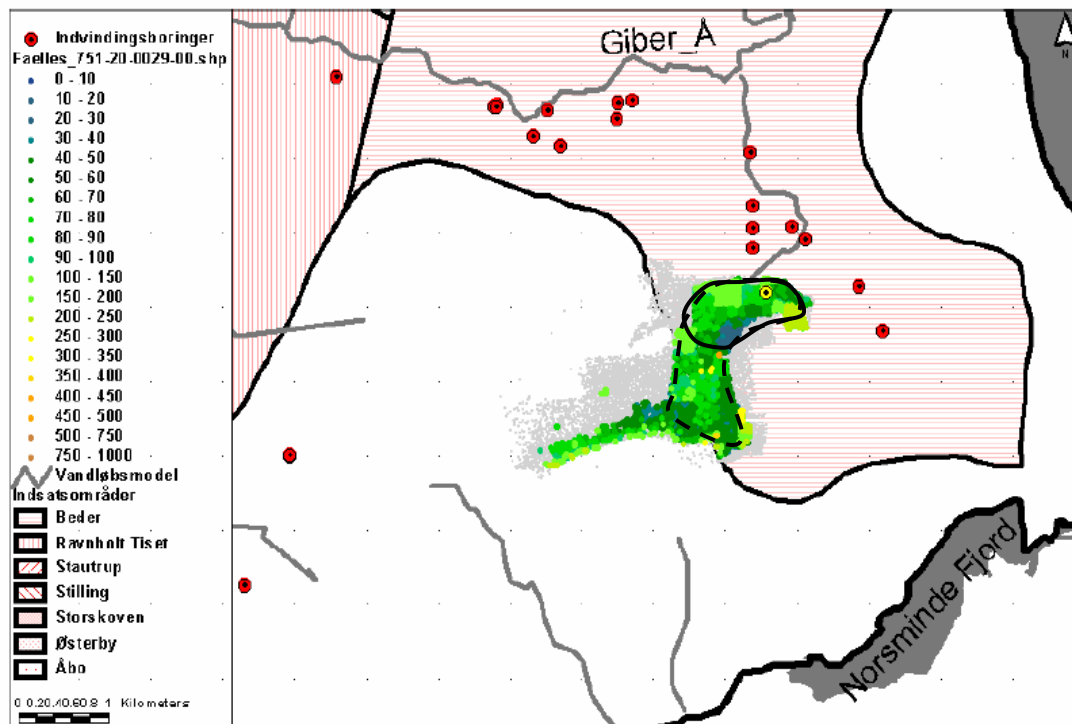
Indvindingen i scenarium 2 er ca. 20% højere end i kalibreringssituationen, og der opnås dermed en forholdsvis god kvantificering af usikkerheden pga. indvindingen.

De fem modelleres infiltrationsområde er forholdsvis ens og det vurderes derfor, at kildepladsens infiltrationsområde er forholdsvist robust overfor ændringer i de undersøgte usikkerhedsfaktorer.

Fællesmængden dækker et areal på ca. 2 km^2 , og der vurderes derfor, at der ikke er skala-mæssige problemer forbundet med at udpege et kerneopland.

DHI (2005c) udpeger en relativt lille kerneopland, indenfor hvilket 28% af den oppumpede vandmængde dannes. Pga. det geologiske datagrundlag (Model97) vælges det ikke at inkludere den sydlige del af fællesmængden i kerneoplandet.

Baseret på infiltrationsområdets robusthed overfor ændringer i systemet, fællesmængdens forholdsvis veldefinerede karakter, samt størrelsen af fællesmængden vurderes det, at der kan udpeges et kerneopland, som er større end det, der er defineret i DHI (2005c). På nedenstående figur ses forslag til, hvordan kerneoplandet kan udvides mod syd under Malling by (angivet med punkteret linie).



3.15 Mårslev Vandværk

Indvinding: Kalibrering; Tilladelse ($10^3 \text{ m}^3/\text{år}$)	192,3	231,0
Kerneområde, % kildepladsoppumpning	0	

Kommentarer:

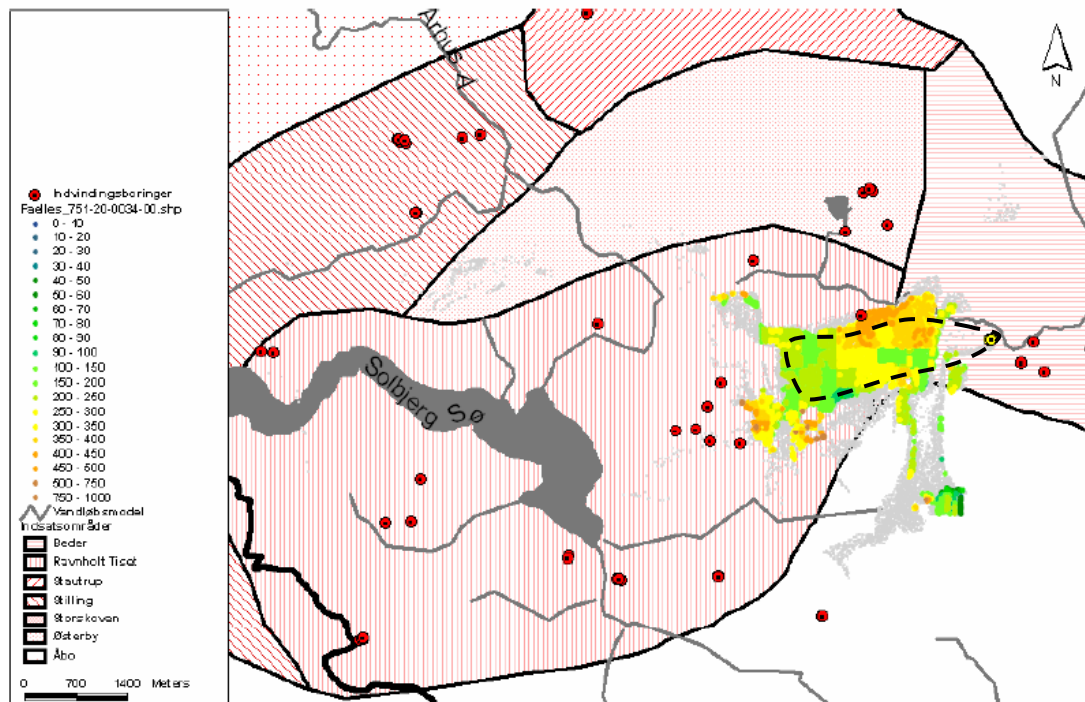
Indvindingen i scenarium 2 er ca. 20% højere end i kalibreringssituationen, og der opnås dermed en forholdsvis god kvantificering af usikkerheden pga. indvindingen.

Bortset fra et område syd for kildepladsen er de fem modelleres infiltrationsområde forholdsvis ens og det vurderes derfor, at kildepladsens infiltrationsområde er relativt robust overfor ændringer i de undersøgte usikkerhedsfaktorer.

Fællesmængden dækker et areal på ca. 3 km^2 , og der er derfor ingen skalamæssige problemer med at udpege et kerneopland til kildepladsen.

DHI (2005c) vurderer, at der pga. usikkerhed mht. geologi, beregnede potentialer, samt by omkring kildepladsen ikke kan udpeges et kerneopland.

Baseret på robustheden af infiltrationsområdet overfor ændringer i systemet samt hvor veldefineret størstedelen af fællesmængden er, vurderes det at være rimeligt at udpege et kerneopland, se område defineret af den punkterede linie på nedenstående figur. Det vurderes som rimeligt at inkludere et smalt område op til selve kildepladsen, til trods for at dette område ikke udgør en del af fællesmængden.



3.16 Stillingværket

Indvinding: Kalibrering; Tilladelse ($10^3 \text{ m}^3/\text{år}$)	131,1	200,0
Kerneområde, % kildepladsoppumpning	4	

Kommentarer:

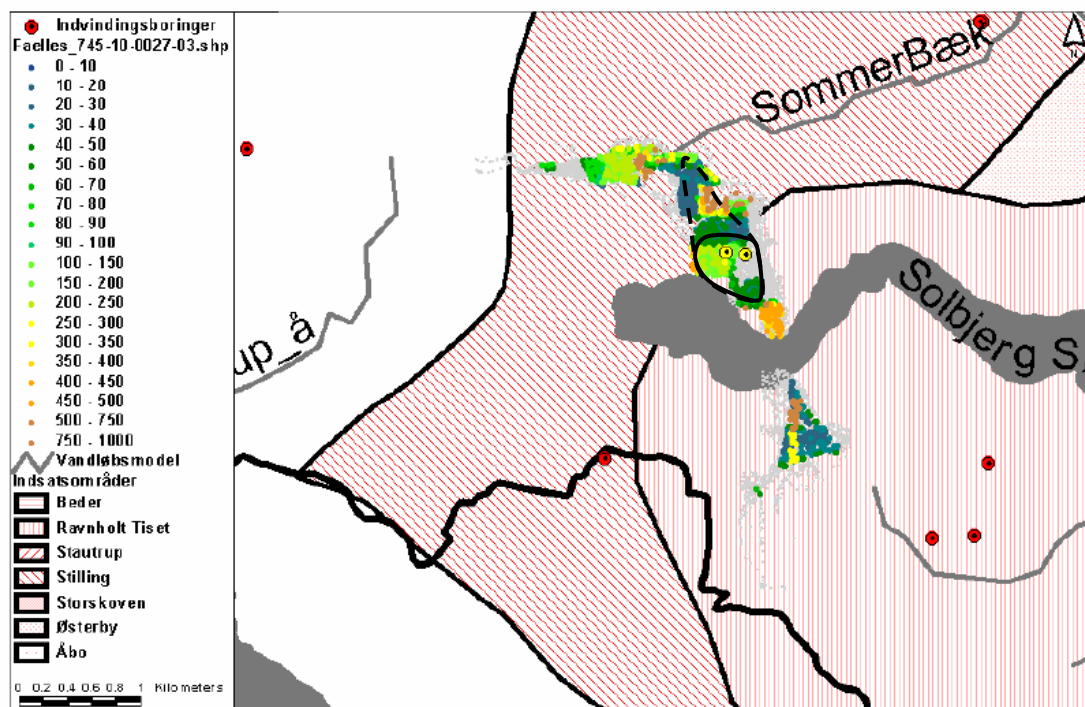
Indvindingen i scenarium 2 er ca. 50% højere end i kalibreringssituationen, og der opnås dermed en god kvantificering af usikkerheden pga. indvindingen.

De fem modelleres infiltrationsområde er forholdsvis ens og det vurderes derfor, at kildepladsens infiltrationsområde er forholdsvis robust overfor ændringer i de undersøgte usikkerhedsfaktorer.

Fællesmængden dækker et langstrakt område med et areal på ca. 1 km^2 , og der vurderes derfor ikke at være skalaproblemer ved udpegnig af et kerneopland.

Pga. usikkerhed omkring geologien udpeges der i DHI (2005c) kun et lille kerneopland, der er placeret omkring borerne.

Det vurderes, at geologien tillægges for stor betydning, og at kerneoplandet derfor med fordel kunne have været udvidet til at indeholde området op mod Sommerbæk, se område markeret med punkteret linie på nedenstående figur.



3.17 Testrup Vandværk

Indvinding: Kalibrering; Tilladelse ($10^3 \text{ m}^3/\text{år}$)	15,0	15,0
Kerneområde, % kildepladsoppumpning	0	

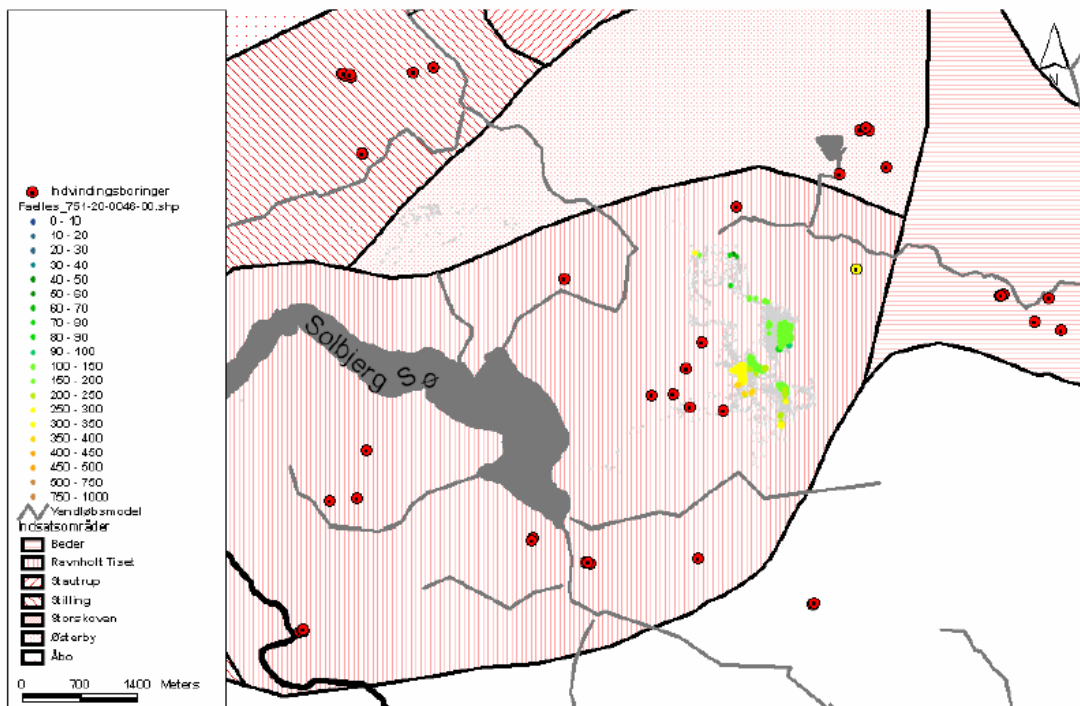
Kommentarer:

Indvindingen i scenarium 2 er den samme som i kalibreringssituationen, og der opnås dermed ingen kvantificering af usikkerheden pga. indvindingen.

Fællesmængden er meget diffus, og dækker samtidig et meget lille areal. Det vurderes, at kildepladsens infiltrationsområde er forholdsvist følsomt overfor ændringer i nettonedbør samt de geologiske forskelle mellem model 18. og 25. februar.

Pga. usikkerhed omkring infiltrationsområdernes placering udpeges der i DHI (2005c) intet kerneopland.

Det vurderes, at ovenstående beslutning er fornuftig.



3.18 Østerbyværket, Ravnholt/Tiset

Indvinding: Kalibrering; Tilladelse ($10^3 \text{ m}^3/\text{år}$)	1202,7	1500,0
Kerneområde, % kildepladsoppumpning	20	

Kommentarer:

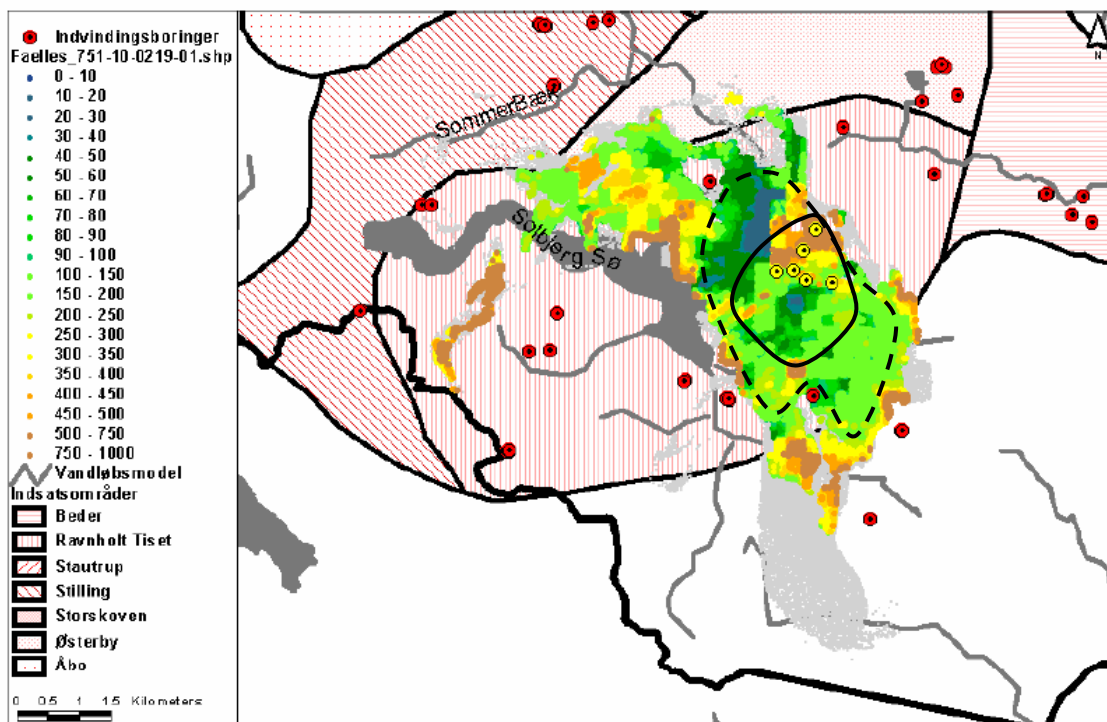
Indvindingen i scenarium 2 er ca. 25% højere end i kalibreringssituationen, og der opnås dermed en god kvantificering af usikkerheden på indvindingen.

Det meste af fællesmængden er veldefineret, idet den udgør et stort sammenhængende område, som er forholdsvis robust overfor ændringer i systemet.

Fællesmængden dækker et stort areal på omkring 18 km^2 , og skalproblemer kan dermed udelukkes.

Pga. tilgrænsende kildepladser samt usikkerhed på både overfladenær og dyb geologi er der i DHI (2005c) udpeget et relativt lille kerneomland.

Baseret på robustheden over for ændringer i systemet, den gode evaluering af ændring i vandindvinding, samt den store og veldefinerede fællesmængde vurderes det som rimeligt at udvide kerneområdet i forhold til det, der udpeges i DHI (2005c). I nedenstående figur ses et forslag til et større kerneomland (markeret med punkteret linie).



3.19 Østerbyværket, Østerby

Indvinding: Kalibrering; Tilladelse ($10^3 \text{ m}^3/\text{år}$)	795,8	900,0
Kerneområde, % kildepladsoppumpning	0	

Kommentarer:

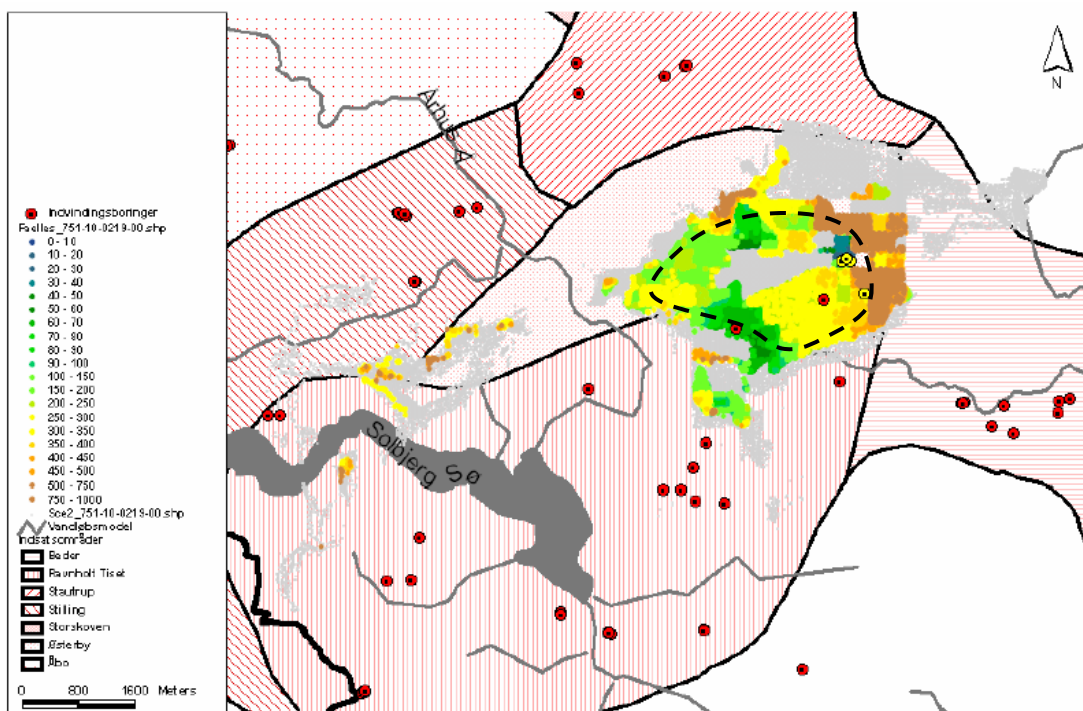
Indvindingen i scenarium 2 er ca. 15% højere end i kalibreringssituationen, og der opnås dermed en rimelig kvantificering af usikkerheden på indvindingen.

Den centrale del af fællesmængden er veldefineret, idet den udgør et stort sammenhængende område, som er forholdsvist robust overfor ændringer i systemet. Mod sydvest optræder områder med mere diffust placerede fællesmængder.

Fællesmængden dækker et stort areal på omkring 9 km^2 , og skalamæssige problemer kan dermed udelukkes.

Pga. usikkerhed på både overfladenær og dyb geologi vurderer DHI (2005c), at der ikke kan udpeges et kerneopland.

Pga. den robusthed, som den centrale del af fællesmængden udviser overfor de gennemførte scenarier samt størrelsen af dette areal, vurderes det at være rimeligt at udpege et kerneopland, se nedenstående figur.



4 Forslag til yderligere undersøgelser

I dette afsnit gives der forslag til, hvorfor modellen falsificeres i den nordlige del af modelområdet, samt hvilke yderligere undersøgelser der kan iværksættes for at identificere årsagen til de påpegede problemer.

4.1 Geologisk model

Som beskrevet i afsnit 2.3.2 benyttes der en relativ ny metode baseret på elektromagnetiske målinger til tolkning af geologien i modelområdet. Det anbefales derfor, at tolkningsmetoden testes mod tilgængelige litologiske logs fra borer, dels for at kvantificere metodens nøjagtighed (rammer metoden i middel den rigtige geoenhed), og dels for at bestemme metodens præcision (hvor stor spredning er der på bestemmelsen af geoenheder). Ved sammenligning af boringstolket geoenhed og geofysisk tolket geoenhed vil det være muligt, at kvantificere, f.eks. hvor hyppigt en geofysisk tolket "sand" svarer til "sand" eller en af de andre af de definerede geoenheder baseret på litologiske logs. Da kvaliteten af metoden må forventes at afhænge af den lokale geologiske opbygning, bør analysen foretages under hensyntagen til eventuelle forskelle i den overordnede opbygning af geologien i området, dvs. det kan være nødvendigt at gennemføre separate undersøgelser for områder, der adskiller sig markant i geologisk struktur og heterogenitet. Den foreslåede analyse vil naturligvis lide under, at der også er usikkerhed på de boringsbaserede litologiske logs. Det vurderes imidlertid, at det er den bedst mulige fremgangsmåde. Resultatet af analysen vil kunne give information om usikkerhed på den geologiske model, hvilket er essentielt for en efterfølgende kvantificering af modelusikkerheden.

I områderne, hvor tolkningen af geologiske enheder er baseret på Model97, afhænger kvaliteten af den geologiske model i udpræget grad af kvaliteten af de hydrauliske ledningsevner, der er estimeret under kalibreringen af Model97. Desuden er der risiko for, at de geologiske enheder (f.eks. "sand med ler") defineret på basis af Model97 ikke repræsenterer de samme hydrofacies (enheder med samme hydrauliske egenskaber), som dem der er tolket på basis af TEM-data. Det kunne derfor være relevant at gennemføre en sammenligning af Model97's geoenheder med enten de TEM-tolkede geoenheder og/eller boringstolkede geoenheder. En sådan test ville kunne afsløre, om det er rimeligt at betragte eksempelvis geoenhed "sand med ler" tolket på baggrund af hhv. TEM-data og Model97 som tilhørende samme hydrofacies. Indtil en sådan analyse er gennemført, må det betragtes som tvivlsomt om de to sæt geoenheder kan antages at være ens.

4.2 Numerisk net

4.2.1 Numerisk diskretisering

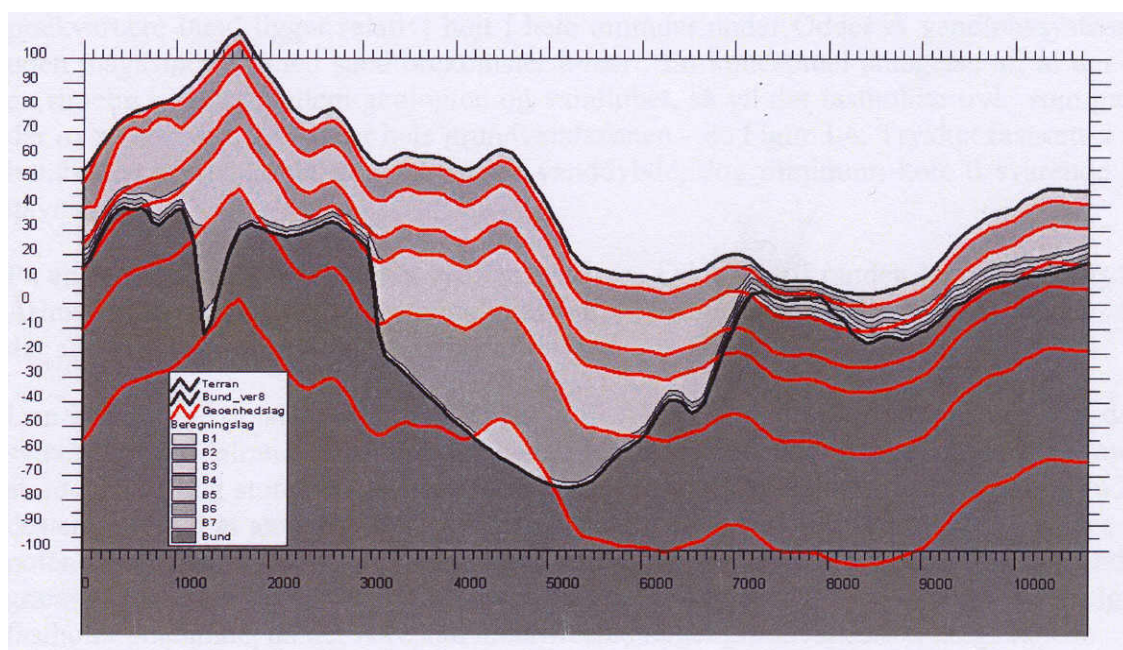
Den numeriske model er opbygget med en horisontal diskretisering på 250 m (resulterer i 6600 celler per beregningslag), mens den vertikale dimension er opløst i 7 beregningslag. Bunden af de 3 øverste beregningslag følger generelt laggrænserne mellem de geologiske lag 1/2, 2/3, og 3/4, og de tre øverste geologiske lag opløses dermed fuldstændigt i den vertikale retning. Herunder integrerer beregningslagene generelt over et stigende antal geologiske lag med dybden, hvor et beregningslag maksimalt indeholder 9 geologiske lag. Med den anvendte diskretisering opnås der en god opløsning af den terrænnære geologi. Den dybereliggende

geologi opløses dårligere, hvor én beregningscelle maksimalt indeholder 4 geo-pixels i horisontal retning og 9 pixels i vertikal retning (i alt 36 geo-pixels). Den effektive hydrauliske ledningsevne for en beregningscelle, der indeholder mere end én geo-pixel, beregnes ved anvendelse af aritmetisk og harmonisk middelværdi for hhv. den horisontale og vertikale hydrauliske ledningsevne.

Det er umiddelbart vanskeligt at vurdere, hvilken effekt den numeriske midling over flere geologiske lag har på modellens resultater. Mht. vandfluks vurderes det, at effekten er relativ beskeden, da der med de anvendte midlingsprocedurer af hydraulisk ledningsevne opnås samme effektive hydrauliske egenskaber, som hvis hvert lag var blevet opløst fuldstændigt. Gennemsnitligt vil modellen derfor kunne reproducere f.eks. det hydrauliske trykniveau lige så godt som en model med fin diskretisering, mens der lokalt må forventes større uoverensstemmelse mellem det simulerede og det aktuelle trykniveau. Udtrykt i kalibreringsstatistiske termer betyder det, at man kan forvente samme middelfejl (ME), men en højere kvadratafvigelsessum (RMS). Den relativt grove vertikale diskretisering kan imidlertid påvirke strømningsveje og transporttider. Hvor stor effekten vil være afhænger bl.a. af, hvor heterogen geologien, som der midles over, er. Problematikken kan kun belyses nærmere ved at sammenligne modellens resultater ved anvendelse af den aktuelle diskretisering og en finere diskretisering.

4.2.2 Grid design

På figur 13 ses et eksempel på, hvordan diskretiseringen i vertikal retning er foretaget. Det skal bemærkes, at det nederste beregningslag følger prækvartæroverfladen. Det resulterer i, at f.eks. beregningslag 6 indenfor en relativ kort afstand vil gå fra at repræsentere den dybe del af Brabrand-dalen til at repræsentere et højtliggende område på flankerne af dalen. Den numeriske løsning vil ikke eksplicit tage den store forskel i niveau i regning, når strømningsløsningen findes. Den numeriske model vil opfatte systemet, som om det består af horisontale lag med varierende transmissivitet. Der er derfor risiko for, at der genereres en direkte forbindelse mellem de højtliggende områder udenfor de begravede dale og de dybe dele af dalstrukturerne via "horisontal" strømning indenfor et beregningslag. Det er uvist, hvor stort det skitserede problem er i praksis, og det er ikke GEUS bekendt, at der er foretaget videnskabelige analyser af problematikken. Principielt burde diskretiseringsmetoden anvendt i nærværende sammenhæng sammenlignes med alternative diskretiseringsstrategier, som f.eks. anvendelse af beregningslag, der ligger mere vandret og dermed skærer dalstrukturerne. Det ligger naturligvis udenfor en rådgivningsopgave som Århus Syd arbejdet at gennemføre en sådan analyse.



Figur 13 Tværnsnit gennem Brabrand dalen, der illustrerer den vertikale diskretisering. De lysegrå og mørkegrå lag angiver beregningslag, mens de røde linier angiver bunden af geolog 1, 2, 3, 5, 10, og 19. Det mørkeste område nederst i tværnsnittet angiver placeringen af prækvartært ler (DHI, 2005a).

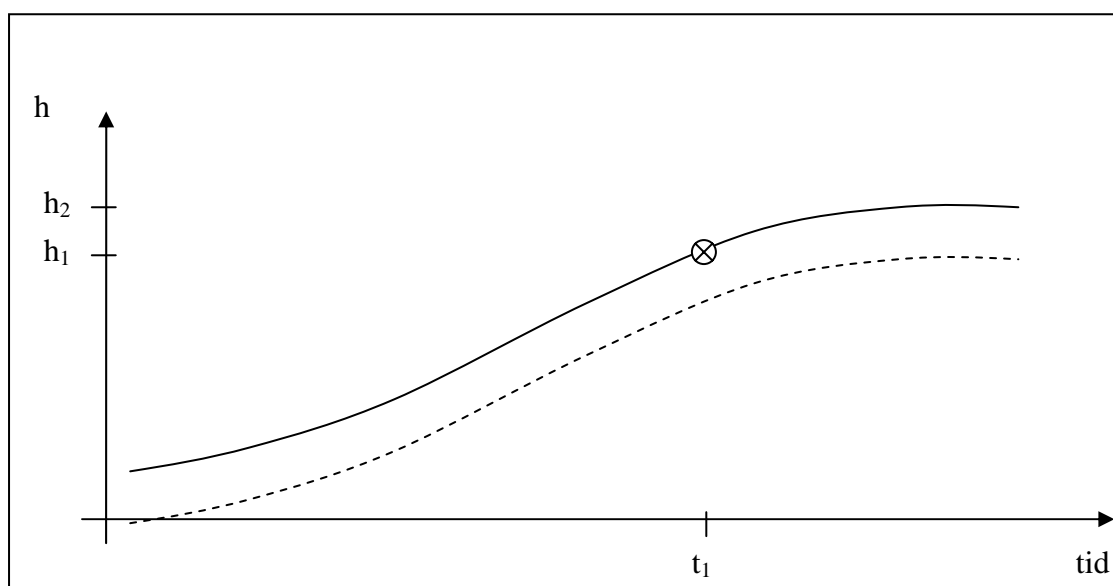
4.3 Kalibrering af stationær model

Opstilling af en stationær grundvandsmodel er uomtvisteligt forbundet med problemet i at definere en stationær situation, som principielt ikke eksisterer i virkeligheden. Udfordringen i dette tilfælde er at udvælge og processere inputdata af forskellig type til den stationære model, så de processerede data repræsenterer samme tilstand i det hydrologiske system. For en typisk grundvandsmodel er der tale om data bestående af nettonedbør/grundvandsdannelse, grundvandsindvinding, hydraulisk trykniveau, vandløbsafstrømning samt evt. tidsvarierende randbetingelser. For at opnå en korrekt konceptuel model skal de forskellige datatyper behandles på en måde, så de er i overensstemmelse med hinanden.

Ofte kan der, hvis det modellerede system befinder sig i en dynamisk ligevægt, hvor de hydrologiske variable som følge af sæsonmæssige variationer svinger omkring en konstant middelværdi, defineres en gennemsnitssituation, som repræsenterer middelværdien af de hydrologiske variable. Hvis der omvendt arbejdes med et område, der ikke er i ligevægt, er der risiko for at modellen bliver fejlbehæftet. Antag f.eks. at der arbejdes med et område, hvor trykniveauet generelt er stigende pga. faldende indvindinger, se figur 14. Den fuldt optrukne kurve på figuren repræsenterer, hvordan trykniveauet ville udvikle sig, hvis de drivende variable (nettonedbør og grundvandsindvinding) blev fastholdt på det niveau, de havde på tidspunktet, hvor der blev målt (t_1). Pejlinger foretaget på tidspunktet t_1 vil derfor ikke repræsentere det stationære trykniveaubillede i området, som pga. systemets responstid på ændringer i drivende variable vil være på vej op. Det "stationære" trykniveau for området vil med andre ord ligge højere (h_2), end det der er målt (h_1). Når den stationære model kalibreres mod pejlingerne, skal modellen generere et lavere potentiale end det, den ville have gjort med de "sande" parameterværdier. For at opnå et lavere trykniveau vil der derfor være en tendens til,

at de hydrauliske ledningsevner overestimeres, da trykniveauet falder, når ledningsevnen øges. Modellen kan dermed reproducere de observerede trykniveaumålinger, men de estimerede hydrauliske ledningsevner vil være for høje i forhold til de sande værdier. Hvis parametrene efterfølgende overføres til en transient model, der kan beskrive effekten af ikke-stationære forhold, vil den transiente model underestimere det målte trykniveau, da der anvendes for høje ledningsevner, se punkteret linie på figur 14.

Anvendelse af en dynamisk model, hvor indvinding og nettonedbør fastholdes på niveauet fra tidspunktet t_1 , ville kunne kvantificere, hvor stor forskel der er mellem det observerede potentiale, og potentialet der ville indstille sig i en situation med dynamisk ligevægt, dvs. en situation, hvor potentialet pga. sæsonvariationer i nettonedbør og evt. indvinding svinger omkring en middelværdi, som ikke ændres over tiden. Hvis der findes signifikante forskelle mellem pejlinger og trykniveau-resultater fra ligevægtssituationen, ville det give anledning til bekymring. Denne metode kræver naturligvis en dynamisk model, som kan generere troværdige resultater for trykniveauets udvikling over tiden som følge af ændringer i de drivende variable. Alternativt kunne tidsserier af trykniveauobservationer anvendes til denne vurdering. Denne fremgangsmåde kompliceres imidlertid af, at tidsrummet fra kalibreringsdata er målt til analysen skal gennemføres kan være for kort til at gennemføre analysen, samt at hverken indvindingsrate eller nettonedbør i perioden efter måletidspunktet t_1 med sikkerhed kan antages at repræsentere niveauet svarende til tidspunktet t_1 .



Figur 14 Teoretisk udvikling i hydrauliske trykniveau, hvor de drivende variable fastholdes efter måletidspunktet t_1 . Den fuldt optrukne linie angiver det sande trykniveau. Den stiplede linie repræsenterer en dynamisk simulering.

4.4 Analyse af estimerede parameterværdier

Kalibreringen af hhv. model 18. februar og 25. februar resulterede i estimation af relativt lave hydrauliske ledningsevner for Brabrand-sand. Da den geologiske model er opbygget som en pixel-model, og da der må formodes at optræde pixels med mere lavpermeable hydrofacies i Brabranddalen, vil den effektive hydrauliske ledningsevne i magasinet blive endnu lavere end værdien estimeret for sandet. På basis af analysen af specifik kapacitet (DHI, 2005b, bilag

G), hvor der findes middel hydrauliske ledningsevner (for hele modelområdet) på $2 \cdot 10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-4}$ m/s (afhængig af analysemetode), virker det ikke sandsynligt, at Brabrand-sandets ledningsevne er så lav. En sammenligning med resultater fra prøvepumpningstests i selve Brabrand-magasinet kunne give en bedre vurdering af, i hvilket interval den hydrauliske ledningsevne i dalen bør ligge. Desuden ville en sammenligning med kalibrerede værdier for hydraulisk ledningsevne fra Model97 kunne indikere, hvorvidt der er opnået rimelige hydrauliske ledningsevner med Århus Syd modellen. Umiddelbart vurderes dette ikke at være tilfældet, da der i DHI (2005a, tabel 2.2) benyttes en nedre grænse på $1.2 \cdot 10^{-5}$ m/s til at definere geoenheden sand på basis af Model97's hydrauliske ledningsevner. Det må derfor forventes, at de højpermeable enheder i Model97 havde en betydeligt højere ledningsevne. Det kan imidlertid ikke på basis af det benyttede materiale afgøres, hvordan de geologiske enheder er fordelt i f.eks. Brabranddalen.

4.5 Årsager til falsificering af modellen

Det vurderes, at årsagen til modellens manglende evne til at reproducere systemets fysik tilfredsstillende skal søges i en eller flere af følgende faktorer: Diskretisering/grid design, geologisk model, samt anvendelse af stationær model på et system, der ikke er i ligevægt. Modellens øvrige komponenter anses ikke som værende årsag til problemerne. Den øvre randbetingelse (nettonedbør) vises i den dynamiske test at være troværdig, og der opnås en god vandbalance for det modellerede område. De ydre randbetingelser vurderes ikke at være årsag til problemerne, ikke mindst pga. afstanden mellem fokusområderne og randenes placering. Kalibreringen er gennemført i henhold til god modelleringspraksis. Kalibreringsdata udgøres af både hydraulisk trykniveau og vandløbsafstrømning; kalibreringsparametre er udvalgt på baggrund af en sensitivitetsanalyse, og der er anvendt en global optimeringsalgoritme (AUTOCAL), som giver stor sandsynlighed for, at der opnås et globalt minimum. Det vurderes derfor, at det ikke er kalibreringsmetoden, der er årsag til at modellen falsificeres.

Det kan ikke afvises, at forholdene omkring den anvendte diskretisering og/eller grid design (beskrevet i afsnit 4.2) kan have resulteret i problemer med modellen. Det er imidlertid vanskeligt at afgøre, i hvor høj grad det har influeret på modellens evne til at reproducere systemet, da der så vidt GEUS er orienteret, ikke findes detaljerede analyser af f.eks. brug af alternative grid design til simulering af områder, hvor begravede dale er vigtige hydrogeologiske elementer. På det foreliggende vidensgrundlag vurderes det imidlertid ikke, at diskretisering og/eller grid design kan være hele forklaringen på de konstaterede problemer.

Ikke-stationære effekter kan have haft indflydelse på kalibreringen af den stationære model i det aktuelle tilfælde. Da grundvandsindvindingen i modelområdet generelt har været faldende, og grundvandsstanden derfor må antages at være generelt stigende, ville man forvente, at der blev estimeret for høje ledningsevner med modellen (se afsnit 4.3). Det ser umiddelbart ikke ud til, at modellen er påvirket af dette problem, da der estimeres overraskende lave hydrauliske ledningsevner ved kalibrering af modellen. Pga. komplekse sammenhænge mellem modellens forskellige elementer er det imidlertid ikke muligt at udelukke, at ikke-stationære effekter kan have haft så stor indflydelse på kalibreringen af modellen, at det har påvirket troværdigheden af parameterestimaterne.

Den hydrogeologiske model vurderes at være det bedste bud på hovedårsagen til Århus Syd modellens problemer. Som beskrevet i afsnit 2.3, er det usikkert, hvor godt det på baggrund af de geofysiske data er muligt at identificere den interne fordeling af hydrofacies for de kvartære aflejringer. Det er tvivlsomt, om geoenhederne defineret på basis af hhv. de geofysiske målinger og de hydrauliske ledningsevner i Model97 repræsenterer samme hydrofa-

cies. Desuden tyder nødvendigheden af at indføre de mange modifikationer af den geologiske model (se figur 8) på, at der er en betydelig usikkerhed på geologien primært i og omkring Brabranddalen.

Ud fra de tilgængelige geologiske og geofysiske data vurderes det, at den geologiske opbygning af Brabranddalen er meget kompleks og endnu ikke fuldstændig forstået. Det er derfor tvivlsomt, om opstilling af en alternativ geologisk model, f.eks. baseret på boringsdata, ville afhjælpe modellens problemer med at reproducere systemets respons. For at komme tættere på en løsning af problemerne er det essentielt, at der kan opstilles en troværdig geologisk model, og dette arbejde vil sandsynligvis kræve, at der gennemføres yderligere indsamling af data i form af geologiske logs (litologi), geofysiske undersøgelser, og hydrogeologiske data (prøvepumpningstests).

5 Usikkerhedsanalyse

I dette kapitel gives et forslag til, hvordan en stringent analyse til kvantificering af usikkerheden på infiltrationsområde til kildepladser kan struktureres og gennemføres. Det efterfølgende skal derfor betragtes som et forslag til, hvordan arbejdet med udpegning af områder, hvor der er hhv. stor og lille sandsynlighed for at infiltrerende vand strømmer til en kildeplads, kan udbygges, så der opnås et forbedret grundlag for eksempelvis at prioritere en beskyttelsesindsats.

Når beskyttelsesindsatsen skal prioriteres på baggrund af en usikkerhedsanalyse, kan opgaven opdeles i følgende skridt: (1) Udvalgelse af faktorer, der skal inddrages i usikkerhedsanalysen, (2) valg af metode, der skal anvendes til kvantificering af den resulterende usikkerhed, (3) bestemmelse af usikkerhed på de udvalgte faktorer, samt hvilke udfald af faktorerne, der skal analyseres, og (4) tolkning af simuleringresultater med henblik på bestemmelse af sikkerheden, hvormed sårbare områder kan udpeges.

I de følgende afsnit gives en kort beskrivelse af hvert af de ovenstående skridt, og metoderne anvendt i Århus Syd opgaven vurderes. Det skal bemærkes, at de anvendte metoder evalueres uden hensyntagen til resultatet af modellens prediktionsevner, som er vurderet i de foregående afsnit.

5.1 Udvalgelse af faktorer til usikkerhedsanalyse

Generelt skal en usikkerhedsanalyse inddrage de faktorer, hvor produktet af usikkerhed og sensitivitet (dvs. indflydelsen af en ændring af faktoren på simuleringresultatet) på den pågældende faktor er størst (se Højberg og Refsgaard, 2005). Hvis der eksempelvis er stor usikkerhed på værdien af den hydrauliske ledningsevne for en geologisk enhed, ville det umiddelbart være oplagt at inddrage den pågældende parameter i en usikkerhedsanalyse. Hvis modellens afgrænsning af infiltrationsområder stort set er uafhængig af den pågældende parameter, vil det imidlertid være et dårligt valg, da man i dette tilfælde kan variere parameteren indenfor et bredt interval, uden at det har indflydelse på de modelresultater, som der i det aktuelle tilfælde er fokus på. I stedet er det mere efficient at udvælge faktorer, som der både er en betydelig usikkerhed omkring, og hvor valget af den pågældende faktor er vigtig for simulering af det output, som man er interesseret i. For stationære grundvandsmodeller vil de faktorer, der kan komme på tale til en usikkerhedsanalyse primært bestå af elementer i den hydrogeologiske model (overordnet geologisk struktur, intern geologisk opbygning af geologiske enheder, type og placering af randbetingelser), parameterværdier (hydraulisk ledningsevne for geologiske enheder, etc.), samt drivende variable (indvindinger, størrelsen af randværdier – f.eks. værdien af et fastholdt trykniveau, randflukse – f.eks. værdien af anvendt nettonedbør).

På baggrund af Højberg & Refsgaard (2005) er der i tabel 2 lavet et eksempel på, hvordan udvælgelsen af faktorer, der inddrages i usikkerhedsanalysen, kan struktureres. I tabellen er der anført en række faktorer, som kunne forventes at have en signifikant indflydelse på simuleringen af kildepladsernes infiltrationsområde. For hver faktor er der lavet en vurdering af usikkerheden, dvs. hvor godt er størrelsen kendt, og vægten, dvs. hvor stor indflydelse har en ændring af faktoren på det modelresultat, der fokuseres på i den aktuelle opgave. Tabellen er kun medtaget for at vise et eksempel på, hvordan analysen kan struktureres. I det konkrete tilfælde vil det være nødvendigt for hver enkelt faktor at gennemføre en kvalificeret analyse af både usikkerhed og vægt.

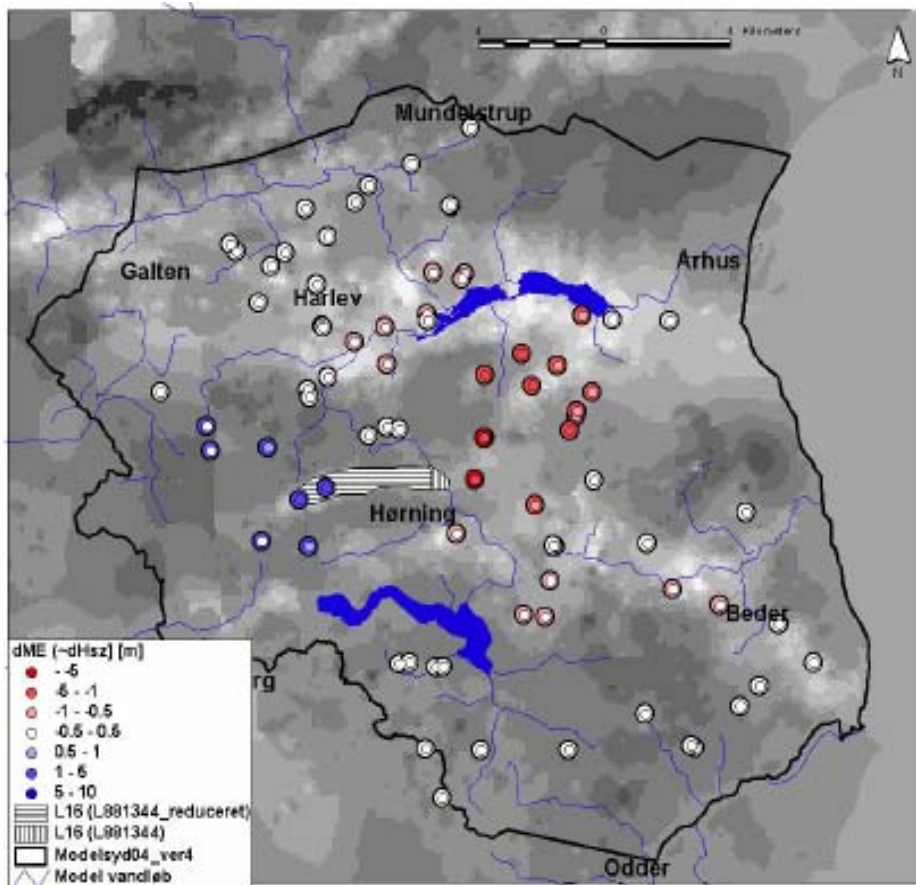
Søjlen til højre viser den resulterende effekt af hhv. usikkerhed og vægt, hvor 1 betyder stor effekt og dermed høj prioritering i en usikkerhedsanalyse. I det fiktive eksempel viser

analysen, at hvis der medtages faktorer ned til 2. prioritet, kunne det være hensigtsmæssigt at inddrage beliggenheden af prækvartæroverfladen, opbygningen af den kvartære geologi, hydraulisk ledningsevne, samt størrelsen af hhv. nettonedbør og grundvandsindvinding i usikkerhedsanalysen.

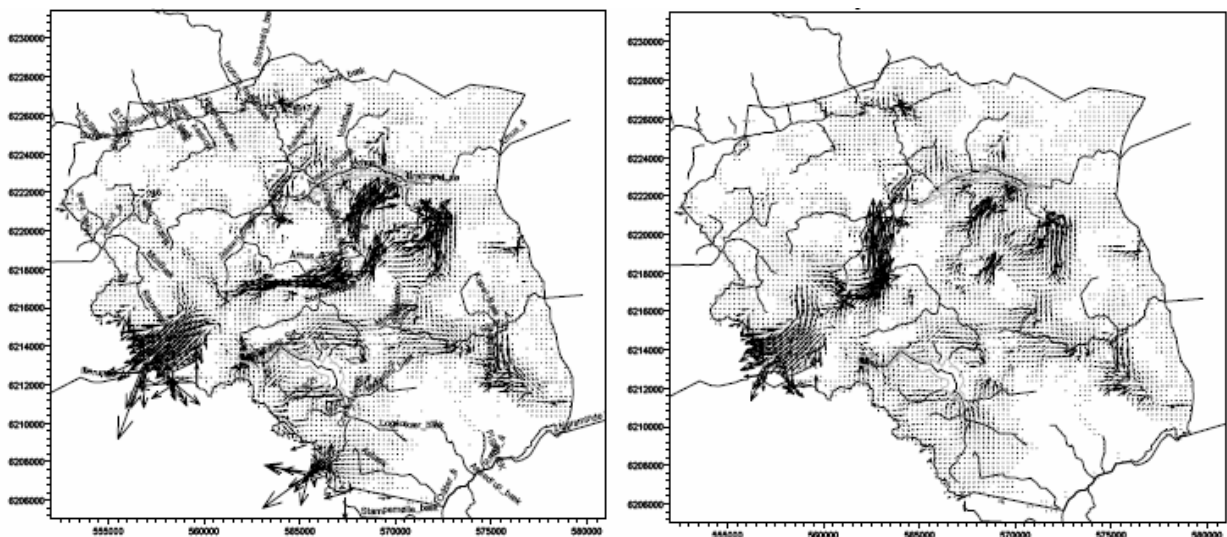
Ud fra det foreliggende materiale vurderes det, at der ikke er gennemført en stringent analyse af, hvilke faktorer der har størst effekt på simuleringen af beliggenheden af infiltrationsområderne til kildepladserne i Århus Syd modellen. Der er præsenteret resultater, der viser effekten af en strukturel ændring i geologien omkring Jeksen-dalen (se eksempler på figur 15 og 16). Der mangler imidlertid en undersøgelse af, hvordan forskellige faktorer influerer på bestemmelsen af infiltrationsområderne til kildepladser. Da det er infiltrationsområderne, der efterfølgende udgør grundlaget for prioritering af beskyttelsesindsatsen, er det vigtigt, at udvælgelsesproceduren udføres på infiltrationsområder.

Tabel 2 Eksempel på usikkerhedsmatrice for en grundvandsmodel. Det skal bemærkes, at vurderingen af usikkerhed, vægt og effekt er fiktive valg, og er kun indsat for eksemplets skyld.

USIKKERHEDSKILDE		Usikkerhed	Vægt	Effekt (prioritering)
DATA	Kalibreringsdata			
	- Potentiale	Lav	Middel	4
	- Afstrømning	Lav	Middel	4
	Nettonedbør			
	- Størrelse	Lav	Høj	3
	- Distribuering	Middel	Middel	3
	Indvinding			
	- Størrelse	Lav	Høj	3
	- Lokalisering	Lav	Høj	3
MODEL	Konceptuel model			
	- Prækvartæroverflade	Middel	Høj	2
	- Kvartær geologi	Høj	Middel	2
	- Rand	Middel	Lav	4
	Parametre			
	- Hydraulisk ledningsevne	Middel	Høj	2
- Porøsitet	Lav	Lav	5	
MANAGEMENT SCENARIER	Nettonedbør			
	- Størrelse	Høj	Høj	1
	- Distribuering	Middel	Middel	3
	Indvinding			
	- Størrelse	Middel	Høj	2
	- Lokalisering	Middel	Høj	2



Figur 15 Resultat af ændringer i den geologiske models (18. februar model) struktur. Små cirkler viser trykniveauændringen, når den østlige del af linsen i midten fjernes, mens de store cirkler viser trykniveauændringer, når hele linsen fjernes (DHI, 2005b).



Figur 16 Horisontale hastighedsvektorer i beregningslag 5 i hhv. 18. februar model (venstre) og 25. februar model (højre), (DHI, 2005b).

Det er i Århus Syd opgaven valgt at vurdere konsekvenserne af ændringer på strukturel geologi, nettonedbør og grundvandsindvinding. Baseret på sensitivitetsanalysen foretaget i forbindelse med udvælgelse af parametre til autokalibreringen, forekommer valget af nettonedbør som fornuftigt. Der skal imidlertid tages det forbehold, at sensitivitetsanalysen er udført på et system, der afviger en del fra model 18. februar og 25. februar, samt at sensitivitetsanalysen er udført på trykniveau og vandløbstilstrømning og ikke infiltrationsområder. Grundvandsindvindingen vurderes umiddelbart at have stor vægt ved simulering af infiltrationsområder, så hvis der vurderes at være markant usikkerhed på indvindingsraterne fremstår denne faktor intuitivt som værende fornuftig. Mht. til den strukturelle geologi, så har den numeriske model vist, at konnektiviteten mellem de veldefinerede begravede dale er vigtig for forudsigelsen af strømningsmønstret i området. Umiddelbart fremstår valget af geologisk struktur derfor også som en fornuftig beslutning.

Modelresultaterne viser imidlertid også, at den strukturelle geologi ikke kan forklare hele variationen i simuleret strømningsfelt og trykniveaufordeling. Både model 18. februar og 25. februar udviser basalt set de samme mangler mht. til simulering af 1995 data og indvindings-scenariet (dårlig overensstemmelse med observationsdata, tørlæggelse af indvindingsboringer). Der er derfor kraftige indikationer af, at den interne fordeling af hydrofacies i dalsystemerne er af stor betydning for simuleringens resultater. Da der sker en tilstrømning af vand fra de omkringliggende områder til dalene, vil placeringen af infiltrationsområderne imidlertid også være styret af den omkringliggende geologi. Hele den kvartære geologi vurderes derfor at have stor vægt i forbindelse med simulering af infiltrationsområder. Effekten af denne usikkerhed kunne belyses ved at undersøge, hvor stor indflydelse de definerede geoenheders parameterverdier har på simuleringen af infiltrationsområder. Dette kunne gøres ved enten at variere udvalgte parametre (de mest sensitive parametre), eller ved at vælge parametersæt fra Pareto-fronten (se f.eks. figur 2.7 i DHI, 2005b), som giver tilnærmelsesvis samme overensstemmelse mellem observeret og simuleret kalibreringsdata, som det endelige parameterestimater. Da fordelingen af geoenheder ligeledes vil influere på infiltrationsområdernes udformning, vil en sådan analyse kun kunne kvantificere en del af den samlede usikkerhed på den kvartære geologi.

5.2 Metoder til kvantificering af usikkerheden

Der findes adskillige metoder til kvantificering af usikkerheden, se Højberg og Refsgaard (2005). Hvilke metoder der kan anvendes i et givet tilfælde afhænger delvis af, hvor godt man kender usikkerheden på de faktorer, som er blevet udvalgt til usikkerhedsanalysen. Ofte har man et godt kendskab til usikkerheden på autokalibrerede parameterverdier, da der som biprodukt fra den automatiske parameteroptimering genereres resultater for usikkerheden på parametrene udtrykt f.eks. ved en varians (og en antagelse om statistiske fordeling). I det tilfælde karakteriseres usikkerheden som statistisk, og den resulterende modelusikkerhed kan kvantificeres ved f.eks. Monte Carlo metoden (se Højberg og Refsgaard, 2005, tabel 19.4). Hvis der er tale om faktorer, som vi ikke kender den statistiske fordeling på, men hvor udfaldsrummet er kendt, karakteriseres usikkerheden som scenario usikkerhed. I dette tilfælde kan man benytte en følsomhedsanalyse eller ”multiple model simuleringer”, hvor de udvalgte faktorer varieres indenfor realistiske intervaller. Desuden kan vi have med usikkerhedsfaktorer at gøre, hvor det kan være svært at kvantificere udfaldsrummet. Det er f.eks. tilfældet med den geologiske struktur i områder med sparsomme geologiske oplysninger.

I Århus Syd opgaven er det valgt at basere usikkerhedsanalysen på den metode, der i Højberg & Refsgaard (2005) betegnes følsomhedsanalyse. For hver af de udvalgte faktorer (geo-

logisk struktur, nettonedbør, grundvandsindvinding), foretages en eller to modelsimuleringer, hvor resultatet af at ændre på hver faktor kvantificeres. Hvert modelresultat betragtes som sandsynlige udfald af geologiske opbygning, og den fremtidige nettonedbør og grundvandsindvinding i området, og indgår derfor med lige vægt i den efterfølgende analyse. Fordelene ved en følsomhedsanalyse er ifølge Højberg & Refsgaard (2005), at metoden kræver forholdsvis få ressourcer at gennemføre, samt at det er muligt at belyse usikkerheden på enhver type variabel. Ulemperne ved metoden er, at der ikke stilles krav til en vurdering af, hvor sandsynlige de anvendte udfald af de udvalgte faktorer er, og at det derfor kan være svært at vurdere, hvor sandsynligt outputet er.

Når der gennemføres usikkerhedsanalyse på parameterverdier eller modelstruktur er det rimeligt at kræve, at alle realisationer resulterer i en troværdig model, dvs. en model som kan reproducere historiske data af f.eks. trykniveau og vandløbsafstrømning tilfredsstillende. Hvis modellen ikke længere reproducerer observerede data tilfredsstillende, må det resulterende output fra modellen forkastes, da det ikke er baseret på en velkalibreret model. Ved gennemførelse af management scenarier undersøges effekten af f.eks. ændret grundvandsindvinding i fremtiden. Troværdigheden af den pågældende realisation kan dermed ikke evalueres ved sammenligning med historiske data, men må i det tilfælde vurderes ud fra forventninger om fremtidens udvikling i vandbehov eller baseres på f.eks. "worst case" situationer. Resultaterne af sådanne management scenarier kan ikke umiddelbart valideres, men vil eventuelt kunne evalueres i en post audit, som kan gennemføres efter perioden, som management scenariet dækker, er forbi.

På baggrund af de tilgængelige ressourcer og formålet med Århus Syd arbejdet vurderes det, at anvendelse af en følsomhedsanalyse giver et tilstrækkeligt grundlag for en prioritering af beskyttelsesindsatsen. Hvis et bedre grundlag var ønskelig, kunne der for hver af de to konceptuelle modeller (18. februar og 25. februar) gennemføres Monte Carlo analyse på grundvandsindvinding og nettonedbør. Denne fremgangsmåde kræver, at varians og fordelingsfunktion for de to variable kan estimeres. Desuden stiller analysen meget større krav til computerkraft og efterfølgende resultatbearbejdning, end en følsomhedsanalyse gør. Gevinsten ved at vælge Monte Carlo metoden er til gengæld, at usikkerheden på infiltrationsområderne kortlægges detaljeret, og at man på baggrund af simuleringresultaterne direkte ville kunne aflæse sandsynligheden for at et givet punkt tilhører infiltrationsområdet.

5.3 Kvantificering af usikkerhed på udvalgte faktorer

5.3.1 Vurdering af usikkerhed og udfaldsrum

Hvis der er tale om parameterverdier, der er blevet estimeret vha. en invers optimering, vil der som nævnt ofte være information om parametrenes varians og fordelingsfunktion. For andre størrelser kendes fordelingsfunktionen ikke, men der kan frembringes kvalificerede bud på variationsbredden af den pågældende faktor. Det gælder f.eks. nettonedbør og grundvandsindvinding. Hvis der tale om kategoriske størrelser som den geologiske struktur, kan det være svært at definere et udfaldsrum. I dette tilfælde er man nødt til at basere sig på ekspertviden, f.eks. via forskellige geologers tolkning af geologien i et givent område.

I Århus Syd arbejdet er der udført to scenarier til kvantificering af usikkerheden på grundvandsindvindingen (scenarium 1 og 2). Scenarium 1 er baseret på informationer fra Århus Kommune Værker og kvantificerer effekten af at ændre på indvindingsraten ved to kildepladser (Harlev og Åbo, begge tilhørende Åboværket). Da den samlede indvinding fra de to kildepladser er den samme som i kalibreringsscenarioet, har dette scenarium minimal betyd-

ning for de øvrige kildepladser. Hvis usikkerhedsaspektet fik høj prioritet, ville det være interessant, hvis scenarium 1 blev defineret som et fremtidsscenario baseret på f.eks. eventuelle planer fra Århus Kommune Værker, planer for byudvikling samt prognoser for det fremtidige vandbehov, så der blev opnået en markant forskel mellem indvindingsraterne i modelkalibreringen og i scenariet.

I scenarium 2 benyttes tilladte indvindingsmængder til at definere et realistisk udfaldsrum for grundvandsindvindingen. For scenarium 3 benyttes der en nettonedbør, der udgør 70% af den, der er anvendt i modelkalibreringen. Hvis der fokuseres på usikkerhedsaspektet, ville det være interessant at foretage en reel vurdering af usikkerheden på hhv. den samlede fremtidige vandindvinding og nettonedbør. Der kunne eksempelvis defineres et variationsinterval (f.eks. $\pm 30\%$) på indvindingen, og usikkerheden på nettonedbøren kunne kvantificeres på baggrund af de tilgængelige data på nettonedbør, som der via opgaveløsningen er tilvejebragt (DHI, 2005a).

5.3.2 Valg af udfald til følsomhedsanalyse

Hvilke udfald af en given faktor der skal undersøges i usikkerhedsanalysen, afhænger dels af analysemetoden, dels af formålet med opgaven. Hvis hele udfaldsrummet undersøges og kvantificeres vha. f.eks. en Monte Carlo analyse, er det ikke afgørende, hvad resultaterne efterfølgende skal anvendes til. Resultatet af Monte Carlo analysen er normalt så generelt anvendeligt, at det kan benyttes til de fleste formål. Hvis der udføres en følsomhedsanalyse til kvantificering af usikkerheden, er det imidlertid nødvendigt på forhånd at identificere hvilke udfald, der kan opfylde opgavens formål. Hvis formålet er at minimere risikoen for, at en kildeplads udsættes for forurening, vil man vælge parameterudfald, der stresser det undersøgte system mest muligt (høje indvindingsrater, lave grundvandsdannelse, lave hydrauliske ledningsevner, osv.). Hvis formålet omvendt er at minimere chancen for at udpege områder, der reelt ikke udgør infiltrationsområde til kildepladsen, vil man definere scenarier, der resulterer i et beskedent pres på systemet.

Det er relevant at overveje, hvilke udfald af nettonedbør og grundvandsindvinding der skal vælges, når målet er at identificere områder, hvor infiltrerende vand med stor sikkerhed havner i indvindingsboringer. Der ønskes med andre ord et konservativt estimat på den enkelte kildeplads' infiltrationsområde. Det vurderes derfor, at det er mest optimalt at udvælge værdier indenfor variationsområdet for hhv. nettonedbør og grundvandsindvinding, som resulterer i de mindste infiltrationsområder. Eksempelvis kan nettonedbøren specificeres til 30% højere, end den der er anvendt under kalibreringen, og grundvandsindvindingen kan reduceret med 30%. De resulterende infiltrationsområder ville blive relativt små, men til gengæld vil man have forholdsvis stor sikkerhed for, at de simulerede infiltrationsområder ikke overvurderer det sande infiltrationsområde.

Hvis formålet er at udpege sandsynlighedsområder, er det til gengæld hensigtsmæssigt at gennemføre scenarier, der presser systemet mere end tilfældet var i kalibreringssituationen. Her er det netop formålet at identificere alle områder, der potentielt kan bidrage med vand til kildepladserne.

6 Konklusioner

Der er i nærværende rapport foretaget et review af modelarbejdet udført på Århus Syd området bestående af Åbo, Stautrup, Storskoven, Østerby og Beder indsatsområder. Der er foretaget en vurdering af modellens opbygning samt modellens kalibrerings- og valideringsresultater. På dette grundlag vurderes det, at modellen kan bidrage med væsentlig information om grundvandsstrømningen og udpegningen af infiltrationsområder til kildepladserne i området. Pga. geografiske forskelle i modellens evne til at reproducere historiske data har det imidlertid været nødvendigt at opdele modelområdet i en nordlig og en sydlig del, hvor modellen i den sydlige del har større gyldighedsområde end i den nordlige del.

Sydligt område

I den sydlige del af modelområdet vurderes modellen at have høj troværdighed, og vil her kunne anvendes til både at analysere det eksisterende system samt til at evaluere effekten af fremtidige ændringer, som det har været undersøgt i de gennemførte scenarieanalyser. Modellen kan med andre ord benyttes til at kvantificere effekten af ændringer i f.eks. fremtidig grundvandsindvinding, nettonedbør, eller fordeling i arealanvendelse. Modellen kan i den sydlige del af modelområdet derfor anvendes til at belyse usikkerheden på infiltrationsområder til kildepladserne i området under andre indvindings- og nettonedbørs-forhold end de nuværende.

Modellen vurderes derfor at kunne svare på spørgsmålet om, hvorvidt nedsivningen fra sårbare områder indenfor indsatsområderne indgår i grundvandsdannelsen til de dybe magasiner, der benyttes til vandforsyning.

Der er foretaget en vurdering af metoden, der er anvendt til at prioritere beskyttelsesindsatsen i området. Metoden resulterer potentielt i udpegning af såkaldte kerneoplande, hvor der er stor sikkerhed for, at infiltrerende vand havner i kildepladsen, og sandsynlighedsområder, som inkluderer et område, udenfor hvilket der er forholdsvis lille sandsynlighed for at infiltrerende vand bidrager til kildepladsen. Metoden, der benyttes til bestemmelse af kerneoplande, kan karakteriseres som en følsomhedsanalyse, hvor effekten af bl.a. geologi, grundvandsindvinding og nettonedbør kvantificeres mht. infiltrationsområder til kildepladserne. Den benyttede metode anses for acceptabel til det foreliggende formål, om end det ville være ønskeligt om analysen blev udvidet til at inkludere flere usikkerhedsfaktorer. En yderligere belysning af usikkerheden på de grundvandsdannende oplande kunne opnås ved at gennemføre scenarier, hvor systemet udsættes for et mindre pres (reduceret indvinding, øget nettonedbør) end under kalibreringssituationen. Modellen anses imidlertid for anvendelig til at besvare spørgsmålet om, hvilke dele af de grundvandsdannende oplande der kan henføres til specifikke vandværker, og modellen anses ligeledes anvendelig til at bestemme hhv. kerneoplande, hvor der er stor sikkerhed for at der dannes vand til vandværket, og sandsynlighedsområder, hvor der med en vis sandsynlighed dannes vand til vandværket.

I den sydlige del af modelområdet er der foretaget en vurdering af de identificerede kerneoplande til i alt 17 kildepladser. I 8 tilfælde vurderes det udpegede kerneopland (eller mangel på samme) at være rimeligt. I ét tilfælde vurderes det udpegede kerneopland af skalamæssige årsager ikke med rimelighed at kunne identificeres. I 3 tilfælde vurderes det, at kerneoplandene kan udvides, mens det i 5 tilfælde vurderes at være hensigtsmæssigt at udpege et kerneopland, til trods for at det i DHI (2005c) blev undladt.

Det skal bemærkes, at ovenstående anbefalinger er fremsat med udgangspunkt i, at modellen i den sydlige del har overholdt opstillede kalibreringskrav og valideringstests. Modellen anses derfor som værende i stand til at prediktere trykniveaufordelingen og dermed også ind-

vindingsoplande og infiltrationsområder, selvom den naturligvis stadig vil være behæftet med usikkerhed som følge af usikkerheder på modelinput som f.eks. geologisk tolkning og arealanvendelse. Desuden antages det i vurderingen af kerneoplande, at de gennemførte følsomhedsanalyser kvantificerer de største usikkerhedskilder i systemet mht. infiltrationsområder.

Nordligt område

I den nordlige del af modelområdet vurderes modellen at have begrænset anvendelighed, således at kun simuleringsresultater, der er baseret på samme randbetingelser (grundvandsindvinding, nettonedbør) som anvendt under kalibreringen af modellen, kan benyttes til analyse af kildepladsspecifikke infiltrationsområder. Det findes derfor vanskeligt på basis af kun resultater fra kalibreringskørslerne at foretage en prioritering af beskyttelsesindsatsen, og det vurderes ikke muligt på baggrund af modelresultaterne alene at udpege kildepladsspecifikke kerneoplande og sandsynlighedsområder. Hvis der skal foretages en prioritering af beskyttelsesindsatsen i den nordlige del af modelområdet, vil modelresultaterne imidlertid være værdifulde i kombination med andre informationer (f.eks. rimelighedsbetragtninger omkring infiltrationsområdernes beliggenhed i forhold til indvindingsboringerne). Det vurderes imidlertid at være rimeligt at benytte resultaterne fra scenarieberegningerne til en vurdering af den samlede vandbalance og det samlede grundvandsdannende område indenfor fokusområdet under et. Der skal her tages hensyn til, at modellens præcision er dårligere i det nordlige end i det sydlige område (jvnf. valideringsresultatet), og at der må forventes at være en relativ stor usikkerhed på afgrænsningen af det samlede grundvandsdannende område mod nord.

På baggrund af analysen vurderes modellen at kunne svare på spørgsmålet om, hvorvidt nedsivningen fra sårbare områder indenfor indsatsområderne indgår i grundvandsdannelsen til de dybe magasiner, der benyttes til vandforsyning. Til gengæld kan modellen ikke benyttes til med rimelig sikkerhed at fastlægge, hvilke dele af de grundvandsdannende områder, der hører til specifikke kildepladser og vandværker.

Årsagen til modellens troværdighedsproblemer i den nordlige del af modelområdet vurderes primært at skyldes mangler i den geologiske model, som enten kan skyldes den udførte tolkning eller manglende datagrundlag for opstilling af den geologiske model. Det vurderes derfor ikke som værende sandsynligt, at en dynamisk model ville kunne give et signifikant bedre resultat mht. infiltrationsområder til områdets kildepladser. En dynamisk model ville ikke i samme grad som en stationær model lide under problemerne med ikke-stationære forhold i det modellerede system, men da dette problem ikke anses som det primære i Århus Syd området, er det tvivlsomt, om der ville kunne opnås betydeligt bedre bestemmelse af infiltrationsområder og indvindingsoplande med en dynamisk model.

7 Referencer

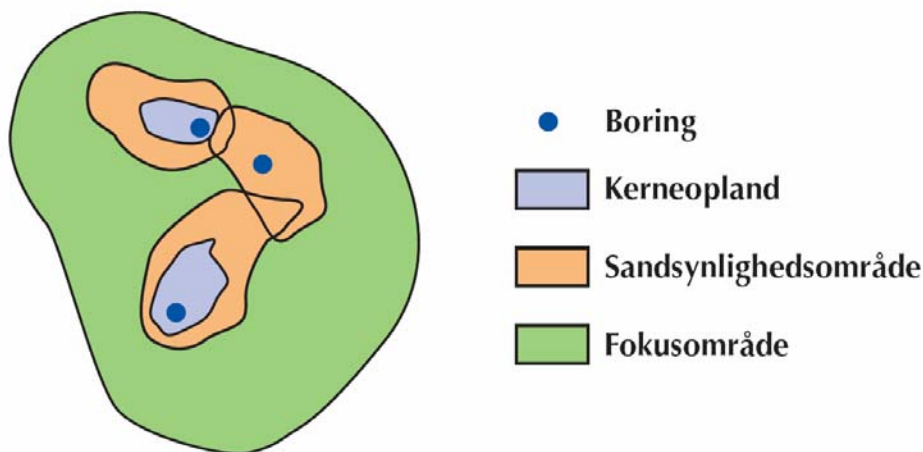
- DHI (1998), Hydrogeologisk model for Århus Amt – Udvidelse af tidligere model. Hovedrapport samt Bilagsrapport, november 1998.
- DHI (2002), Indsatsområde Århus Nord-02, modellering. Hydrogeologisk model – zonerung og parametrisering, december 2002.
- DHI (2004), AUTOCAL, Auto calibration tool, User guide, DHI Software 2004.
- DHI (2005a) Århus Syd indsatsplanlægning, Hydrogeologisk og numerisk model, Udført for Århus Amt af DHI, Gudbjerg, J., og M. Kristensen, Januar 2005.
- DHI (2005b) Århus Syd indsatsplanlægning, Kalibrering af numerisk model, Udført for Århus Amt af DHI, Gudbjerg, J., og M. Kristensen, Oktober 2005.
- DHI (2005c) Århus Syd indsatsplanlægning, Udpegning af grundvandsdannende oplande, Kristensen, M., Oktober 2005.
- DHI (2005d) Århus Syd indsatsplanlægning, Model 25. feb., Yderligere kalibrering samt præsentation af model, J. Gudbjerg, November 2005.
- DHI (2005e) Indsatsområde Århus Syd, modellering. Scenarier, J. Gudbjerg, November 2005.
- Højberg, A.L., J.C. Refsgaard (2005), Metoder til usikkerhedsvurdering, Kapitel 19 i Håndbog i grundvandsmodellering, Eds. T.O. Sonnenborg, H.J. Henriksen, GEUS.
- Sonnenborg, T.O. (2001), Kalibrering af strømningsmodel, Kapitel 10 i STÅBI i grundvandsmodellering, Eds. H.J. Henriksen et al., GEUS rapport 2001/56.
- Sonnenborg, T.O., P. Engesgaard, og H.J. Henriksen (2005), Partikelbanemodellering og alderssimulering, Kapitel 18 i Håndbog i grundvandsmodellering, Eds. T.O. Sonnenborg, H.J. Henriksen, GEUS.
- Århus Amt (2005), Undersøgelser og beslutninger i forbindelse med evalueringen af 18. feb. Og 25. feb modellerne, Internt notat udarbejdet af B. Hansen, B.E. Jordt og S.W. Grønhøj, September 2005.

Appendix 1: Udpegning af kerneoplande

Udpegningen af grundvandsdannende områder kan inddeles i nedenstående tre trin:

1. Beskyttelse af drikkevandet bør overordnet ske ved at tage udgangspunkt i alle de sårbare områder. Modelresultaterne viser, at vandindvindingsanlæggene i området stort set indvinder vand fra alle områder inden for fokusområdet.
2. Ønskes en nærmere opdeling af, hvilke dele af den samlede udbredelse af de grundvandsdannende oplande der bidrager med vand til de enkelte kildepladser kan de sandsynlige grundvandsdannende oplande benyttes. De sandsynlige grundvandsdannende oplande består af et sandsynlighedsområde og evt. et kerneopland.
3. Ønskes der stor sikkerhed for, at det grundvand der dannes rent faktisk også indvindes ved en given kildeplads, skal der refereres til kerneoplandet. Ved anvendelse af kerneoplandet er der ikke gjort rede for alt det vand, der indvindes ved kildepladsen og dette vil således kun udgøre en del af det egentlige grundvandsdannende opland til kildepladsen. Til gengæld er der stor sikkerhed for, at kerneoplandet er en del af det grundvandsdannende opland til kildepladsen.

De tre trin er illustreret på nedenstående skitse:



Skitse over udpegning af grundvandsdannende områder