

# Test af Analytiske Element Modeller (AEM) sammenlignet med den numeriske metode til udpegning af indvindingsoplande

(Delprojekt 1 om oplande)

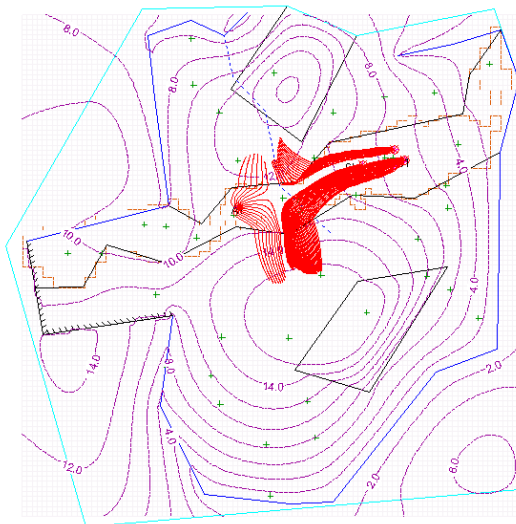
Claus Holst Iversen, GEUS, Thomas Wernberg, ALECTIA  
og Thomas Nyholm, Miljøcenter Århus





# Test af Alytiske Element Modeller (AEM) sammenlignet med den numeriske metode til udpegning af indvindingsoplunde

Oktober 2009



**Udarbejdet af:** Claus Holst Iversen, GEUS, Thomas Wernberg, ALECTIA og Thomas Nyholm, Miljøcenter Århus

**Test af den Analytiske element metode (AEM) sammenlignet med den numeriske metode til udpegnig af indvindingsoplande**

Særudgivelse

Omslag: Henrik Klinge  
Repro: GEUS  
Oplag: 150

Oktober 2009

ISBN      web: 978-87-7871-257-8  
            Tryk: 978-87-7871-256-1

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

©      Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, GEUS  
          Øster Voldgade 10  
          DK-1350 København K  
          Telefon: 38142000  
          E-post: [www@geus.dk](mailto:www@geus.dk)

Udarbejdet i samarbejde med By- og Landskabsstyrelsen, Miljøministeriet.

<b>1 BAGGRUND .....</b>	<b>5</b>
<b>2 AEM MODELLER .....</b>	<b>6</b>
2.1 INDLEDNING .....	6
2.2 BRUGEN AF ANALYTISKE MODELLER .....	7
2.2.1 <i>Anvendelsen af analytiske metoder i Danmark</i> .....	7
2.2.2 <i>Historisk brug af AEM modeller</i> .....	7
2.2.3 <i>Andre applikationsområder med AEM modeller</i> .....	10
2.2.4 <i>Sammenligning af AEM og finite difference modeller</i> .....	11
2.3 VALG AF VÆRKTØJ .....	12
2.3.1 <i>Nogle tommelfingerregler for brugen af AEM modeller</i> .....	13
2.3.2 <i>AEM Ressourcer</i> .....	14
2.4 EKSEMPEL PÅ OPSTILLING AF EN SIMPEL AEM MODEL .....	15
2.4.1 <i>Modelopstilling</i> .....	16
2.4.2 <i>Modelkalibrering</i> .....	17
<b>3 KOMPARATIV ANALYSE AF OPLANDE BEREGNET MED MODFLOW, AEM OG DEN ANALYTISKE HÅNDTEGNINGSMETODE .....</b>	<b>18</b>
3.1 METODE .....	19
3.1.1 <i>Scenarietyper</i> .....	19
3.1.2 <i>Arbejdsgang</i> .....	19
3.1.3 <i>Modelopstillinger</i> .....	20
3.2 MODEL A - HEDESLETEN .....	22
3.2.2 <i>Modflow model</i> .....	23
3.2.3 <i>Håndtegnede oplande</i> .....	24
3.2.4 <i>AEM model</i> .....	25
3.2.5 <i>Resultater</i> .....	28
3.2.6 <i>Sammenfatning på oplande fra hedesletten</i> .....	31
• MODEL B - BEGRAVET DAL .....	32
3.2.7 <i>Data</i> .....	32
3.2.8 <i>MODFLOW model</i> .....	33
3.2.9 <i>Håndtegnede oplande</i> .....	35
3.2.10 <i>AEM model</i> .....	35
3.2.11 <i>Modelkalibrering</i> .....	36
3.2.12 <i>Resultater</i> .....	37
3.2.13 <i>Sammenfatning på oplande fra den begravede dal</i> .....	41
3.3 MODEL C - RANDZONE GEOLOGI .....	42
3.3.1 <i>Opstilling</i> .....	42
3.3.2 <i>Modflow model</i> .....	42
3.3.3 <i>Håndtegnede oplande</i> .....	44
3.3.4 <i>AEM model</i> .....	44
3.3.5 <i>Resultater</i> .....	47
3.3.6 <i>Sammenfatning på oplande fra ø med rodet geologi</i> .....	49
3.4 MODEL D – KALKMAGASIN .....	50
3.4.1 <i>Data</i> .....	50
3.4.2 <i>Modflow model</i> .....	51

3.4.3	<i>Håndtegnede oplande</i> .....	52
3.4.4	<i>AEM model</i> .....	52
3.4.5	<i>Kalibrering</i> .....	54
3.4.6	<i>Resultater</i> .....	54
<b>4</b>	<b>DISKUSSION OG KONKLUSION</b> .....	<b>60</b>
4.1.1	<i>AEM modeller som værktøj</i> .....	62
4.2	KONKLUSIONER.....	62
<b>5</b>	<b>REFERENCE</b> .....	<b>64</b>

# 1 Baggrund

I forbindelse med revision af Geo-Vejledning nr. 2 om Indvindings- og grundvandsdannende oplande /1/ skal der udarbejdes et afsnit om Analytiske Element Modeller (AEM) evalueres mht. oplandsberegninger, specielt i forbindelse med trin 1 kortlægningen /2/. Derfor er denne rapport udarbejdet, der bygger på undersøgelser af AEM-metoden sammenlignet med den numeriske finite differens metode (fx MODFLOW) for 4 forskellige geologiske miljøer.

Anbefalinger og konklusioner fra denne rapport vil indgå i den reviderede udgave af Geo-Vejledningen om oplande.

## 2 AEM modeller

### 2.1 Indledning

Grundvandsmodeller har været benyttet som redskab i forbindelse med mange hydrologiske opgaver, og i de sidste 20-30 år har modelredskabet været en fast del af arbejdsprocessen. Modellerne er velegnede, idet de kan benyttes til adskillige formål, heriblandt vurdering af vandbalancer, oplandsberegninger og konsekvensanalyse i forbindelse med etablering af indvinding. Ydermere kan modeller benyttes til at teste og evaluere geologiske modeller.

Det har i Danmark og i andre lande været sædvane/3/ at opbygge modellerne omkring numeriske *finite difference modeller (FDM)* eller *finite element modeller (FEM)*, hvor MODFLOW og MIKE SHE i Danmark har været, og fortsat er, de mest anvendte, med FDM som den typisk anvendte kodetype. FEFLOW udgør et eksempel på en FEM model, men antallet af applikationer med denne kode er mere begrænset i Danmark.

Allerede i starten af 1980'erne dukkede der en anden type modeller op /4/. Denne modeltype byggede på analytiske metoder og fik forkortelsen AEM (Analytisk Element Metode). AEM modellen bygger på sammensætningen af elementer, der hver især har én løsning, og den samlede løsning findes vha. superposition af analytiske funktioner. De analytiske funktioner kaldes for analytiske elementer, som hver især repræsenterer nogle strømningsforhold i grundvandsmagasinet. Man kan eksempelvis i AEM benytte et linie-element til beskrivelse af et vandløb. De hydrologiske egenskaber er bestemt af elementerne, og der benyttes ikke et grid, som man ser i de diskrete metoder som *finite difference* eller *finite element* metoderne. Overordnet set kan man placere AEM modellerne mellem de rene analytiske løsninger (fx Theis løsningen) og de numeriske løsninger (fx FDM og FEM), /4/.

Det at modellerne ikke arbejder i et beregningsgrid, betyder, at man kan arbejde med AEM modeller mere uafhængigt af skala, og på regional skala kan have nogle overordnede randbetingelser som kyst, søer og vandløb, mens man på lokal skala kan have en langt større detaljeringsgrad. Omvendt er der nogle begrænsninger i AEM fx når det gælder modellering i tre dimensioner og beskrivelse af ikke stationære forhold. De fleste AEM modeller benytter en to dimensional modelapproximation af et grundvandsmagasin under Dupuits-Forchheimers antagelse om, at grundvandsstrømningen i magasinet er horisontal. Denne antagelse er generelt brugbar på regional skala, hvor man også kan slå flere magasiner sammen, men gælder fx ikke i områder hvor vertikal strømning er dominerende, fx nær grundvandskel, omkring delvist filtersatte borer i øvre magasiner eller omkring vandløb under visse hydrogeologiske forhold /3/.

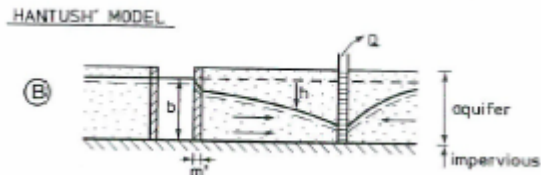
AEM modellerne har været anvendt i forbindelse med grundvandsbeskyttelse og afgrænsning af indvindingsoplande.



## 2.2 Brugen af analytiske modeller

### 2.2.1 Anvendelsen af analytiske metoder i Danmark

De analytiske metoder har været benyttet i sagsbehandling igennem adskillige dekader. Brugen har f.eks. været tilknyttet analytiske beregninger af vandløbspåvirkning eller beregning af sænkning ved vandindvinding /9/. Figur 2-1 viser et eksempel på en analytisk tilgang.



Figur 2-1: Eksempel på en simpel analytisk beregning af vandløbspåvirkning fra en indvinding. Fra /6/.

Antagelserne for de simple analytiske løsninger er ofte ens for de mange løsninger, eksempelvis et uendelig homogent magasin, vandløbet er lige og uendeligt langt og strømmingen er horisontal. Når man benytter analytiske metoder, er disse antagelser nødvendige, idet de fastlægger grundlaget for den forenklede beregning, som en analytisk løsning forudsætter.

Disse simple analytiske løsninger benyttes stadig i daglig sagsbehandling i Danmark - specielt inden for kommunalt regi i forbindelse med indledende hydrologiske vurderinger til eksempelvis vurdering af vandløbspåvirkning i forbindelse med indvindingstilladelser. Løsninger hertil er eksempelvis implementeret i GeoGIS 2000 /12/, KMD's STRUKTURA /13/ og BEST fra NIRAS /14/. Fælles for disse er, at de beregner en enkelt analytisk løsning uden at tage hensyn til indbyrdes påvirkning af vandløb og borer, samt heterogenitet og fx tidslige variationer. De analytiske løsninger er siden hen blevet udvidet med mere komplicerede formuleringer, hvis løsninger kan findes ved superposition, eksempelvis /10/ og /11/.

Brugen af en analytisk tilgang til beregning af indvindingsoplande har været benyttet i adskillige år. En af de mere simple tilgange er den man benytter i forbindelse med de boringsnære beskyttelsesområder. Ved simple analytiske betragtninger afgrænses en beskyttelseszone omkring indvindingsboringer, BNBO, /15/. I Miljøstyrelsen har man desuden benyttet en analytisk tilgang til oplandsberegninger, /16/, en metode som også er beskrevet i Geo-Vejledning nr. 2 første del /1/. Der findes i denne forbindelse forskellige metoder, og fælles for metoderne er, at man ved et begrænset ressource- og tidsforbrug kan komme med et første estimat på udbredelsen af et indvindingsopland, under forudsætning af nogle ret forenklede betragtninger.

### 2.2.2 Historisk brug af AEM modeller

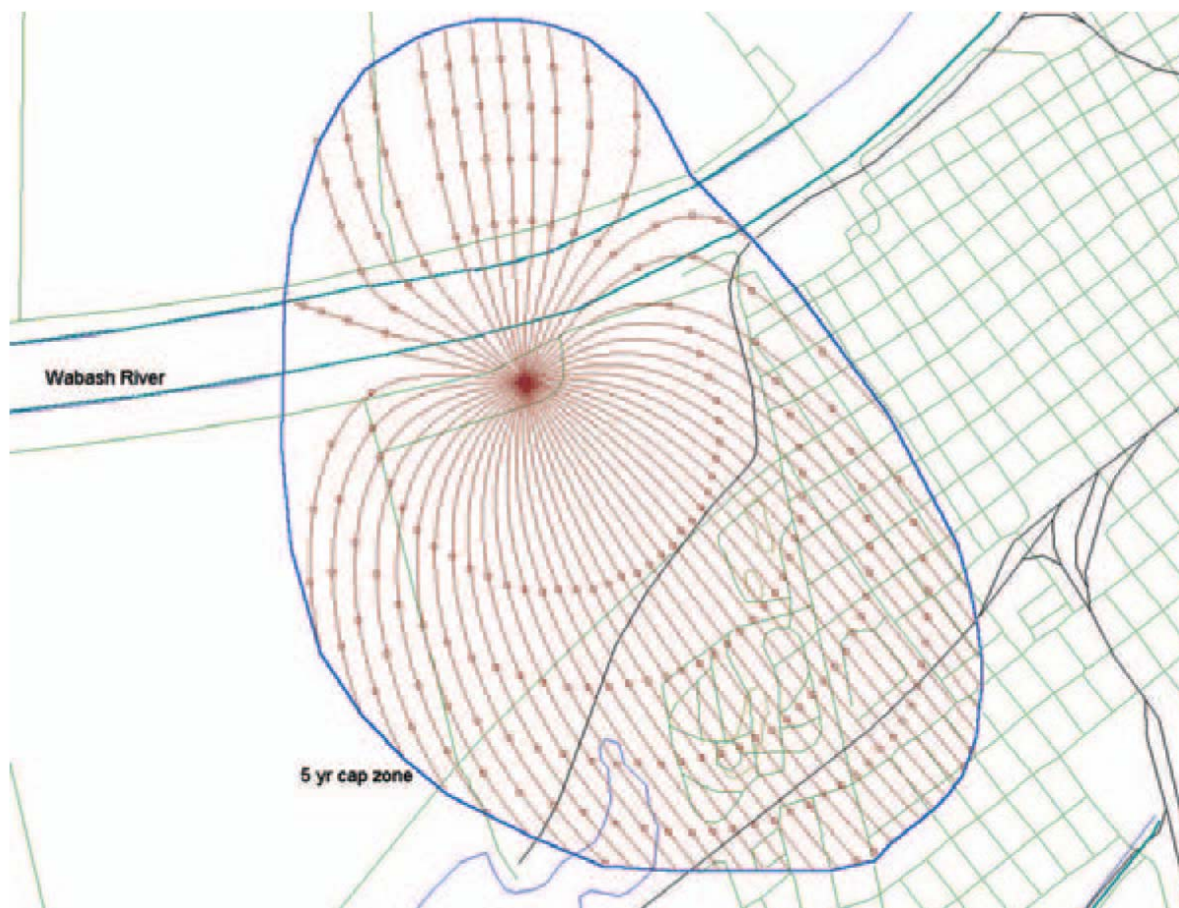
Den historiske brug af AEM modeller går tilbage til starten af 80'erne, hvor strømningsmodellerne i *finite difference* var begrænset af computerkraften og derfor havde en meget begrænset detaljeringsgrad eller gav nogle barrierer i forhold til regional modellering /17/. Her blev det nødvendigt at formulere andre metoder til at udføre beregninger af fx grundvands-overfladevandsinteraktion i større områder med mange vandløb. Kodeudviklingen med AEM modeller har siden udviklet sig

på næsten alle områder, hvor der i dag også benyttes strømningssmodeller - fra storskala regionale modeller til detailmodellen på meget lille skala. Et godt review af AEM modelapplikationer kan findes i /17/. Den mere praktiske anvendelse af AEM har dog været ret begrænset bl.a. på grund af problemerne med at beskrive heterogenitet og dermed modellering af grundvandssystemet i 3-D. Muligheden for at anvende forskellige typer randbetingelser fx ved vandløb eller grundvands-skel er også ret begrænset ved metoden. Endelig er der også begrænsninger i forbindelse med beskrivelse af transient strømning da AEM kun kan beregne den stationære løsning.

### **Grundvandsbeskyttelse og oplandsberegninger**

I forbindelse med grundvandsbeskyttelsen har man i Nordamerika ved U.S. Environmental Protection Agency (EPA) arbejdet med begrebet Well Head Protection Area, (WHPA), som er det nordamerikanske boringsnære beskyttelsesområde. Her anbefales til screeningsformål forskellige analytiske tilgange bl.a. AEM. I den analytiske element model tilgang til WHPA er der udarbejdet software (WHPA), /18/, /19/ og /20/, til oplandsberegninger ved at medtage elementer for uendeligt lange vandløb samt rektangulære områder uden hydrogeologisk kontakt (no flow). Programmet beregner et trykniveau og benytter herefter partikelbaner til at estimere indvindingsoplandet, idet man kan beregne en analytisk løsning til selve indvindingsoplandet. De første versioner af programmet benytter en DOS tilgang og er i dag forældet, men den analytiske tilgang og konceptet med simpel modellering har været med til at udvikle de programmer, man kan få i dag. En gennemgang af WHPA og sammenligning med andre analytiske metoder kan desuden findes i /22/.

Et af områderne hvor AEM modellerne har fundet praktisk anvendelse er i forbindelse med indvindingsboringer og grundvandsbeskyttelse. Boringsnær beskyttelse af grundvandet (BNBO, /15/) går fra simpel fast radius (300 m) omkring boringen til oplande beregnet med avancerede strømningssmodeller. AEM modellerne repræsenterer her en niche, idet disse kan håndtere indsamlede data og samtidig er relativ nemme at bruge og hurtige at opstille. Dermed er AEM potentiel anvendelig til afgrænsning af indvindingsoplande, opholdstider og transporttider til fx boringer.



**Figur 2-2: Eksempel på 5 års indvindingsopland beregnet med WhAEM. Fra /28/.**

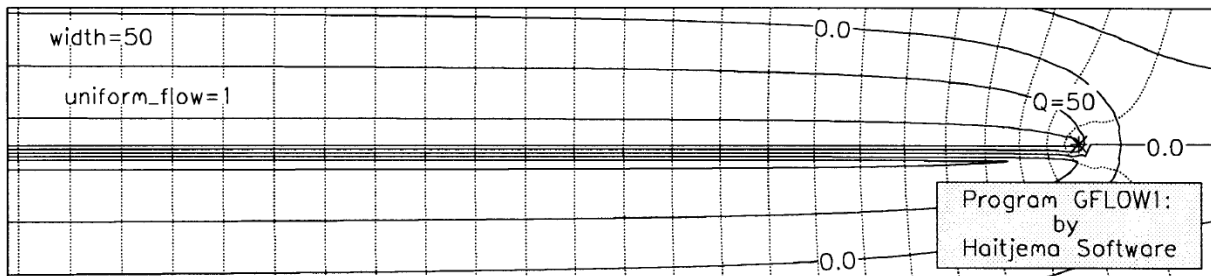
I løbet af 1990'erne foregik der en markant kodeudvikling af analytisk element metoden bl.a. til brug for beregning af indvindingsoplande i forbindelse med grundvandsbeskyttelse. Her udvikledes CZAEM (Capture Zone AEM, /29/) med fokus på estimering af indvindingsoplande. Metoden bygger i CZAEM på, at den endelige løsning findes som superposition af enkelte analytiske funktioner, hvor hver funktion repræsenterer kendte hydrologiske egenskaber, eksempelvis indvindingsboringer (punkter), vandløb (linjesegmenter) og geologiske heterogeniteter. Konceptet bag superposition, af de enkelte løsninger og beskrivelse af AEM kan findes i /30/ og /31/.

Metoden bag CZAEM bygger på løsning af todimensionale analytiske elementer, hvor Dupuit-Forchheimers antagelse er opfyldt /34/. Det antages, at grundvand strømmer horisontalt i et frit magasin, og at strømmingen er proportional med mægtigheden af grundvandsmagasinet. I forbindelse med indvindingsoplande kan denne antagelse benyttes, når bredden af indvindingsoplandet er ca. 1 størrelsesorden større end magasintykkelsen /28/. CZAEM løsningsmetoden blev indbygget i WhAEM og senere tilknyttet andre mere sofistikerede løsere til WhAEM – heriblandt GFLOW1 /31/. GFLOW er videre benyttet som redskab til beregning af indvindingsoplande og blev med GIS kobling til hydrologiske data benyttet bl.a. i forbindelse med grundvandsbeskyttelse.

WhAEM, /23/, /24/, /25/ og /28/ udvikles som et værktøj til bestemmelse af beskyttelseszoner omkring indvindingsboringer. Ud over en ny brugerflade kan programmet benytte vandløbssegmenter og heterogene hydrauliske zoner med varierende form. Der er stadig begrænsninger i form af, at man ikke kan benytte varierende bundkoter for magasinerne, 3-dimensionelle elemen-

ter, flerlagsmodeller og transiente forhold, som de traditionelle numeriske strømningmodeller understøtter, eksempelvis MODFLOW /26/ og MIKE SHE /27/. Dette betyder dog, at denne konceptuelle tilgang til grundvandsmodeller tillader en mere simpel forståelse af de hydrogeologiske forhold.

Videreudviklingen af WhAEM sker løbende, og programmet er i dag en del af de metoder som U.S. Environmental Protection Agency anbefaler, man kan benytte til bestemmelse af indvindingsoplade /3/.



Figur 2-3: Eksempel på strømlinjer til en indvindingsboring fra GFLOW. Fra /33/.

Den første software der inkluderede flerlagsmodeller var ModAEM, der blev færdigudviklet omkring år 1999 og desuden inkluderede muligheden for processoropsplitning /21/. Det brugervenlige Visual Bluebird udvikledes herefter som et mere generelt system, der kunne benytte forskellige lødere afhængig af kompleksiteten, og videreudvikledes senere til VisualAEM /36/.

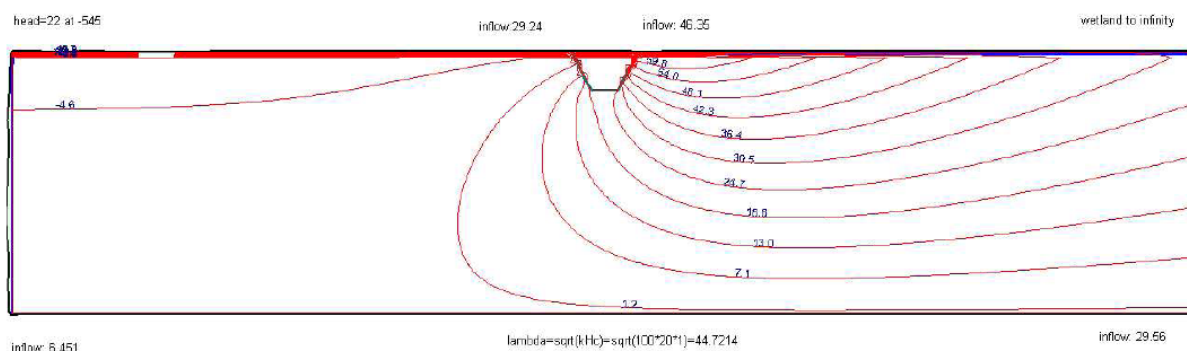
Udviklingen af AEM modellerne sker hele tiden og nye elementer produceres. Dette kan være elementer med anisotropi eller håndtering af horisontale eller skrånede borer /39/. Disse elementer er endnu ikke indarbejdet i den tilgængelige software, men med tiden vil disse også kunne håndtere mere komplekse systemer.

Ydermere udvikles AEM modeller med brugerflader i GIS. ArcAEM er en udvidelse til ESRI's ArcGIS, men benytter samme motor (Split) som VisualAEM. Fælles for den software og de koder, som er tilgængelige for AEM er, at der ikke som i fx MODFLOW er tale om en 'enhedskode' men om mange forskellige koder, og at de alle forudsætter stationære 2D løsninger. Der forskes dog i udvikling af 3D og i transiente løsninger, men i praktiske anvendelser er stationære 2D antagelser langt den mest udbredte anvendelse. En del af den eksisterende software er public domain og udviklet under GNU licens. Dvs. software som WhAEM og VisualAEM kan downloades og benyttes uden betaling. Dette gælder ligeledes for MODFLOW-koden som er udviklet af USGS.

Kapitel 2.3.2 og 2.3.2.2 gennemgår nogle af de tilgængelige AEM ressourcer og AEM software.

### 2.2.3 Andre applikationsområder med AEM modeller

AEM modeller kan også benyttes til at beregne strømning i det vertikale plan. Sådanne modeller kan benyttes til nærmere analyse af grundvand / vandløbsinteraktioner og undersøgelser af vådområder /37/.



**Figur 2-4: Eksempel på en vertikal AEM model. Fra /37/.**

AEM modeller er desuden benyttet som simple randbetingelser for mere detaljerede numeriske strømningssmodeller. I /36/ forslås det, at man ved usikkerhed omkring randbetingelser i regional skala strømningssmodeller opstiller en AEM model, hvorfra man kan trække randbetingelser til mere detaljerede strømningssmodeller.

Sammenfattende kan man klassificere AEM modeller som en modeltype, der i kompleksitet og anvendelse ligger et sted mellem de rene analytiske løsninger og de numeriske modeller (FDM og FEM). I tabel 1 er denne klassificering af AEM kort sammenfattet.

	Analytisk (fx Theis)	Analytisk element model (AEM)	Numerisk model (FDM og FEM)
Løsning af grundlæggende differentialligning	Eksakt	Eksakt	Approksimation
Repræsentation af randbetingelser	Eksakt	Approksimation	Approksimation
Egnethed i forhold til kompleks hydrogeologi	Lav	Middel	Høj

**Tabel 1: Klassifikation af AEM i forhold til analytiske og numeriske modeller, /4/.**

## 2.2.4 Sammenligning af AEM og finite difference modeller

Der er foretaget simple sammenligninger mellem boringsnære oplande for forskellige modeller. /40/ sammenligner brugen af AEM modeller (SLAEM /30/) og *finite difference* (MODFLOW) for Amsterdam vandforsyning. Konklusionen på undersøgelsen viste, at de forskellige modelteknikker har deres fordele og ulemper. Til nogle undersøgelser kunne AEM metoden vise detaljer omkring strømmingen på et detaljeringsplan, hvor en *finite difference* model ville kræve en diskretisering på 5-10 m, og i AEM modellerne kunne de enkelte elementer udskiftes med mere detaljerede uden at forholde sig til et beregningsnet. MODFLOWs stærke sider var sammenlignet hermed modellering af transient strømning, dræn og stream-routing, densitetsstrømning, samt i situationer, hvor den hydrostratigrafiske kompleksitet er meget stor. Desuden blev MODFLOW også anbefalet på grund af tilknyttede inversionsrutiner, GIS kobling til brugerflade og kobling til transport kode (eks. MST3D). Inversionsrutiner og kobling til GIS findes i de seneste versioner af AEM softwaren, eks. VisualAEM /36/. Der findes bl.a. inversionsrutiner til AEM modeller i koden fra

Ostrich (<http://www.groundwater.buffalo.edu/software/Ostrich/OstrichMain.html>) /37/ er integreret i Visual AEM. Ostrich er en universel inversionsrutine i stil med PEST. Man foretager sine modelberegninger og evaluerer resultaterne mod observationer ved beregning af en vægtfunktion. Herefter opdateres de hydrostratigrafiske parametrene som eks. grundvandsdannelse og transmissivitet.

Gennem en sammenligning af oplande foretaget med GFLOW, WHAEM2000 og MODFLOW, har man fundet en rimelig lighed i oplandene mellem disse modeller /32/. Oplandene afviger fra de gængse mere simple analytiske tilgange (AFR – Arbitrary fixed Radius – og CFR – Calculated fixed radius). Disse metoder har store ligheder med dem man benytter i forbindelse med BNBO undersøgelser og 300 meter zoner i Danmark.

Lignende arbejde er udført i /22/. Her beregnes 10 års boringsnære beskyttelseszoner med forskellige analytiske metoder og disse sammenlignes med en MODFLOW / MODPATH strømningsmodel. Modellerne har stigende kompleksitet (eks. vertikal anisotropi og hydrostratigrafiske heterogeniteter) og undersøgelsen viser bl.a., at de analytiske metoder for simple systemer har sammenfaldende oplande med oplande beregnet med strømningsmodeller. Dog bliver nøjagtigheden af de analytiske beregnede oplande mindre med stigende heterogen kompleksitet (jf. tabel 1 da AEM ikke er egnet til heterogene og komplekse hydrogeologiske forhold).

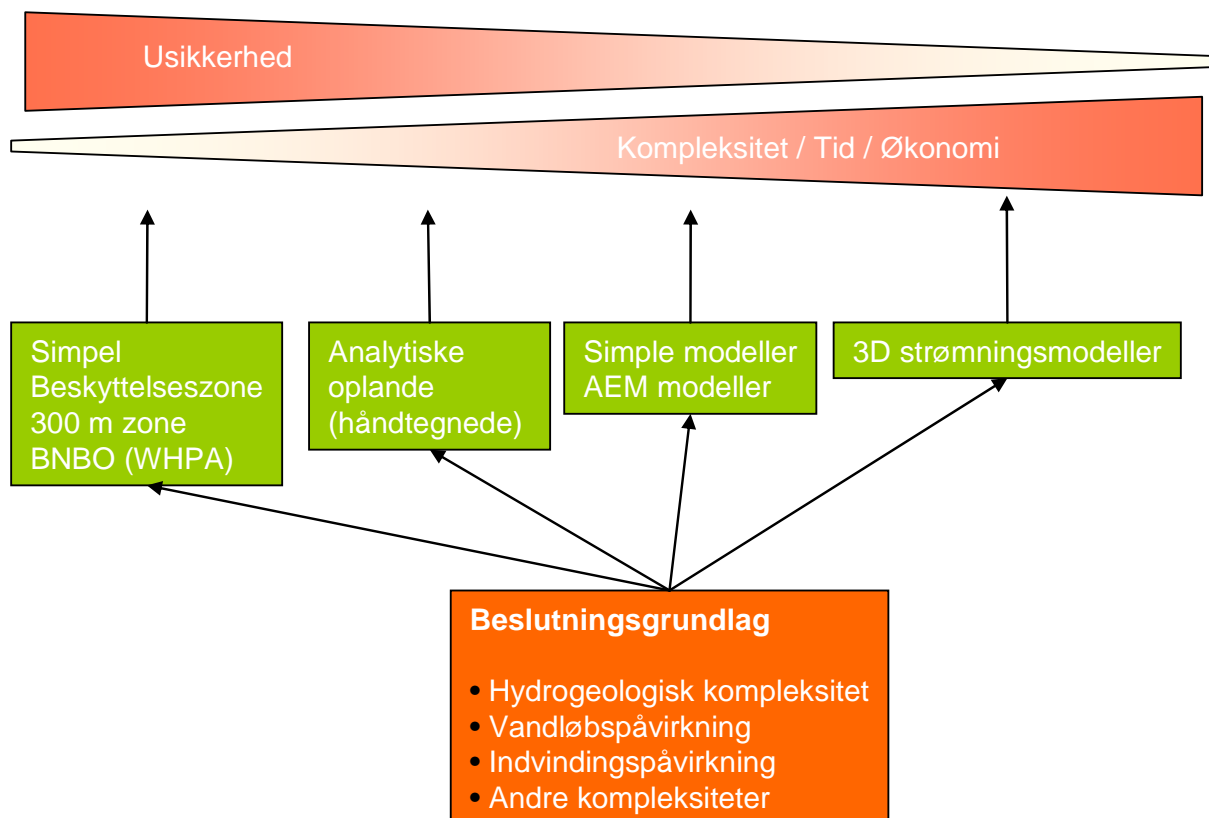
## 2.3 Valg af værktøj

Når man skal beregne indvindingsoplande, såvel som andre hydrogeologiske vurderinger, er det vigtigt, at man i den indledende fase foretager et valg om, hvilke værktøjer man vil benytte. Valget skal reflektere den tilgængelige datakvalitet, tid og økonomi og krav til resultatets præcision. Hvis formålet er screening og ikke detailmodellering, så kan AEM give en indledende vurdering.

For områder, hvor man ikke kender de hydrogeologiske forhold, kan man med rette foretage oplandsberegninger med meget simple metoder. Jo flere data man har til rådighed jo mere komplekse modeller kan man udarbejde og jo mere pålideligt vil oplandene fremstå.

Figur 2-5 viser hvorledes valget af redskab til en oplandsberegning afhænger af mange forskellige faktorer. De mest simple beskyttelseszoner finder man i de boringsnære beskyttelsesområder. Her foretages en simpel beregning i et regneark og beregningen medtager ikke essentielle faktorer som vandløbspåvirkning, heterogen strømning eller boringsinterferens. Jo flere data man har til rådighed, jo mere komplekse modeller kan benyttes. Samtidig vil den tid, der skal benyttes til oplandsberegningen, også stige tilsvarende.





**Figur 2-5: Det korrekte valg af værktøj er afhængigt af mange faktorer såsom datagrundlag, datakompleksitet, tid og økonomi.**

Erfaringsmæssigt er de faktorer, som giver størst usikkerhed på et opland, den manglende viden om de hydrogeologiske forhold eller viden om, at der forekommer nogle komplicerede hydrogeologiske forhold, som ikke umiddelbart kan opløses, i den skala man ønsker.

### 2.3.1 Nogle tommelfingerregler for brugen af AEM modeller.

Følgende afsnit gennemgår nogle af de tommelfingerregler, som kan benyttes i forbindelse med AEM modeller.

De analytiske modeller forudsætter Dupuit-Forchheimer's antagelse om horisontal strømning i grundvandsmagasinet. Indvindingsoplandet skal deraf være 10 gange bredere end magasintykkelsen.

Man skal være opmærksom på at AEM metoden er primært gyldig for stationære forhold. Der er enkelte metoder, hvor man kan se på simple transiente forhold, eksempelvis en indvindingsboring. 3D modeller og fuldt transiente modeller, hvor randbetingelserne ændrer sig, er endnu ikke udviklede /3/.

Elementerne i AEM metoden er stykvis konstante. Der er ikke udarbejdet elementer med varierende hydraulisk ledningsevne, porøsitet eller bund.

Opholdstiden i en grundvandsbeskyttelseszone er ikke specielt påvirket af vandløb, hvis afstanden mellem vandløb og indvindingsboringen er større end  $4\sqrt{Qt/\pi bn}$ , hvor Q er indvindingen, b er magasintykkelse, n er porøsiteten, t er opholdstiden i indvindingsoplandet /28/.

Den tredimensionelle strømning er nødvendig, hvis en af følgende egenskaber forekommer /28/:

- Afstanden mellem indvindingsboring og en hydrologisk rand (eksempelvis et vandløb, større inhomogenitet eller no-flow) er mindre end  $2\sqrt{k_h/k_v}b$ , hvor  $k_h$  og  $k_v$  er henholdsvis den horisontale og vertikale hydrauliske ledningsevne og b er magasintykkelsen.
- Bredden af indvindingsoplandet i en todimensional model er mindre end  $2\sqrt{k_h/k_v}b$ , hvor  $k_h$  og  $k_v$  er henholdsvis den horisontale og vertikale hydrauliske ledningsevne og b er magasintykkelsen.

En hydrostratigrafi er karakteriseret ved, at der er flere magasiner adskilt af mindre permeable lag. Dette er typisk i mange danske områder, og her kan det være muligt at benytte en quasi-tredimensionel tilgang. Dette bør gøres når /28/:

- En indvindingsboring ikke er filtersat i samtlige magasiner

Længden af et indvindingsopland er mindre end  $4\sqrt{T/m}$ , hvor T [ $m^2/s$ ] er transmissiviteten for hele aquiferen, og m er lækagekoefficienten [ $s^{-1}$ ], fundet som,  $m = k_z/b'$ , hvor  $k_z$  er den vertikale hydrauliske ledningsevne og  $b'$  er mægtigheden af lækagelaget.

- En Hydrologisk randbetingelse (vandløb, sø eller kyst) er inden for en afstand af  $4\sqrt{T/m}$  fra en indvindingsboring, hvor T er magasinets transmissivitet, og m er den mindste lækage.

## 2.3.2 AEM Ressourcer

### 2.3.2.1 Oversigt over AEM modeller og metoder

Der findes på nettet en udviklet kreds af AEM udviklere og brugere.

Wikipedia giver en hurtig introduktion til AEM modeller.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Analytic\\_element\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Analytic_element_method)

Det bedste sted at starte er nok **ANALYTIC ELEMENT MODELING COMMUNITY HOMEPAGE** (<http://www.analyticelements.org/index.html>). Herfra er der direkte links til Nyheder omkring konferencer, møder og udgivelser af software og publikationer.

### 2.3.2.2 AEM software

Der findes en del tilgængeligt software på markedet, og der er i de sidste år udgivet meget nyt.

Der skelnes mellem brugerflader og motorer. Brugerfladen er hvor modellen opstilles, mens motoren er den numeriske løser. Man kan godt have flere forskellige brugerflader, som benytter samme motor, og enkelte brugerflader har også valgbare motorer.



En del software er uden grafisk brugerflade og er derfor ikke helt nemt at benytte. Der er dog meget tilgængeligt software. En del er gratis og med brugerflade og er meget velegnet til typiske hydrologiske problemstillinger. De vigtigste er nævnt her:

#### **2.3.2.2.1 VisualAEM**

Udgivet: 2008 (Version 1.0)

Licens: Freeware, kræver dog Surfer™.

Web

download:

<http://www.groundwater.buffalo.edu/software/VBB/VBBMain.htm><http://www.civil.uwaterloo.ca/jrcraig/VisualAEM/Main.html>

VisualAEM er en grafisk brugerflade, hvor ens problem opstilles i et GIS miljø. Programmet arbejder tæt sammen med Surfer™. Programmet benytter forskellige beregningsmoduler – afhængigt af problemstillingen, og kan håndtere flerlagsmodeller. Programmet er en udbygning af Bluebird.

#### **2.3.2.2.2 ArcAEM**

Udgivet: 2006 (Version 2.2beta)

Licens: Open Source

Web download: <http://www.groundwater.buffalo.edu/software/ArcAEM/ArcAEMMain.html>

#### **2.3.2.2.3 WhAEM2000**

Udgivet: 2005 (Version 3.2)

Licens: Open Source

Web download: <http://www.epa.gov/athens/software/whaem/index.html>

#### **2.3.2.2.4 GFLOW**

Udgivet: 2005 (Version 2.1)

Licens: Betalingssoftware (~USD 475)

Web Download: [www.haitjema.com](http://www.haitjema.com)

#### **2.3.2.2.5 GMS / MODAEM**

Udgivet: 2007 (Version 6.5)

Licens: Betalingssoftware (~USD 1500)

Web download: [http://www.scisoftware.com/products/gms\\_details/gms\\_details.html](http://www.scisoftware.com/products/gms_details/gms_details.html)

#### **2.3.2.3 Motorer**

En motor er et beregningsværktøj som løser ligningssystemet. Typiske motorer er TimML, Cardinal og Split. Forskellen i motorerne findes ikke kun i løsningsmetoden men specielt i hvilke type elementer der inkluderes i løsningen. Eksempelvis kan TimML håndtere flerlagsløsninger, men er begrænset i brugen af TimML kan eksempelvis håndtere flerlagsmodeller, mens Cardinal er god til at håndtere vandløbslækage. Split har pt. ikke indbygget vandløbslækage. Det anbefales at man ser i manualen, hvad de enkelte motorer kan håndtere.

## **2.4 Eksempel på opstilling af en simpel AEM model.**

I følgende afsnit gennemgås et eksempel på opstilling af en AEM model.

Når man opstiller en AEM grundvandsmodel, skal man tænke på samme måde, som når man opstiller en strømningssmodel i eksempelvis MODFLOW. Det første skridt for modelopstillingen, hvor randbetingelserne skal identificeres, er det samme for de to metoder. Så det gælder om at finde nogle gode naturlige rande - eksempelvis vandløb, kyst, grundvandsskel og så fremdeles.

Start altid med at lave en simpel model. I AEM sammenhæng gælder det om at simplificere problemområdet til det essentielle, altså medtage så få analytiske elementer som muligt. Efterfølgende kan man forøge modellens kompleksitet eller evt. gå over til en FDM eller FEM model hvis det viser sig at AEM modellen ikke er tilstrækkelig.

I AEM modeller er beregningstiden afhængig af modellens kompleksitet. Jo flere elementer og jo mere komplekse elementerne er, jo længere tid er modellen om at konvergere til en løsning. Dette bør man have med i sin vurdering, når en model opstilles. Man bør i det omfang, man kan slå zoner med nær samme egenskaber sammen, holde polygoner og linjer så simple som muligt. På denne måde vil man opnå en stabil AEM model, som hurtigt konvergerer til en løsning.

De analytiske elementer er relativt hurtige at opstille. Man kan som ved strømningsmodeller inkludere flere vandværker i samme område, og derved beregne flere indvindingsoplade på en gang. Erfaringsmæssigt tager en pålidelig og velkaliberet AEM model 2 - 5 dage at opstille og kalibrere. Dette svarer godt til /32/, hvor de estimerer, at en model tager 2 dage at opstille – fra nogle få timer op til 2 uger – afhængig af modelkompleksitet og ønsket detaljeringsgrad.

## **2.4.1 Modelopstilling**

Definer hydrostratigrafien, de ydre randbetingelser og foretag de første beregninger herpå. Herefter kan man forbedre detaljeringsgraden i modellen.

### **2.4.1.1 Hydrostratigrafi**

Den hydrostratigrafiske tilgang skal være simpel i AEM modellen, hvad enten man benytter en 1 lags AEM model eller benytter modeller, med en løsning for flere lag. Lav en vurdering af hydrostratigrafien i fokusområdet. Hvilken kote er bunden af magasinet, og hvad er mægtigheden af magasinet. Er der tale om et frit magasin, kan man benytte en mægtighed som overstiger terræn.

Er der heterogene forhold, kan man lægge zoner ind med varierende transmissivitet, men det anbefales, at man initialt starter med en simpel model.

### **2.4.1.2 Randbetingelser**

Rande i AEM modellen opfører sig lidt anderledes end rande i en strømningsmodel. I en strømningsmodel er et vandløb en relativt kompliceret randbetingelse. I AEM modelsammenhæng er dette et relativt simpelt element. Modsat er en no-flow rand i en strømningsmodel en simpel rand at implementere, mens en no-flow rand i AEM sammenhæng godt kan benyttes, men giver en markant diskontinuitet til AEM modellens uendeligt udbredte magasin. På den måde vil ens valg af rande bidrage til løsningens stabilitet. I AEM modeller kan det være en fordel at lade modellen selv finde et vandskel, frem for at lægge en no-flow rand ind i modellen.

### **2.4.1.3 Vandløb**

Når vandløb lægges ind i modellen, kan man benytte en digital højdemodel til at finde koten til vandløbene. Der findes software, eksempelvis /36/, hvor koten til vandløbene hentes direkte fra den digitale højdemodel. Først digitaliseres vandløbene. Under digitaliseringen skal man være

opmærksom på, at hvert delsegment i et vandløb bidrager med en ekstra ligning i den analytiske løsning. Så jo flere knæk, man har i vandløbet, jo tungere løsning vil man få. Derfor bør man indlægge vandløbene med så få knæk så muligt - dog sådan, at tilnærmelsen ikke er for grov til det man skal bruge vandløbene til, og med den antagelse, at vandløbenes delsegmenter har en konstant gradient. I randområdet til modellen kan vandløbene være grovere end ved fokusområderne. Er der behov for større detaljeringsgrad ved fokusområdet, kan disse indlægges efterfølgende. På samme måde kan man ændre vandløbskonduktansen fra fuld kontakt til reduceret kontakt, men det anbefales, at dette først gøres, når man har hovedelementerne i modellen på plads.

#### **2.4.1.4 Grundvandsdannelse**

Der er ikke dræn i AEM modeller, som man har det i strømningsmodeller. Dette betyder, at AEM modeller benytter grundvandsdannelse som input, dvs. nettonedbør fratrukket det vandvolumen som strømmer til vandløb via dræn. Dette betyder, at eksisterende nettonedbørsdata kun kan benyttes vejledende som en øvre grænse. Grundvandsdannelse som input betyder, at afstrømningen i vandløb kan sammenholdes med den naturlige grundvandsafstrømning, dvs. medianminimum. Start med at lave en stor zone for grundvandsdannelse. Har man kendskab til områder med reduceret grundvandsdannelse, kan disse indlægges som zoner efterfølgende.

#### **2.4.1.5 Vandindvinding**

Vandindvinding indlægges i modellen som indvindingsboringer på samme måde som ved en traditionel strømningsmodel. I flerlagsmodellerne kan man specificere, i hvilket modellag indvindingen foregår.

### **2.4.2 Modelkalibrering**

Modellen kalibreres ligesom en strømningsmodel. Man kan i /36/ indlægge pejleobservationer, og modellen kan herefter kalibreres inverst. Normalt kalibreres der på grundvandsdannelsen og den hydrogeologiske zoner. Pejleobservationerne håndteres på samme måde som i strømningsmodeller. Dog skal man være opmærksom på, at en pejleobservation, i et punkt hvorfra der også indvindes, er u hensigtsmæssigt for den analytiske løsning og bør undgås.

Afstrømningsdata kan også benyttes i kalibreringen for at opnå en bedre vandbalance. Da AEM modellen benytter grundvandsdannelse til grundvandsmagasinet er vandbalancen knyttet til den størrelse, og minimumsvandføringer (medianminimum) er derved velegnet. Vandføringen beregnes for delsegmenter for de enkelte vandløb. Ønsker man at beregne vandføringen for et helt vandløbsopland kan man summere tilførslen fra de enkelte delsegmenter. I den softwarekode som VisualAEM anvender, sker dette automatisk i en output fil.

### **3 Komparativ analyse af oplande beregnet med MODFLOW, AEM og den analytiske håndtegningsmetode**

Den komparative analyse af oplande går ud på at beregne oplande med forskellige metoder og herefter sammenligne disse oplande. Der tages udgangspunkt i eksisterende strømningsmodeller udarbejdet i områder med typiske danske hydrostratigrafier.

De eksisterende strømningsmodeller forsimples ved bl.a. at lægge hydrauliske zoner sammen, så de f.eks. har én K-værdi (hydraulisk ledningsevne m/s) for hele beregningslaget eller maksimalt 2-3 zoner pr. beregningslag. Herved forsimples den oprindelige heterogenitet i modellerne, og det er således de samme forsimplede hydrostratigrafiske modeller, som indgår i AEM og den numeriske model. Det sikres herved, at en eventuel forskel i oplande referer til metoden (AEM vs. MODFLOW), og ikke til hvordan den hydrostratigrafiske model er implementeret.

Der indsættes herefter et antal pejlinger i hver model. Pejlepunkterne er pænt fordelt over modellen. Der tilstræbes, at der er ca. 40-50 pejlinger for hver model. Pejlingerne skal repræsentere alle aquiferlag og have en realistisk fordeling.

Pejlepunkterne udgør herefter datagrundlag til kalibrering af AEM modellerne samt udarbejdelse af potentialekort til den analytiske håndtegningsmetode.

Strømningsmodellerne tilstræbes en størrelse på ca. 10x10 km med en diskretisering på 100 m og 4-6 modellag.

Da modellerne er forsimplet i forhold til kendt hydrostratigrafi, skal strømningsmodellerne i den komparative analyse ikke kalibreres efter eksisterende pejleobservationer. De fysiske parametre i strømningsmodellerne skal dog have realistiske størrelser.

De hydrauliske ledningsevner, som er anvendte, stammer fra de oprindelige MODFLOW-modeller. For at forsimpler modellerne er flere zoner lagt sammen, så der optræder ens K-værdi i hele beregningslag flere steder i modellerne.

Vandløb beskrives med 1. og 2. ordens vandløbssegmenter, så det kun er de større og betydende vandløb som er medtaget i modellerne.

Indvindingen beskrives særskilt for hver model svarende til de scenarier som er udført. Der er således ikke andre indvindinger i modellerne ud over dem, som er introduceret gennem scenarierne.

Nettonedbøren er tildelt det øverste aktive lag i modellen, som er homogen fordelt, og der er benyttet en middelværdi i forhold til de originale modeller.

## 3.1 Metode

Når strømningsmodellen er færdig udtrækkes et nyt sæt pejlepunkter fra de samme koordinater svarende til de originale pejlepunkter. Dette datasæt udgør et fiktivt datasæt, som benyttes til kalibrering af AEM modellerne samt til udarbejdelse af potentialekort, som senere benyttes til optegning af de analytiske håndtegnede oplande. De numeriske strømningsmodeller opstillet i MODFLOW udgør herved en "fiktiv sandhed", og danner datagrundlaget for det videre arbejde.

### 3.1.1 Scenarietyper

Der benyttes forskellige scenarietyper i de 4 modeller for at vurdere oplandsforskelle som funktion af filterdybde, størrelse på indvindingen og heterogene forhold i de hydrostratigrafiske modeller.

De forskellige scenarietyper er:

- Indvindingsopland som funktion af indvindingsdybden. Her foretages indvinding i forskellig dybde, såfremt den hydrostratigrafiske model tillader dette. Indvindingen sættes til hhv. 200.000 m<sup>3</sup>/år og 400.000 m<sup>3</sup>/år for hver boring.
- Indvindingen placeres forskellige steder for at se effekten af oplandsberegningen på baggrund af hydrostratigrafiske inhomogeniteter. Indvindingen sættes til 200.000 m<sup>3</sup>/år og 400.000 m<sup>3</sup>/år for hver boring.
- Der placeres tre boringer nær hinanden for at vurdere effekten af kildefelter. Indvindingen sættes til 100.000 m<sup>3</sup>/år for hver boring.
- Der placeres en skyggeboring i oplandet til et kildepladsscenario. Indvindingen sættes til 100.000 m<sup>3</sup>/år for kildepladsboringerne og 50.000 for skyggeboringen i kildefeltets opland. En skyggeboring er en indvindingsboring som ligger i indvindingsoplandet til kildepladsen.

### 3.1.2 Arbejdsgang

Følgende arbejdsgang benyttes:

#### 3.1.2.1 Modeller i MODFLOW

- Der benyttes som udgangspunkt fire detaljerede grundvandsmodeller. Modellerne har en høj detaljeringsgrad og vil være opstillet for 4 forskellige hydrostratigrafiske miljøer. Hver model opstilles i MODFLOW i en Groundwater-Vistas brugerflade. Modellerne gennemgås og forsimples, således at de vigtigste hydrostratigrafiske strukturer bevares.
- Observationsboringer indlægges. Disse kan have en eksisterende placering eller fiktive. Trykniveauet i observationsboringerne hentes fra MODFLOW modellen og benyttes til kalibrering af AEM modellerne samt danner udgangspunkt for potentialekortet for de håndtegnede oplande.
- De forskellige scenarier i MODFLOW opstilles og afvikles. Herefter foretages der partikelbaneberegninger i MODPATH.
- Partikelbanerne (indvindingsoplandene) fra MODPATH digitaliseres i GIS.

### 3.1.2.2 Modeller i AEM

AEM modellerne opstilles med det udgangspunkt, som man vil have i et normalt sagsbehandlingsforløb, dvs. med kendskab til oplandsafgrænsning og randbetingelser. Informationer omkring grundvandspotentiale fås fra et begrænset antal pejleobservationer (hentet fra MODFLOW modellen). Information omkring de hydrostratigrafiske forhold fås fra en subjektiv vurdering af magasinkoter og -mægtigheder ud fra MODFLOW-modellen

- De generelle randbetingelser fra MODFLOW modellen benyttes som udgangspunkt i AEM modellerne. Dette gælder vandløbsrande og no-flow rande.
- Vandløb indlægges i modellen ved at benytte Vandløbstema fra Areal Info Systemet /42/. Der benyttes samme vandløbssegmenter som i MODFLOW modellen. Vandløbene digitaliseres efter som beskrevet på side 16, således at der er et passende antal knudepunkter. Koter til hvert vandløbsknudepunkt hentes fra en digital højdemodel eller tilsvarende koter i MODFLOW-modellen.
- Hvis der i MODFLOW modellen eksisterer markante heterogene zoner eller markante hydrostratigrafiske strukturer (eksempelvis en begravet dal eller sandvinduer i leret dæklag) kan man her indlægge en speciel T zone og/eller område med anden grundvandsdannelse.
- Pejlepunkterne fra MODFLOW modellen indlægges og AEM modellens parametre (fortrinsvis transmissivitet og grundvandsdannelse) kalibreres efter disse pejlepunkter. De kalibrerede parametre skal have realistiske størrelser.

### 3.1.2.3 Håndtegningsmetoden

Ud fra de beregnede pejlepunkter i den numeriske model udarbejdes der potentialekort for det primære magasin. Der optegnes indvindingsoplande for grundscenarierne svarende til den største indvinding i det primære magasin. De håndtegnede oplande er udarbejdet efter anbefalingerne i Geo-Vejledning 2 /13/ og vil blive sammenstillet med de øvrige oplande fra AEM og den numeriske metode.

## 3.1.3 Modelopstillinger

Der er opstillet fire syntetiske strømningsmodeller, hvor hver model repræsenterer forskellige typer geologier.

Modellerne er opstillet i MODFLOW 2000 i en Groundwater Vistas brugerflade.

Alle modeller har en oprindelse i eksisterende modeller. Modellerne er kontrolleret og ensrettet således, at geologi, hydrauliske egenskaber, nettonedbør og vandløb er forsimplet.

Tabel 2 viser den overordnede hydrostratigrafi for de fire modeller. Modellerne henføres herefter til Model A, B, C og D samt den hydrostratigrafiske beskrivelse, da modellerne efter modifikation ikke længere kan henføres til deres originale område. De enkelte modeller er nærmere beskrevet i kapitlerne herunder, se Kapitel 3.2 - 3.4.

Tabel 2: Oversigt over hydrostratigrafiske typemodeller

Model	Beskrivelse	
A	Hedeslette	
B	Begravet dal	
C	Randmoræne/ rodet geologi	
D	Kalkmagasin	
	Legend	

### 3.2 Model A - Hedesletten

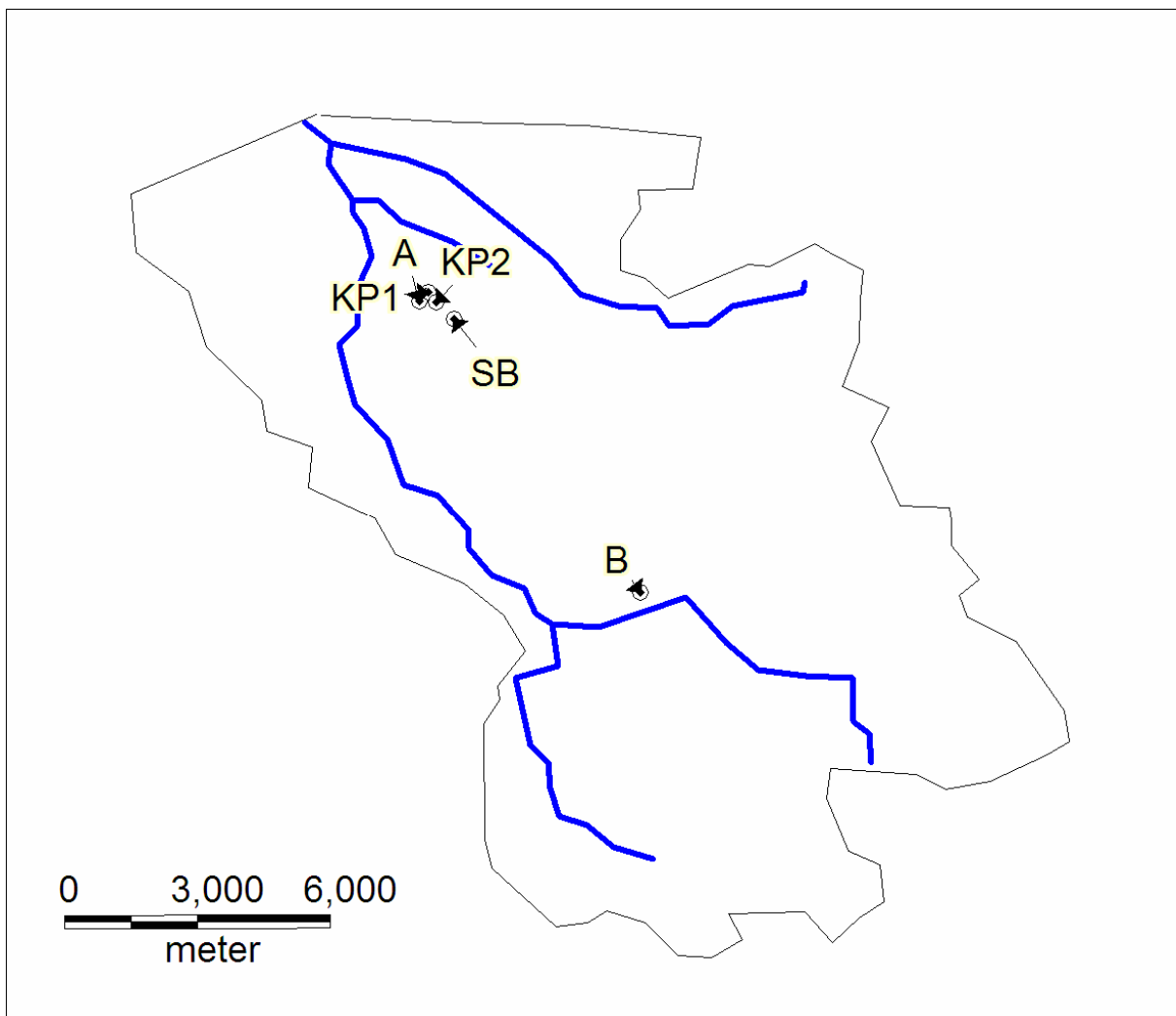
Modellen for hedesletten består af et stort sandmagasin, hvor dræningen sker via vandløb. Sandmagasinet er relativt homogent.

Denne model har en oprindelse i en MIKE SHE model over Karup å. Modellen er ændret således, at modelområdet kun dækker den øvre del af Karup oplandet.

Modflowmodellen er udarbejdet i fire beregningslag med ens lagtykkelse på 10 meter.

#### Data

Der er i modellen indlagt hovedvandløb. Som ydre rand benyttes en no-flow rand som hovedsageligt følger det topografiske opland.



Figur 3-1: Oversigt over modellen med vandløb og boringer.



### 3.2.1.1 Indvindingsboringer

Der er indlagt to indvindingsboringer i modellen, borerne A og B. Boring A er placeret i modellens nordlige område med et indvindingsopland, der når ud i sandmagasinets centrale del uden påvirkning af rande og vandløb. Boring B er placeret nær et vandløb, og formålet med denne placering er at vurdere, hvorledes modellerne håndterer en påvirkning fra vandløbet. Ved Boring A er der desuden udført scenarier med en kildepladsundersøgelse med flere borer (KP1 og KP2) samt en skyggeboring (SB). Tabel 3 viser placeringen af borerne og Tabel 4 viser de udførte scenarier. Der udarbejdes i alt 18 oplande.

**Tabel 3: Placering af indvindingsboringer**

Name	Modellag
A	1,2,3,4
B	1,2,3,4
KP1	3,4
KP2	3,4
SB	2

**Tabel 4: Indvinding ved de forskellige scenarier**

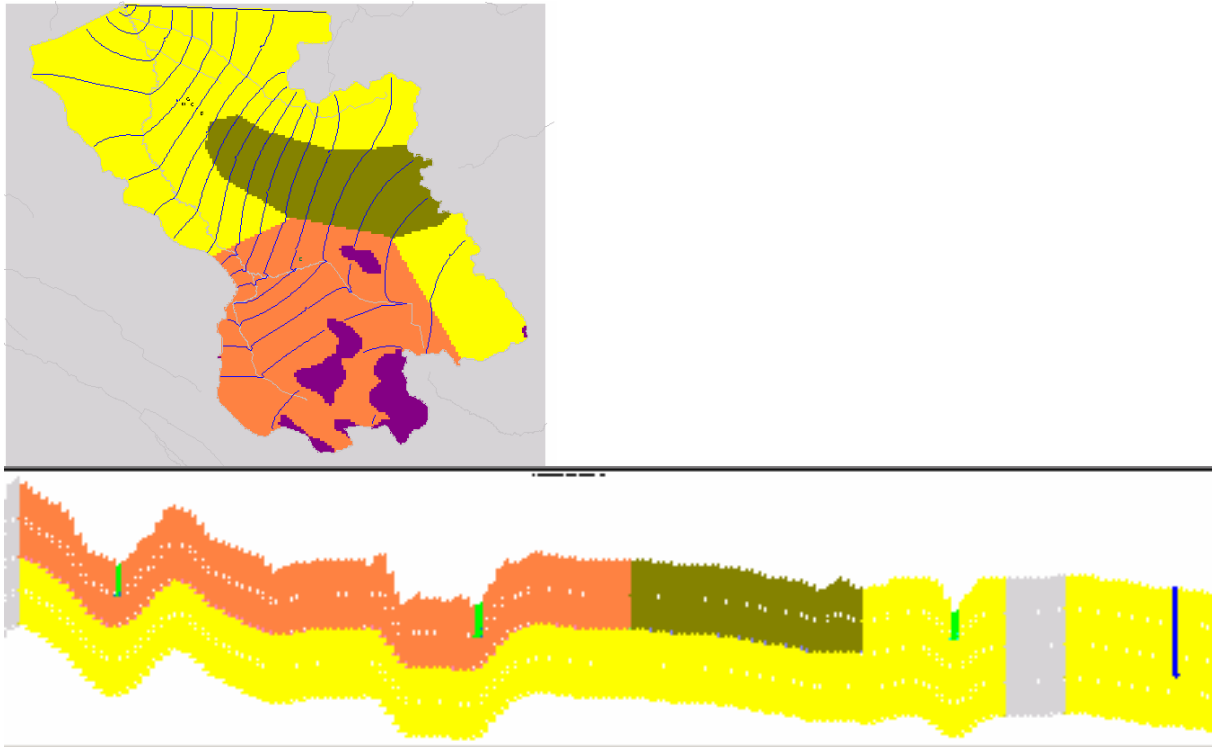
Scenarium	
1	Indvinding A & B, lag 4, 200.000 m <sup>3</sup> /år
2	Indvinding A & B, lag 3, 200.000 m <sup>3</sup> /år
3	Indvinding A & B, lag 2, 200.000 m <sup>3</sup> /år
4	Indvinding A & B, lag 1, 200.000 m <sup>3</sup> /år
5	Indvinding A & B, lag 4, 400.000 m <sup>3</sup> /år
6	Indvinding A & B, lag 3, 400.000 m <sup>3</sup> /år
7	Indvinding A & B, lag 2, 400.000 m <sup>3</sup> /år
8	Indvinding A & B, lag 1, 400.000 m <sup>3</sup> /år
9	Indvinding B, KF1 og KF2, 100.000 m <sup>3</sup> /år fra lag 2
10	Indvinding B, KF1 og KF2, 100.000 m <sup>3</sup> /år og opstrøms indvinding på 50.000 m <sup>3</sup> /år fra SB. Indvinding fra lag 2

Da AEM modellen forudsætter en to dimensional hydrostratigrafi, kan man ikke placere indvindingen i enkelte modellag som i strømningsmodellen. Scenarierne 1-4 og 5-8 er derved slået sammen i AEM modellen, og der opnås en mulighed for en vurdering af den forøgede detaljeringsgrad man har i strømningsmodellen.

### 3.2.2 Modflow model

Modellen er udarbejdet i fire beregningslag. De to nederste lag består af homogent sand, mens de to øverste modellag har to zoner med reduceret hydraulisk ledningsevne. **Figur 3-2** viser et kort over modellen. Magasinet har en samlet mægtighed på 40 meter, fordelt på fire beregningslag af 10 meter. De to øverste modellag har områder med lidt lavere hydraulisk ledningsevne (oliven og orange på Figur 3-2). Øverste modellag er beregnet med frit vandspejl og de 3 underliggende lag er beregnet som spændte lag. I den sydlige del af modellen forekommer der enkelte tørre modelceller, som dog ikke udgør noget problem i forhold til de udførte partikelbanesimuleringer. Sandmagasinet har en hydraulisk ledningsevne på  $1.3 \times 10^{-3}$  m/s. De to zoner har en hy-

draulisk ledningsevne på hhv.  $2 \times 10^{-4}$  m/s (oliven zone i øst) og  $1 \times 10^{-5}$  m/s (orange zone i syd). Nettonedbøren, 410 mm/år, er konstant over området og svarer til grundvandsdannelsen, idet der i modellen ikke er implementeret dræn.



**Figur 3-2: Zoner i øvre sand samt N-S gående tværsnitsprofil**

Placeringen af observationsboringer hentes fra den eksisterende Jupiter database, således at der opnås en naturlig variation af placeringen af observationsboringer. Selve værdien af pejlingerne, leveret til AEM modellen (og de analytiske oplandsberegninger) fra MODFLOW modellen, har intet med de virkelige pejlinger at gøre.

### 3.2.3 Håndtegnede oplande

Der er udarbejdet analytiske håndtegnede oplande for boringer A og B svarende til scenarium 5 og 6 med en indvinding på  $400.000 \text{ m}^3/\text{år}$ , hvor der indvindes fra det primære magasin i lag 5 og 6.

Formlerne for magasin med gradient og spændt magasin er anvendt i optegningerne af de analytiske oplande /13/. Gradienten (I) ved kildeplads er beregnet til 0,0027 og T ved kildeplads er beregnet til  $1.5 \text{ E-}02 \text{ m}^2/\text{s}$ . Her fås stagnationspunkt til 50 m og oplandsbredden beregnes til 159 meter og den asymptotiske oplandsbredde beregnes til 318 meter.

$$\text{Stagnationspunkt} = \frac{Q_{\text{maksdøgn}}}{2 \times \pi \times I_{\text{klp.}} \times T_{\text{klp.}}} \quad \text{Formel 3.1}$$

$$\text{Oplandsbredde ved boring} = \frac{Q_{\text{maksdøgn}}}{2 \times I_{\text{klp.}} \times T_{\text{klp.}}} \quad \text{Formel 3.2}$$

$$\text{Asymptotisk oplandsbredde} = \frac{Q_{\text{tilladelse}}}{I_{\text{opland}} \times T_{\text{opland}}} \quad \text{Formel 3.3}$$

Der er udarbejdet et arealtjek på opland A og B efter formel 3.4 i Geo-Vejledningen /1/hvor:

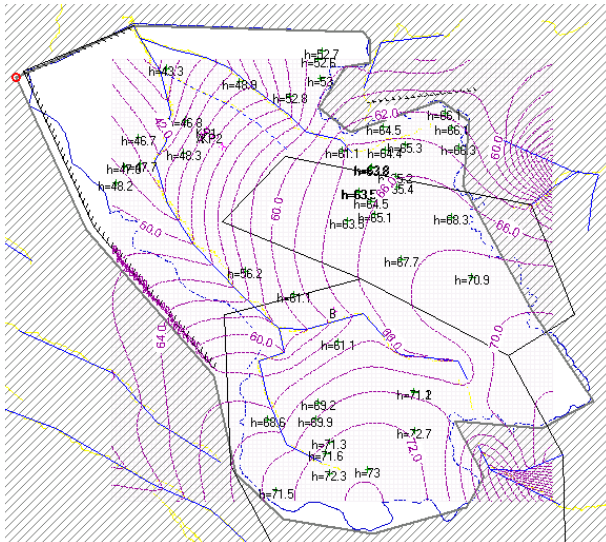
$$A \geq \frac{Q_{\text{Tilladelse}}}{N \times 1000} \quad (\text{km}^2) \quad \text{Formel 3.4}$$

Herved fås et håndtegnet opland svarende til 0,976 km<sup>2</sup> (jf. figur 3-8).

### 3.2.4 AEM model

AEM modellen er opbygget omkring de samme randbetingelser som MODFLOW modellen med vandløb og no-flow rande. Figur 3-3 viser opsætningen af modellen i Visual AEM.

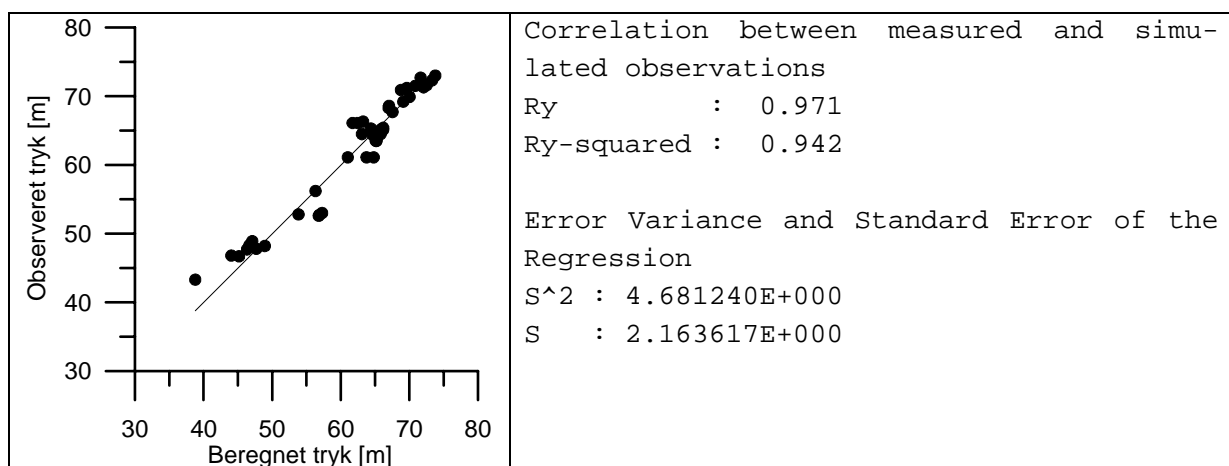
Da randbetingelser i AEM modeller kan opføre sig lidt anderledes end konventionelle strømningsmodeller, er nogle af no-flow randene i modellen blevet fjernet og ændret ved at medtage vandløb uden for det oprindelige modelområde. Herved vil der mellem vandløbene optræde en naturlig no-flow rand ved grundvandsskellet mellem vandløbene. En sådan rand kan i AEM ofte være mere hensigtsmæssig, idet en no-flow rand har en tendens til at introducere en markant diskontinuitet i det beregnede potentiale. Ved normal håndtering af AEM modeller bør sådanne overvejelser som randbetingelsernes naturligt anbefales.



**Figur 3-3: Oversigt over kalibreret AEM model over hedesletten.**

Vandløbene i AEM modellen antages at have fuld kontakt til magasinet, mens vandløbene i MODFLOW modellen har en begrænset kontakt. Heri ligger antagelig den største forskel i de to modeller, idet vandløb med fuld hydraulisk kontakt i AEM modellen svarer til en fastholdt trykkrand i MODFLOW modellen. Grunden til, at en fuld hydraulisk kontakt i AEM modellen blev benyttet til vandløbsbeskrivelsen skyldes, at AEM modellen havde konvergensproblemer ved begrænset hydraulisk kontakt.

Kalibrering af AEM modellen er udført inverst vha. programmet Ostricht /37/. Programmet er indbygget i VisualAEM og kan kalibrere hydrauliske parametre på pejleobservationer, og med tiden også vandløbsafstrømning. Figur 3-4 viser kalibreringsresultatet. Der er generelt god sammenhæng mellem de fiktive pejleobservationer og de af modellen kalibrerede. Tabel 5 viser de analytiske elementer og de kalibrerede værdier i AEM modellen.



**Figur 3-4: Beregnet og observeret tryk i hedeslettemodellen og kalibreringsstatistik.**

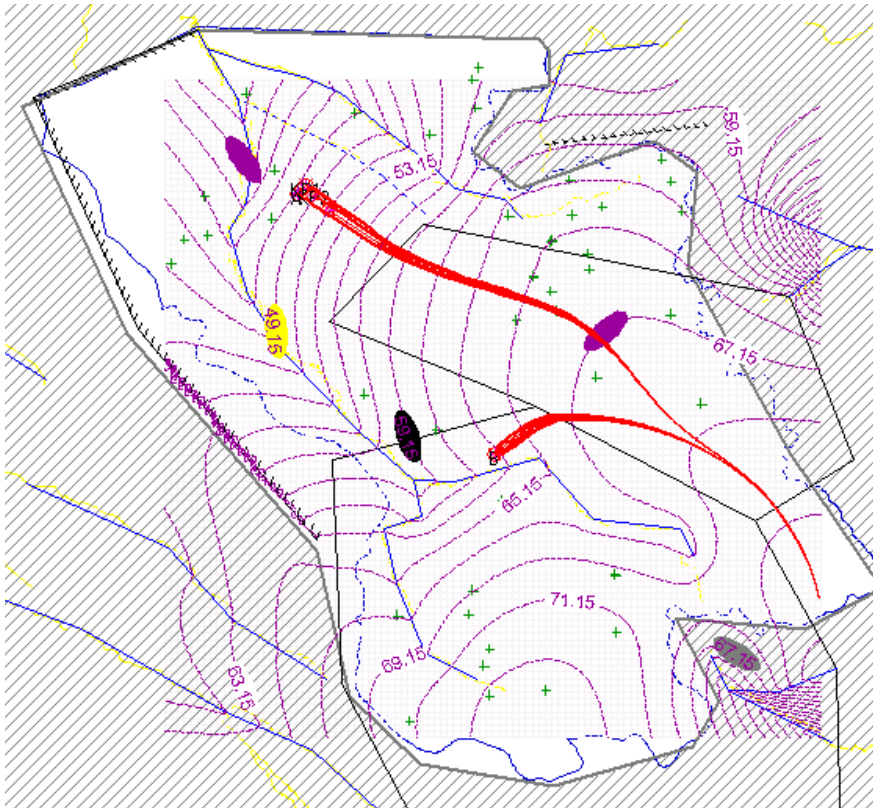
**Tabel 5: Parametre for de analytiske elementer i modellen**

Element	Karakteristika
Globalt strømningsfelt	Den hydrauliske ledningsevne er fundet til $3.42 \cdot 10^{-4}$ m/s for et magasin på 50 m med en base i kote 20 m.
K Zoner	Der er to zoner med anden hydraulisk ledningsevne. Den sydlige zone har $K = 1.86 \cdot 10^{-4}$ m/s og den østlige zone har $K = 5.04 \cdot 10^{-4}$ m/s.
Vandløb	For vandløb i modellen antages, at de har fuld hydraulisk kontakt til magasinet.
No-flow	Der er indlagt no-flow rande som rand i modellen. I den sydlige del er no-flow randen styret naturligt
Grundvandsdannelse	Grundvandsdannelsen er ved inversion beregnet til $1.05 \cdot 10^{-8}$ m/s svarende til 330 mm/år.

Oplandene er beregnet ved at placere partikler i modellen ved indvindingsboringerne. Partiklerne beregnes baglæns (mod strømningsretningen) på samme måde som i den numeriske model i MODPATH. Figur 3-5 viser et eksempel på partikelbaneberegningerne i VisualAEM.

I AEM metoden placeres et antal partikler ved indvindingen. Partiklernes bane beregnes nu baglæns og herved omsluttet indvindingsoplandet. Indvindingen antages at foregå i hele det todimensionale magasin. AEM metoden understøtter således ikke en delvis filtersætning i magasinet.

I MODFLOW/MODPATH partikelbanemodulet er der i alle scenarier placeret 1 partikel/ 1000 m<sup>3</sup> indvundet, således at der med en indvinding på 200.000 m<sup>3</sup>/år placeres 200 partikler i indvindingsfilteret. Partiklerne vej beregnes baglæns op til overfladen af grundvandsspejlet for at fastlægge hele indvindingsoplandet til indvindingen.

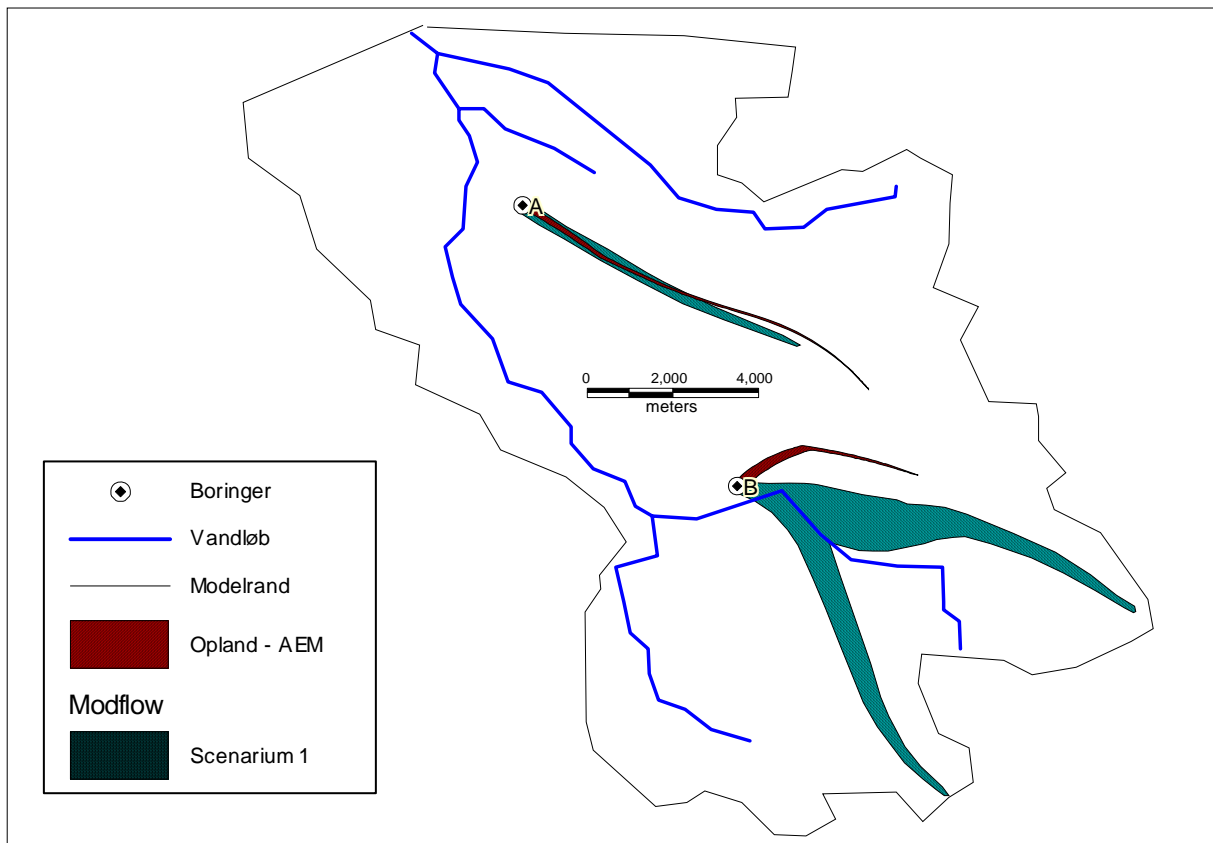


Figur 3-5: Oversigt over oplande i AEM modellen over hedesletten.

### 3.2.5 Resultater

I det følgende afsnit præsenteres nogle af resultaterne for scenarieberegningerne. Figur 3-6 viser indvindingsoplandene for scenarium 2. Oplandet for indvinding A udstrækker sig i sydøstlig retning fra indvindingsboringen og er identisk for de to beregningsmetoder. Dette gælder både form og bredde.

For indvindingsboring B er der stor forskel i både form og placering. AEM modellens opland har en østlig retning og krummer herefter mod sydøst, mens MODFLOW modellen har et opland, som befinder sig sydøstligt for indvindingsboringen og er splittet op omkring vandløbet. Opsplittningen skyldes, at der foregår en betydelig dræning af vand til vandløbet, og det vand som falder mellem de to oplands-arme går til vandløbet. Oplandet når under vandløbet, hvilket skyldes at MODFLOW modellen inkluderer strømning i tre dimensioner, og at der indvindes fra et dybere modellag (lag 3 i eksemplet svarende til scenarium 2). Der foregår her en horisontal strømning langt under vandløbet, som bevirker at nedsivningen og bidraget til indvindingsoplandet kan foregå i SØ-retning langt væk og på den anden side af vandløbet. Herved indvinder boringen vand, som ikke er i direkte kontakt med vandløbet.



**Figur 3-6: Oplande, hedeslette modellen, Scenarium 2**

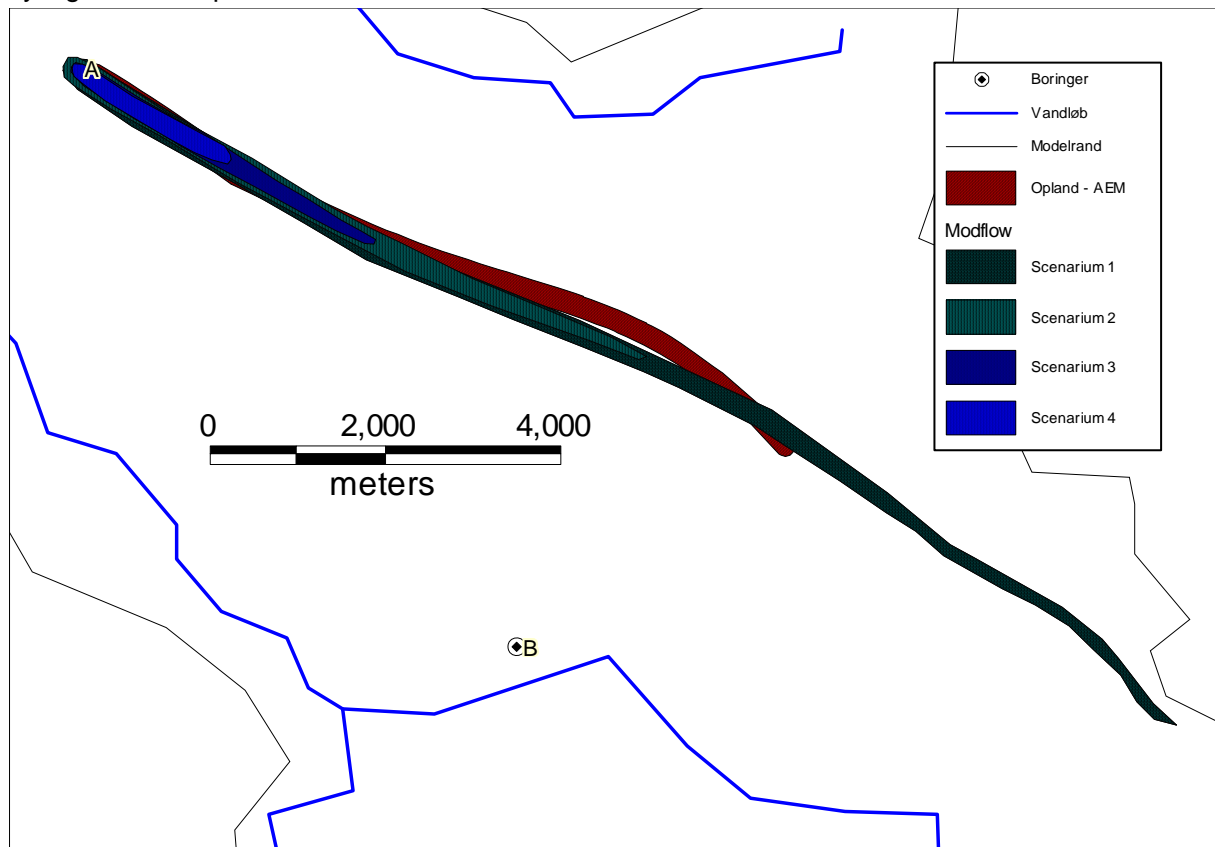
Forskellen i indvindingsoplandet for de to modeller for indvindingsboring B er betragtelig, og selv for en simpel model kan modellering af strømning i tre dimensioner være af stor betydning. Ved placering af boringen er AEM antagelserne (kapitel 2.3.1) bevidst ikke overholdt, og dette ses på oplandet.

Vandløbslækagen har stor betydning for oplandenes udbredelse, når der indvindes fra de øvre lag og tæt på vandløb.

For diskussionen omkring vandløbslækagen i modelarbejde bør man nok her fremhæve, at størrelsen på denne parameter ofte er ukendt, og er, i traditionelt modelarbejde, ofte fastsat til en bestemt værdi, eller indgår mere eller mindre ukritisk i kalibreringen. På baggrund heraf ses, at oplandet er meget påvirket af denne ukendte størrelse, og forskellen i oplandet mellem de to metoder illustrerer, at vandløbslækage er en vigtig parameter for oplande, som ligger tæt ved vandløb og er påvirket af disse.

Scenarium 1-4 undersøger effekten på indvindingsoplandet på baggrund af varierende indvindingsdybde. I MODFLOW modellen er indvindingen og partiklerne placeret i de fire respektive modellag, og oplandsberegningen er herefter udført på den enkelte indvinding. Disse oplande er sammenholdt med oplandet fra AEM modellen. Da denne model er i to dimensioner, og indvindingen er defineret som et punkt, er dybde ikke relevant – som det forudsættes med antagelsen af horisontal strømning (Dupuit-Forchheimer antagelse) samt indvinding fra hele magasinet. Figur 3-7 viser de fire forskellige oplande. Det ses at placeringen af filteret i MODFLOW modellen har stor effekt på indvindingsoplandet. Placeres indvindingen i det nederste lag vil man få et opland som når modellens no-flow rand – hvilket skyldes, at der vil være partikler, som smyger sig langs bunden af modellen. Her er ingen vertikal vandstrømning, så partiklerne vil blive ved med at ligge

dybt i modellen. Jo højere indvindingen foregår jo kortere bliver indvindingsoplandet. AEM model-  
lens opland svarer ca. til en MODFLOW model med indvindingen placeret i lag 3. Dette er sand-  
synligvis modelspecifikt.

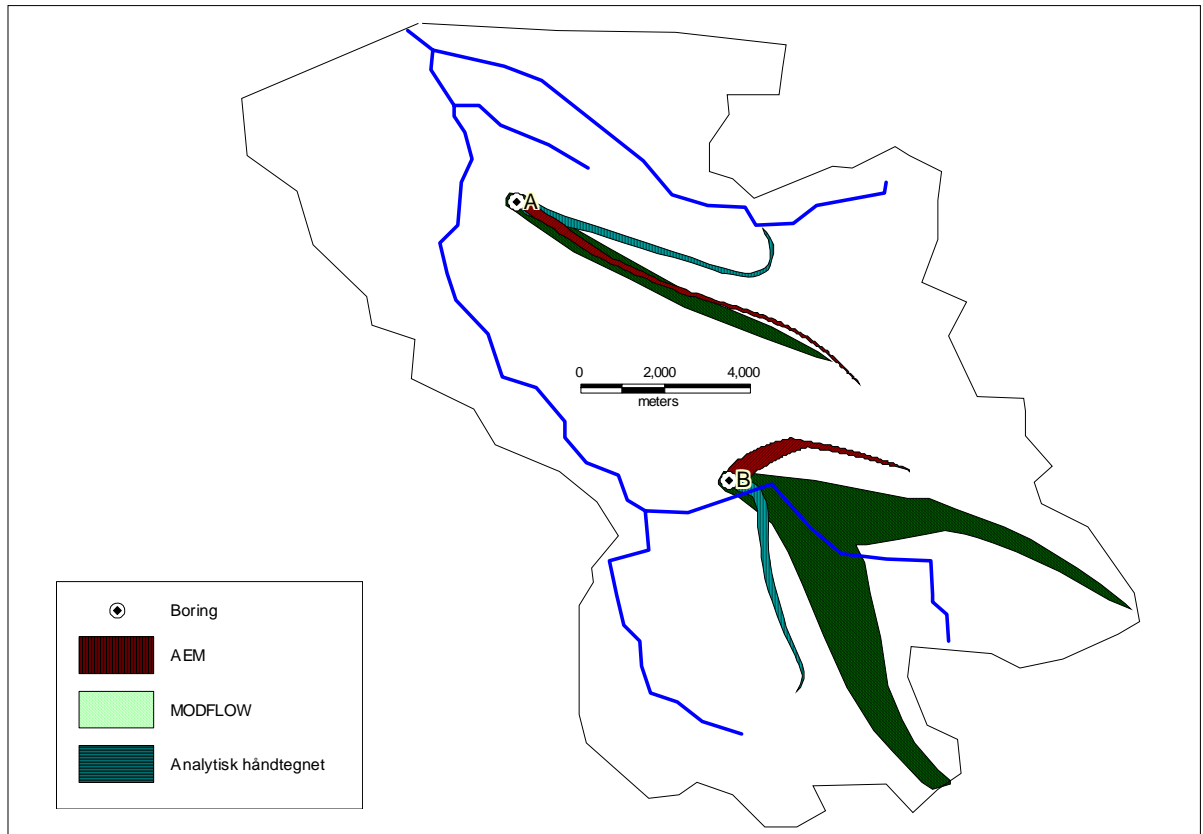


**Figur 3-7: Oplande fra MODFLOW med indvinding i forskellig dybde sammenholdt med opland fra AEM modellen.**

Endelig er der for boring A og B svarende til scenarium 5 og 6 udarbejdet håndtegnede oplande. Det ses af Figur 3-8, at håndtegnede oplande ikke er sammenfaldende med de modelberegne-  
de oplande. Oplandet til boring A forløber således mere i østlig retning og forløber til et vandløb be-  
liggende øst for boring A, hvor de modelberegne-  
de forløber i syd-østlig retning. For boring B for-  
løber oplandet mod syd, hvor de modelberegne-  
de forløber mod syd-øst.

Årsagen til at både boring A og B for håndtegnede oplande ikke følger de modelberegne-  
de oplande i udbredelse og retning skyldes, at de stringent er optegnet, så de forløber op til nærmeste  
grundvandskel eller grundvandstop i området. Derfor er disse toppunkter meget styrende for op-  
landenes beliggenhed for både boring A og B. Endelig er håndtegningsmetoden også svær at  
anvende, især når boringerne ligger meget tæt på vandløbet, som det specielt gør sig gældende  
for boring B, da det er svært at håndtere graden af hydraulisk kontakt imellem vandløb og grund-  
vandsmagasin.





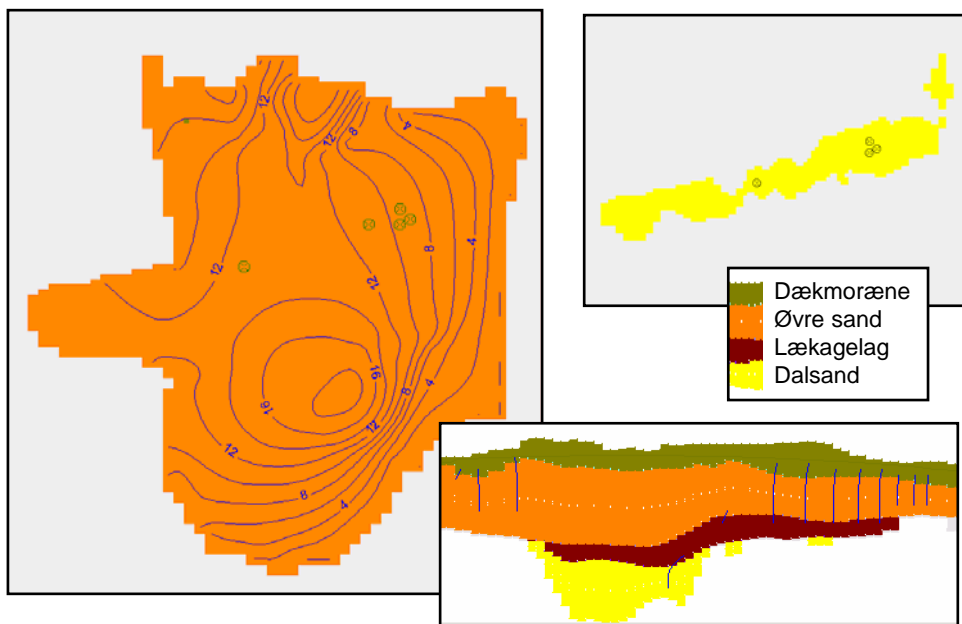
Figur 3-8: Håndtegnede oplande sammenholdt med oplande fra AEM og MODFLOW-modellen.

### 3.2.6 Sammenfatning på oplande fra hedesletten

- God overensstemmelse i AEM og FDM oplande for boring A, både placering og form.
- Håndtegnede oplande giver væsentlige afvigelser, da de stringent er optegnet, så de strømmer op til nærmeste grundvandskel. De håndtegnede oplande er svære at håndtere i boreriger tæt på vandløb, da kontakt imellem vandløb og magasin ofte er ukendt.
- Ingen overensstemmelse i oplande for boring B. Dette skyldes både forskellig implementering af vandløbskontakt samt den numeriske grundvandsmodels mulighed for dyb grundvandsstrømning under vandløbet. Vandløbskontakten er vigtig i praksis og AEM har nogen begrænsninger for Karup Å for indvindingen tæt på vandløb.
- Dybdeanalysen kan være vigtig, idet oplandenes udstrækning er meget afhængig af denne, i dette tilfælde både for boring A og B.

- **Model B - Begravet dal**

Denne model tager udgangspunkt i østjysk geologi, hvor man har kortlagt en begravet dal. Hydrostratigrafien i området består af et større sandmagasin med en dækmoræne. Området er gennemskåret af en øst-vest-gående sandfyldt dal. Kontakten mellem det regionale sandmagasin og den begravede dal er lækagebegrænset af et udbredt lerlag. Bunden og siderne af dalen er afgrænset af impermeabelt palæocent ler. Nord og syd for dalen når dette ler næsten terræn og det øvre udbredte sandmagasin er i disse områder afsnøret. Figur 3-9 viser den konceptuelle hydrostratigrafi i MODFLOW udgaven af modellen samt det beregnede grundvandspotentiale for det øvre magasin.



**Figur 3-9: Begravet dal opstillet i MODFLOW, her vist for øvre sandmagasin og nedre dal sand samt Nordsyd-gående tværsnitprofil på tværs af dalstrukturen. Tv ses det beregnede grundvandspotentiale for det øvre magasin.**

### 3.2.7 Data

Indvindingsboringerne er fordelt på to kildefelter med to borer, A og B. Herfra indvindes fra forskellige beregningslag i forskellig dybde (beregningsslag). Tabel 6 viser en oversigt over indvindingsboringerne placering i modellen.

Ved boring B er der desuden placeret 2 kildepladsboringer (KP1 og KP2) for at simulere en kildeplads med flere borer. Samtidig er der placeret en skyggeboring (SB) tæt ved kildepladsen (jf. tabel 5).

**Tabel 6: Oversigt over indvindingsboringer.**

Borings ID	Lag
A1	2,3,5,6
B1	2,3,5,6
SB	2
KF1	5,6
KF2	5,6

### 3.2.7.1 Scenarier

Der udføres scenarier med forskellig dybde af indvindingsboringerne ved område A og B. Tabel 7 viser en oversigt over de 10 scenarier og i alt 18 oplande for model B.

**Tabel 7: Oversigt over indvindingsscenarier for model B**

Scenarium	
1	Indvinding A & B, lag 6, 200.000 m <sup>3</sup> /år
2	Indvinding A & B, lag 5, 200.000 m <sup>3</sup> /år
3	Indvinding A & B, lag 3, 200.000 m <sup>3</sup> /år
4	Indvinding A & B, lag 2, 200.000 m <sup>3</sup> /år
5	Indvinding A & B, lag 6, 400.000 m <sup>3</sup> /år
6	Indvinding A & B, lag 5, 400.000 m <sup>3</sup> /år
7	Indvinding A & B, lag 3, 400.000 m <sup>3</sup> /år
8	Indvinding A & B, lag 2, 400.000 m <sup>3</sup> /år
9	Indvinding B, KF1 og KF2, 100.000 m <sup>3</sup> /år. Indvinding lag 2 (alle)
10	Indvinding B, KF1 og KF2, 100.000 m <sup>3</sup> /år og opstrøms indvinding på fra SB på 50.000 m <sup>3</sup> /år. Indvinding lag 2 (alle)

### 3.2.8 MODFLOW model

MODFLOW-modellen har udgangspunkt i en mere kompleks model. De største topografiske heterogeniteter er fjernet ved udglatning, nettonedbøren (svarende til grundvandsdannelsen i øvre magasin i denne model) er gjort ensartet over hele modellen og alle indvindingsboringer er fjernet. Desuden er der placeret en del supplerende observationsboringer, således at modellen har 45 pejlepunkter, hvoraf 6 er placeret i dalstrukturen med god indbyrdes afstand og de resterende pænt fordelt i det øvre magasin.

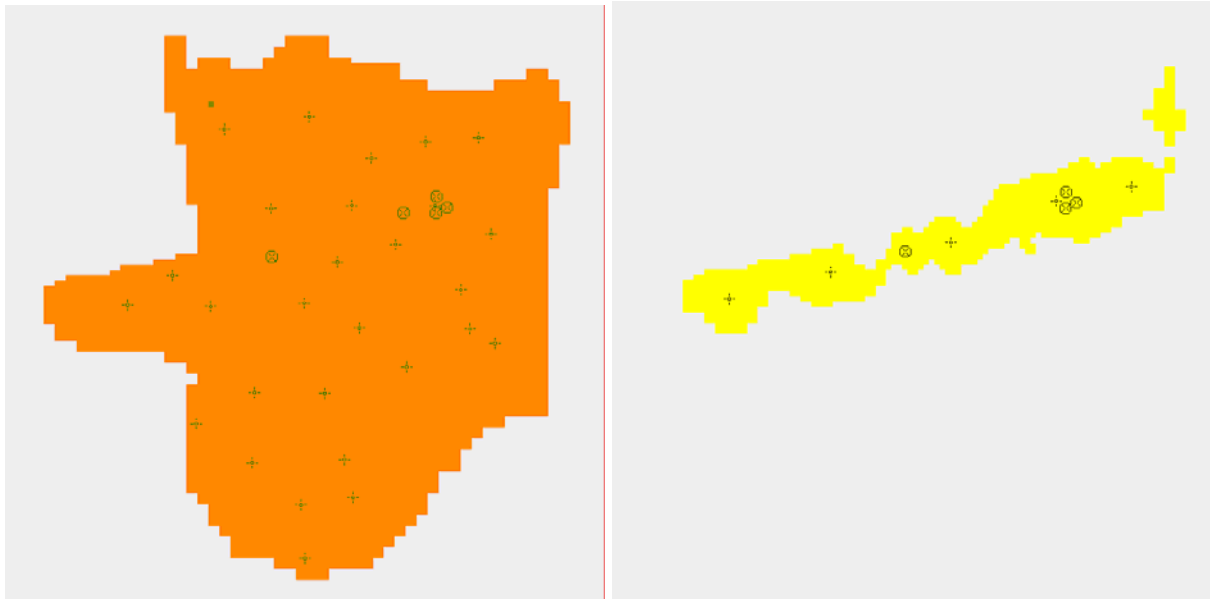
Dækmorænen har en hydraulisk ledningsevne på  $4,0 \times 10^{-6}$  m/s. Det øvre sandmagasin har en hydraulisk ledningsevne på  $8,0 \times 10^{-5}$  m/s. Lækagelaget som adskiller det øvre fra det nedre magasin har en hydraulisk ledningsevne for  $K_{xy}$  på  $5,0 \times 10^{-7}$  m/s og  $1,0 \times 10^{-7}$  m/s for  $K_z$ . Det nedre magasin i den begravede dal har en hydraulisk ledningsevne på  $2,0 \times 10^{-4}$  m/s. Modellen har varierende lagtykkelser.

Endvidere er der lagt dræn ind i det øverste aktive beregningslag, da modellen under kalibreringsfasen i flere beregningsceller havde problemer med "flooded cells", hvor det beregnede

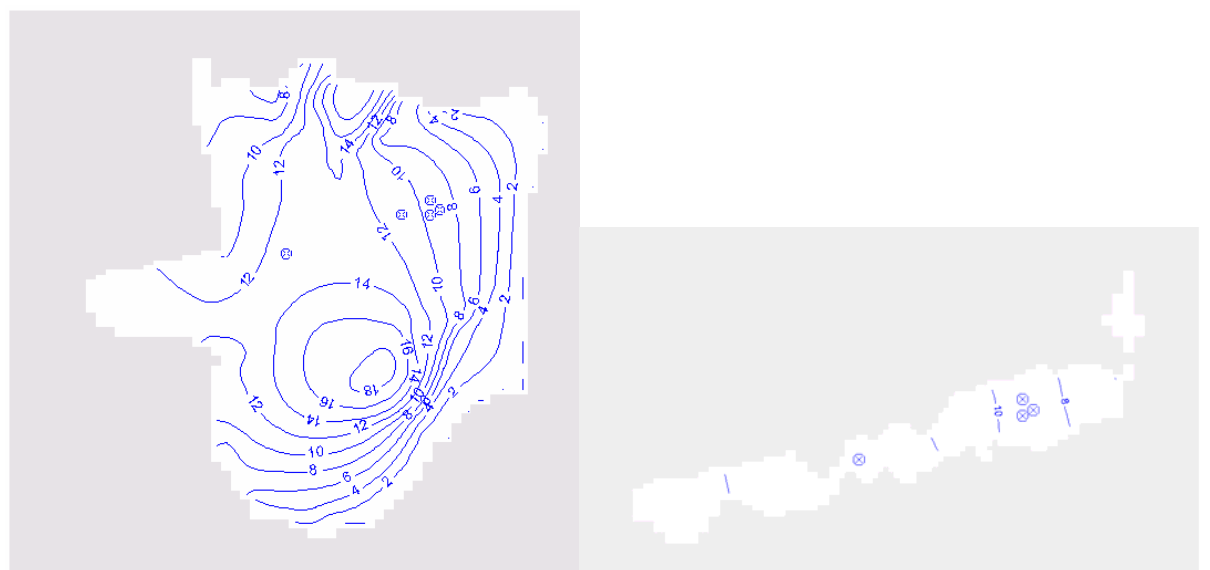
grundvandspejl lå flere meter over terræn. Det øverste modellag er beregnet med frit vandspejl og de 5 underliggende beregningslag er defineret som spændte.

Figur 3-10 viser fordelingen af observationssteder og indvindingsboringer i MODFLOW modellen. Figur 3-11 viser det beregnede grundvandspotentiale i det udbredte øvre sandmagasin samt den begravede dal.

Nettonedbøren er uniform fordelt over området i modellens øverste beregningslag og er sat til 158 mm/år.



Figur 3-10: Fordelingen af observationssteder (+) og indvindingsboringer (⊗) i øvre magasin og dalstrukturen.



Figur 3-11: Beregnet grundvandspotentiale i det udbredte sandmagasin (venstre) samt begravet dal (højre) i MODFLOW modellen.

Observationsboringerne er alle fiktive og indgår i kalibreringen af AEM-modellen og som datagrundlag for potentialekort til de analytiske håndtegnede oplande.

### 3.2.9 Håndtegnede oplande

Der er udarbejdet analytiske håndtegnede oplande for boringer A og B svarende til scenarium 5 og 6 med en indvinding på  $400.000 \text{ m}^3/\text{år}$ , hvor der indvindes fra det primære magasin i lag 5 og 6.

Formlerne for magasin med gradient og spændt magasin er anvendt i optegningerne af de analytiske oplande /13/. Gradienten (I) ved kildepladsen er beregnet til 0,0020, og T ved kildepladsen er beregnet til  $7,0 \text{ E-}03 \text{ m}^2/\text{s}$ . Her fås stagnationspunkt til 144 m og oplandsbredden beregnes til 453 meter, og den asymptotiske oplandsbredde beregnes til 906 meter (jf. formel 3.1 - 3.3)

Der er udarbejdet et arealtjek for opland A og B efter formel 3.4, hvor N er sat til  $158 \text{ mm}/\text{år}$  og Q  $400.000 \text{ m}^3/\text{år}$ . Herved fås et opland på  $2,53 \text{ km}^2$  (jf. figur 3.-15).

### 3.2.10 AEM model

Den analytiske element model kan ikke beskrive den begravede dal til fulde, idet modellen består af et enkelt modellag. Der sker i øjeblikket en stor udvikling af AEM modeller, og derfor bør man se, om der udvikles brugervenlige flerlagsmodeller inden for nærmeste fremtid.

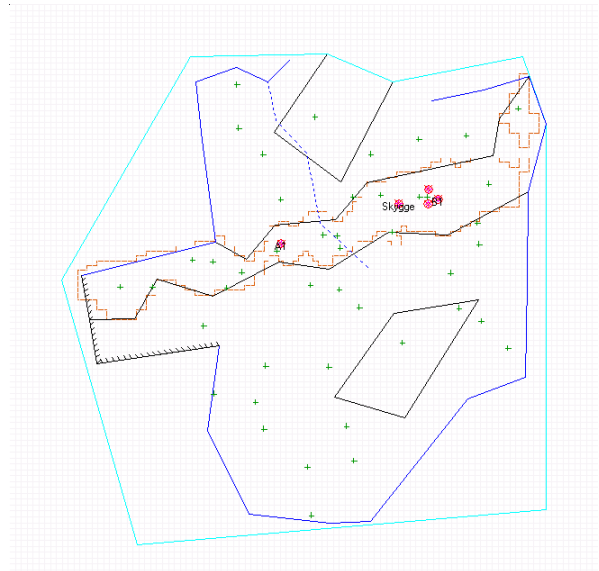
Figur 3-12 viser modellen opstillet i VisualAEM. Modelranden er defineret som en fastholdt tryk-rand, dels fra en kyst med 0 m rand i øst, dels som vandløb med fuld hydraulisk kontakt i syd, nord og vest. Der er desuden indlagt en no-flow rand i modellens sydvestlige del svarende til MODFLOW modellen.

Dalstrukturen er indlagt som et øst-vestgående polygon markeret af de overordnede træk fra dalens afgrænsning i MODFLOW modellen. Strukturen er indlagt som en heterogen transmissivtetszone, og det antages at transmissiviteten er højere end den omkringliggende aquifer.

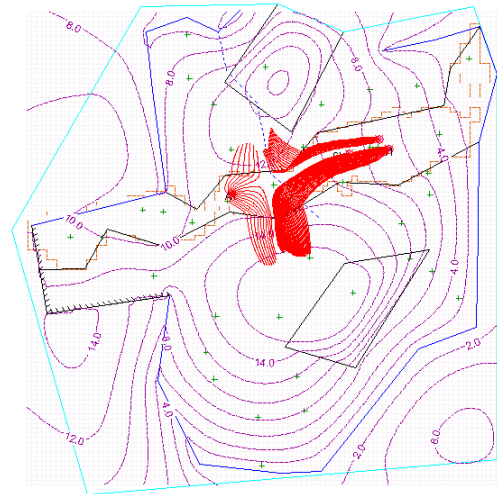
Der er desuden indlagt to strukturer, som repræsenterer de områder, hvor det regionale øvre magasin er fraværende, dvs. hvor det palæocene ler er i kontakt med dækmorænen. Disse områder er indlagt som transmissivtetszoner med lav hydraulisk transmissivitet.

Grundvandsdannelsen er, via et polygon med fastholdt vandfluks, givet som et estimat over nettonedbøren fratrukket vand til dræn. Polygonet for grundvandsdannelsen skal have en udstrækning svarende til hele modelområdet. Der er dog mulighed for at underindele i mindre polygonier alt efter arealanvendelsen. Det kan eksempelvis være zoner for byområder, hvor grundvandsdannelsen er markant mindre på grund af stor befæstningsgrad eller i områder med stor dræning. I dybe magasiner, som det er tilfældet for den begravede dal, er grundvandsdannelsen markant mindre. Her kan man indlægge en grundvandsdannelse som en zone med mindre fluks.

Man skal være opmærksom på, at hver polygon for grundvandsdannelsen i AEM modeller bidrager med et ekstra led i løsningen og, at beregningstiden forøges for hvert ekstra polygon. I manualerne for AEM modeller er der flere gode eksempler og vejledninger i, hvordan man bedst indlægger disse zoner.



**Figur 3-12: Model med begravet dal opstillet i AEM.**



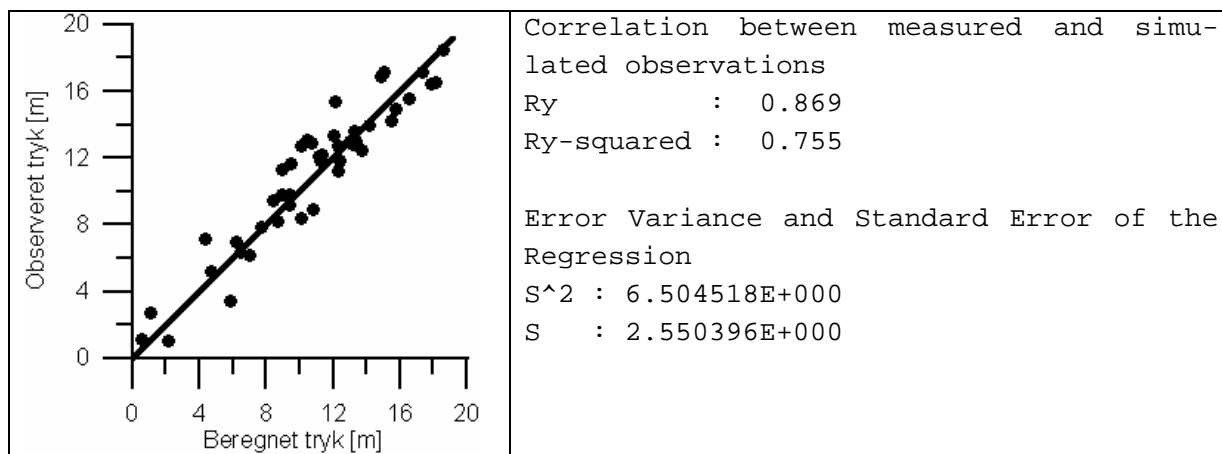
**Figur 3-13: Grundvandspotentiale og opland i AEM model over begravet dal.**

### 3.2.11 Modelkalibrering

Modellen er inverteret efter de pejleobservationer, som er genereret efter MODFLOW modellens observationsboringer.

Figur 3-14 viser beregnet og observeret tryk fra AEM modellen. Der er rimelig god overensstemmelse mellem data, men der ses også nogen spredning.

Tabel 8 viser analytiske elementer i den kalibrerede AEM model og deres hydrauliske lednings-evne.



Figur 3-14: Beregnet og observeret tryk fra AEM model samt kalibreringsstatistik

Tabel 8: Analytiske elementer i modellen

Element	Karakteristika
Globalt strømningfelt	Den hydrauliske ledningsevne er fundet til $7.4 \cdot 10^{-5}$ m/s for et magasin på 10 m.
Begravet dal	Den hydrauliske ledningsevne i zonen er fundet til $6.8 \cdot 10^{-4}$ m/s
Lav K Zoner	De lave K zoner er sat til $1.4 \cdot 10^{-5}$ m/s.
Vandløb	Følger primært randen. Det antages at der er fuld hydraulisk kontakt.
No-flow	Der er indlagt no-flow rande i modellen sydvestlige hjørne.
Grundvandsdannelse	Grundvandsdannelsen er beregnet til $3.5 \cdot 10^{-9}$ m/s svarende til 110 mm/år.

### 3.2.11.1 Potentielle modelforbedringer

De to zoner med tertiært ler kan beskrives i større detaljer ved at reducere grundvandsdannelsen i dem og reducere transmissiviteten yderligere. Herved kan man modellere en større stigning i grundvandsspejlet, uden at området er hydraulisk aktivt. Det vurderes at dette vil give en lidt bedre model, men da områderne allerede er nær inaktive er dette ikke nødvendigt.

## 3.2.12 Resultater

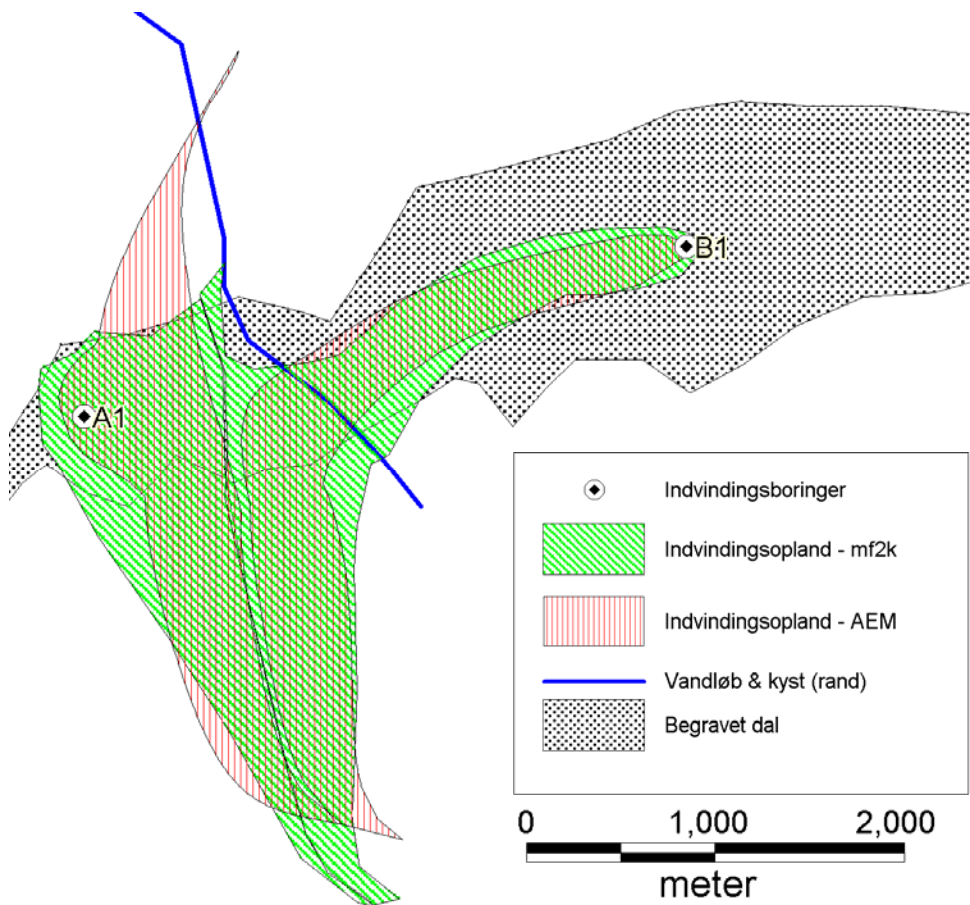
Følgende afsnit præsenterer de vigtigste resultater fra scenarieberegningerne ved den begravede dal.

### 3.2.12.1 Indvinding i begravet dal

I scenarium 1 og 2 indvindes fra det nedre magasin i den begravede dal i beregningslag 5 og 6 fra forskellig dybde.

Figur 3-15 viser beregnede indvindingsoplande for scenarium 2. Boring A ligger vest for grundvandsskellet. I området er der en nedadrettet gradient, således at strømmingen er fra det øvre magasin til den begravede dal. Når partiklerne ved partikelbaneberegningerne når op i det øvre

sandmagasin tager de en sydøstlig retning. For AEM modellen ses et tilsvarende opland, der dog også har en mindre arm mod nord. Dette skyldes at der ved grundvandsskellet forekommer et saddelpunkt, hvor strømmingen deles i en nordlig og sydlig retning.

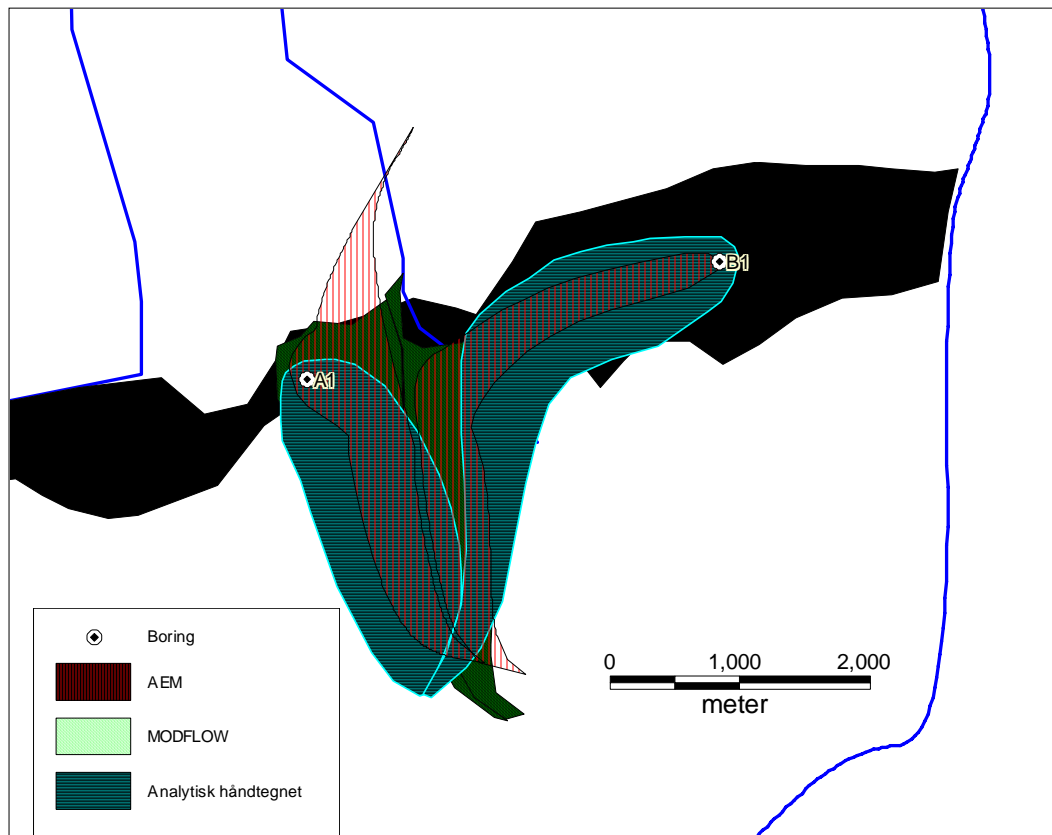


**Figur 3-15: Beregnet indvindingsoplande for indvinding i begravet dal, scenarium 2**

Dette saddelpunkt findes i AEM modellen lidt sydligere end i MODFLOW modellen, og herved opnås denne arm mod nord.

For boring B vil oplandet beregnet med MODFLOW udbredes mod vest og følge den begravede dal, og omkring grundvandsskellet vil vandet nå det øvre magasin gennem lækagelaget. Herfra tager oplandet en sydlig retning mod det maksimale grundvandspotentiale. AEM modellen viser samme opland på trods af, at der kun er tale om en enkeltlagsmodel. Der er lidt uoverensstemmelse i den eksakte placering af oplandet, men både form og bredde i oplandet er ens for de to modeltyper. Dette skyldes, at grundvandspotentialets karakteristika (gradient og placering af grundvandsskel) i den begravede dal i MODFLOW modellen ikke adskiller sig markant fra grundvandspotentialet i AEM modellen. Havde der været markant forskel i strømmingen i den begravede dal i MODFLOW modellen, ville indvindingsoplandet også have haft en anden form.





**Figur 3-15: Håndtegnede oplande sammenholdt med oplande fra AEM og MODFLOW-modellen.**

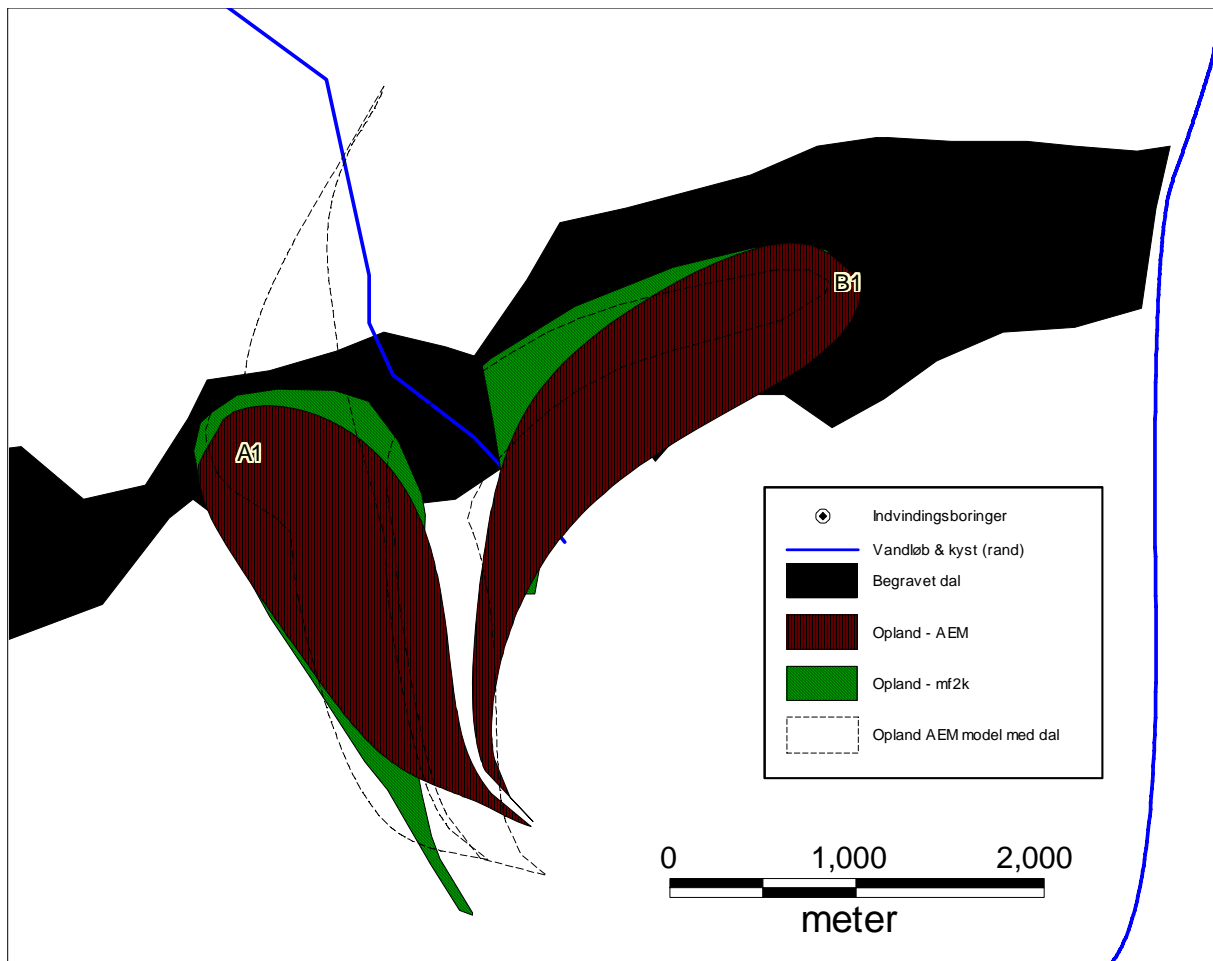
For de håndtegnede oplande ses en moderat overensstemmelse imellem disse og de modelberegne oplande for både boring A og B. Dog ses det, at de håndtegnede oplande generelt er noget bredere end de modelberegne oplande for både boring A og B (jf. figur 3.15).

### 3.2.12.2 Indvinding i øvre magasin

Flyttes indvindingen til det øvre magasin kan AEM modellen ikke beregne et opland svarende til MODFLOW modellen, idet AEM modellen er opstillet og kalibreret til en model med en korrekt beskrivelse af en begravet dal. Derfor blev der udarbejdet en alternativ udgave af AEM modellen. Ved at indføre supplerende hydrauliske zoner og grundvandsdannelse i AEM modellen som ser bort fra den begravede dal. Dette gøres med antagelsen om, at lækagen og dermed vandudvekslingen mellem det øvre magasin og den begravede dal er meget lille og kun udgør en mindre andel i forhold til grundvandsdannelsen ovenfra, kan denne ændring i modellen godt forsvares når fokus er rettet mod de terrænnære hydrogeologiske processer.

Figur 3-16 viser indvindingsoplandet til MODFLOW og AEM modellen for scenarium 3, hvor indvindingen foretages i det øvre magasin. Med stiplede linje er angivet oplandet som det vil se ud i AEM modellen med en begravet dal (scenarium 2). Der er nogenlunde overensstemmelse i indvindingsoplandene for MODFLOW modellen og AEM modellen uden dalstrukturen. AEM modellen genskaber både oplandenes form og bredde, og indikerer at oplandene skal findes mod syd. Dog bemærkes det, at AEM oplandenes haler er noget længere end MODFLOW modellens op-

lande. Dette indikerer, at MODFLOW er bedre til at simulere indvindinger i forskellige dybder, da MODFLOW arbejder med flere beregningslag.

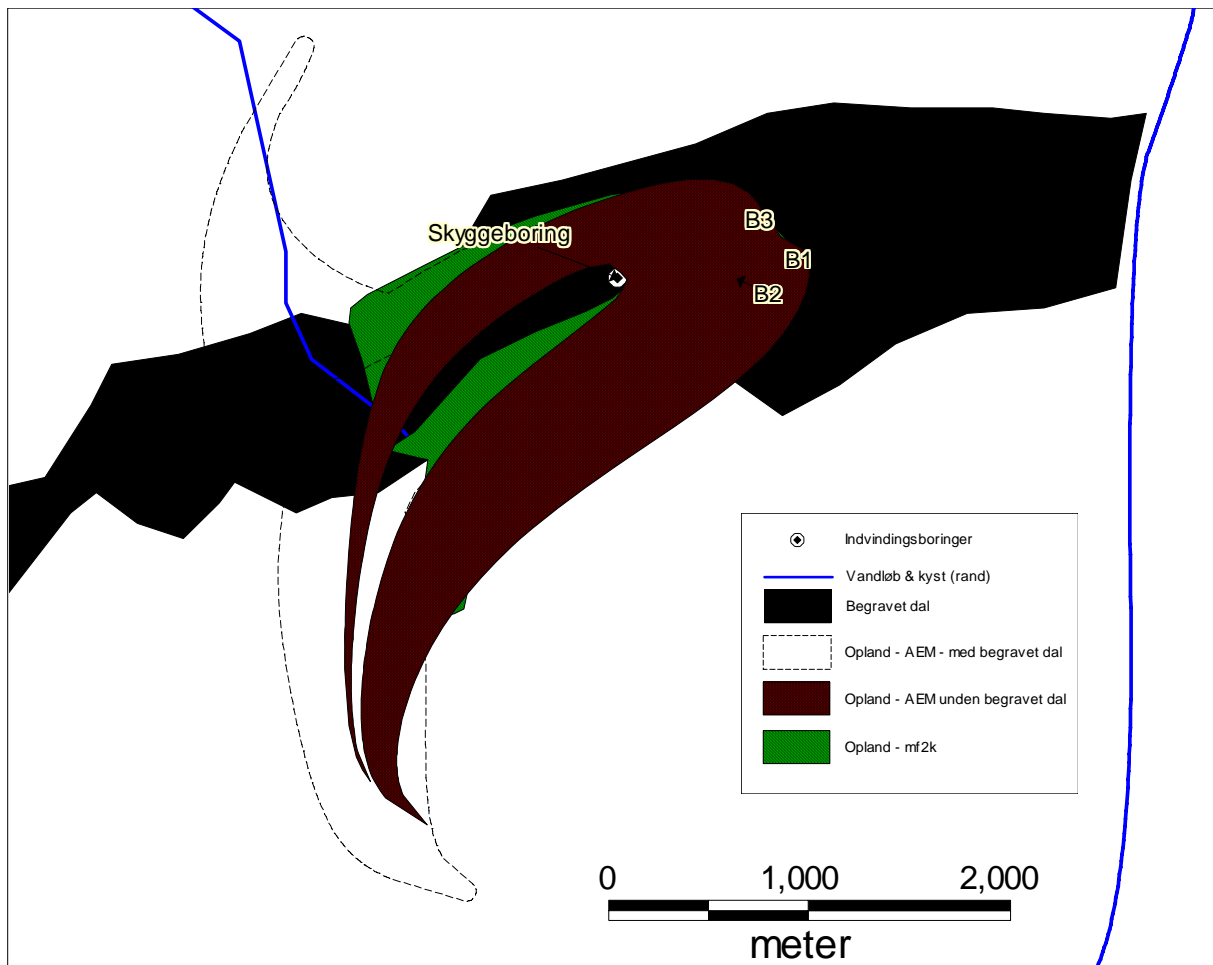


Figur 3-16: Beregnet indvindingsoplande for indvinding i øvre magasin, scenarium 3.

### 3.2.12.3 Indvinding fra kildeplads

Ved indvinding fra en kildeplads vil der være indbyrdes påvirkning imellem indvindingsboringerne. Scenarium 10 undersøger sådan en situation, og i dette scenarium er der en indvinding kaldet skyggeboring (SB) inden for det samlede indvindingsopland. Denne indvinding påvirker det samlede indvindingsopland. Figur 3-17 viser det samlede indvindingsopland fra kildepladsen. De to modeltyper opnår igen nogenlunde samme form og bredde for indvindingsoplandet, og oplandet fra skyggeboringen er i begge modeller identisk. Det ses dog igen, at halerne på AEM-oplandene er noget længere end i MODFLOW modellen.

Kildepladsoplandet for AEM modellen med en begravet dal er vedlagt Figur 3-17 med en stiptet linje. Her ses det igen, at den begravede dal ikke skal med i modellen, hvis man kun ser på det øvre magasin. AEM modellen kan derfor godt benyttes i situationer, hvor den hydrogeologiske beskrivelse kan reduceres til basisinformation, men man skal være varsom med tolkningen af resultatet. Ydermere kan AEM modellen antageligt ikke benyttes i en kildepladssituation, hvor indvindingen forgår både i det øvre magasin og den begravede dal. I sådanne situationer bør man tage en tredimensionel model i brug.



Figur 3-17: Beregnet indvindingsoplande for indvinding ved kildeplads i øvre magasin, scenarium 10.

### 3.2.13 Sammenfatning på oplande fra den begravede dal

- God overensstemmelse i oplande (retning og form). Halerne for AEM modellens oplande er lidt for lange i forhold til MODFLOW-scenarierne for de øvre lag.
- AEM modellen kan ikke klare indvinding i begge magasiner, men man kan vælge at opstille 2 modeller. En flerlagsmodel er oplagt i dette tilfælde.
- Kildepladsoplande for AEM og MODFLOW stemmer rimelig godt overens. Halerne for AEM-oplandene er længere end ved MODFLOW-oplandene

### 3.3 Model C - Randzone geologi

Randzonemodellen er fra en model med markante heterogene hydrostratigrafiske forhold. Modellen er fra en ø, hvor der i et relativt lavpermeabelt medium eksisterer områder med høj permeabilitet.

#### 3.3.1 Opstilling

**Tabel 9: Placeringen af boringsindtag i Model C**

Name	Modellag
A	2,4
B	2,4
KP1	2,4
KP2	2,4
Skyggeboring	2

Der er udarbejdet 6 scenarier i model C. Scenarierne har fokus på oplande fra indvinding i to forskellige dybder med to forskellige kapaciteter. Desuden laves et scenarium med indvinding fra kildeplads med og uden interferens fra en mindre indvinding på 50.000 m<sup>3</sup>/år kaldet skyggeboring (SB) i indvindingsoplandet. Tabel 10 viser scenarier for model C. Da AEM modellerne er todimensionale er hhv. scenarier 1 og 2 samt 3 og 4 slået sammen i AEM modellerne.

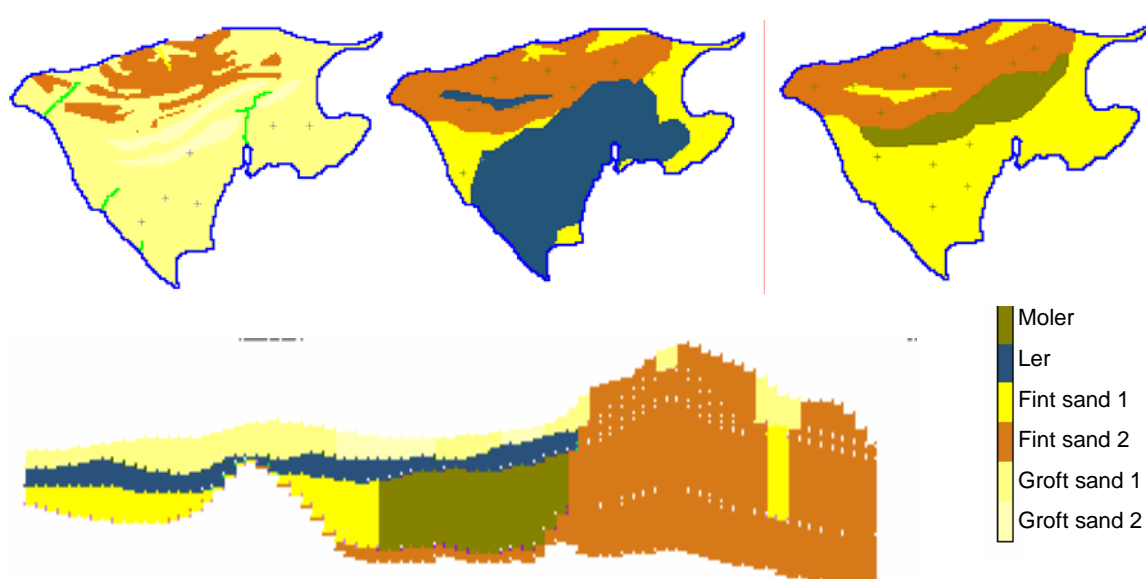
**Tabel 10: Scenarier benyttet i Model C**

Scenarium	
1	Indvinding A & B, lag 2, 200.000 m <sup>3</sup> /år
2	Indvinding A & B, lag 4, 200.000 m <sup>3</sup> /år
3	Indvinding A & B, lag 2, 100.000 m <sup>3</sup> /år
4	Indvinding A & B, lag 4, 100.000 m <sup>3</sup> /år
5	Indvinding A, KF1 og KF2, 100.000 m <sup>3</sup> /år. Indvinding lag 4 (alle)
6	Indvinding A, KF1 og KF2, 100.000 m <sup>3</sup> /år og opstrøms indvinding på 50.000 m <sup>3</sup> /år. Indvinding lag 4 (SB lag 2)

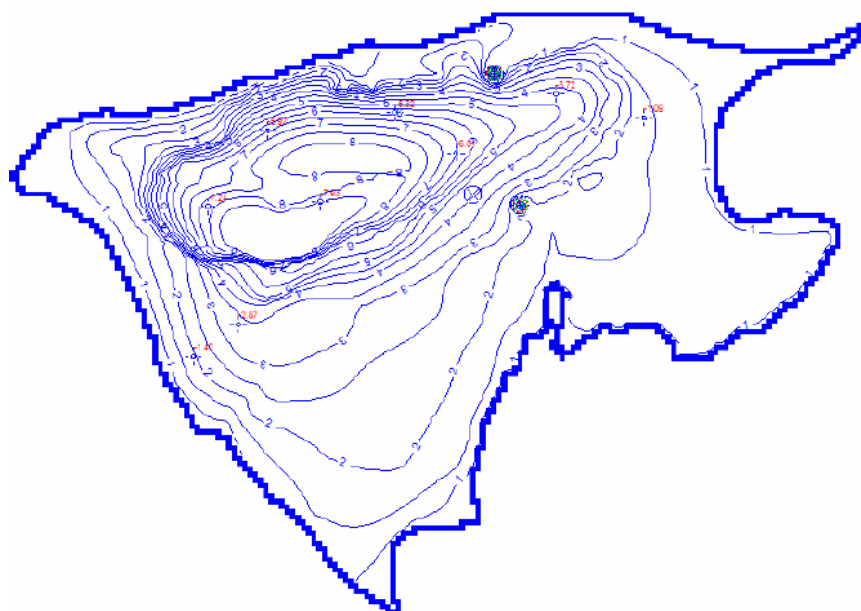
#### 3.3.2 Modflow model

MODFLOW modellen har en ydre fastholdt trykrand om hele modelområdet (en ø). Modellen består af 4 aktive lag som bygger på en heterogen hydrostratigrafisk model. Modellen er noget forsimplet i forhold til den originale model, da de 7 oprindelige modellag er reduceret til 4 beregningslag. De hydrauliske zoner er bibeholdt, men der er tilføjet 2 ekstra K-zoner i det øverste beregningslag. Figur 3-18 viser en skematisk oversigt over modellen.

Nettonedbøren er konstant og uniform fordelt til det øverste beregningslag over hele modelområdet med 316 mm/år, svarende til grundvandsdannelsen, idet der i modellen ikke er implementeret dræn.



Figur 3-18: Oversigt over randmorænemodellen i MODFLOW. Tværsnitsprofilet er N-S gående gennem den centrale del af øen.



Figur 3-18: : Beregnet grundvandspotential for moleret og i det udbredte sandmagasin i MODFLOW modellen.

### 3.3.3 Håndtegnede oplande

Der er udarbejdet analytiske håndoptegnede oplande for boringer A og B svarende til scenarium 2 med en indvinding på  $200.000 \text{ m}^3/\text{år}$ , hvor der indvindes fra det primære magasin i lag 4.

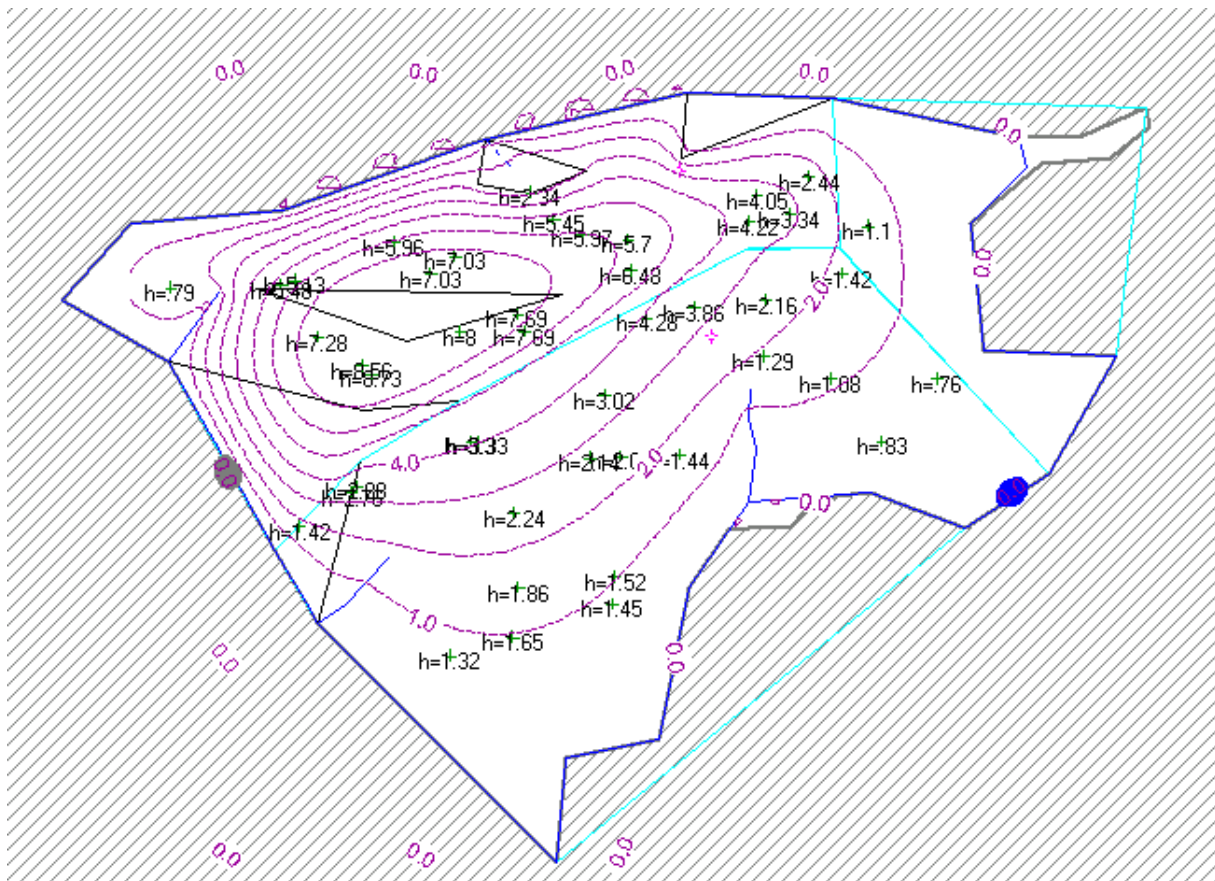
Formlerne for magasin med gradient og spændt magasin er anvendt i optegningerne af de analytiske oplande /13/. I ved kildepladsen er beregnet til 0,004, og T ved kildepladsen er beregnet til  $3,0 \text{ E-}03 \text{ m}^2/\text{s}$ . Her fås stagnationspunkt til 84 m og oplandsbredden beregnes til 264 m, og den asymptotiske beregnes til 528 meter.

Der er udarbejdet et arealtjek efter formel 4.11 i Geo-Vejledning /13/ (jf. side 30), og herved fås et håndtegnat opland på  $0,633 \text{ km}^2$  (jf. figur 3.22).

### 3.3.4 AEM model

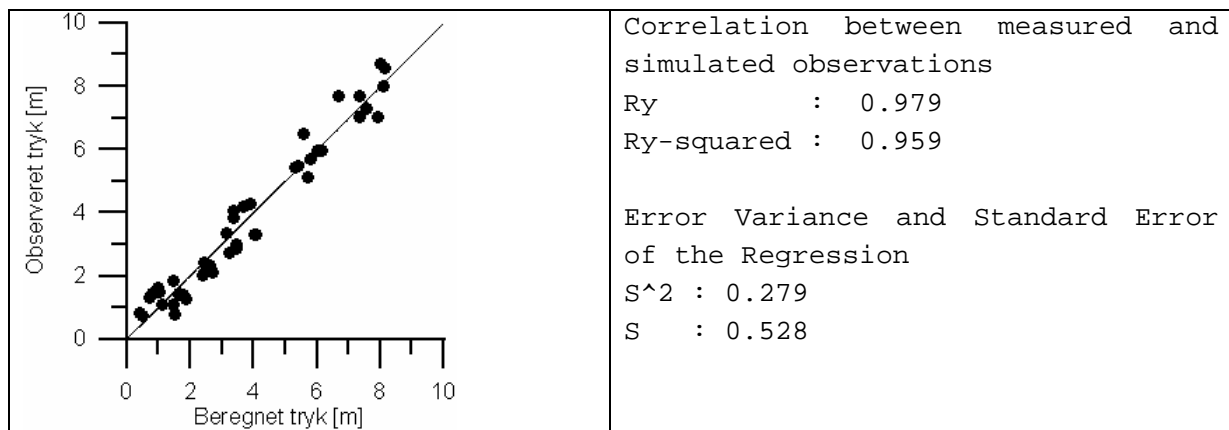
AEM modellen er opstillet med samme randbetingelser som MODFLOW modellen. Figur 3-19 viser opstilling og beregning af trykniveauet af modellen. Den ydre rand er defineret som en rand med fastholdt tryk på 0 m. Nogle få segmenter med vandløbsdræning er indlagt i modellen, men deres udstrækning er reduceret, idet kontakten med magasinet er begrænset. Modellen har defineret tre områder for grundvandsdannelse (lyseblå linjer i Figur 3-19). I den sydlige del af modellen er det øvre sandmagasin begrænset af mægtighed, og dræning er vigtig. Derfor forudsættes, at der her er reduceret grundvandsdannelse. Det samme gælder i den østlige del. I den nordlige del er grundvandsdannelsen højere, men der er en generel lav hydraulisk ledningsevne. I nogle få områder er der zoner med en højere hydraulisk ledningsevne. Disse er indlagt i modellen som heterogene transmissivitetssoner.

Alle parametre er herefter bestemt inverst mod pejlepunkter fra MODFLOW modellen.



Figur 3-19: Randmodel med rodet geologi.

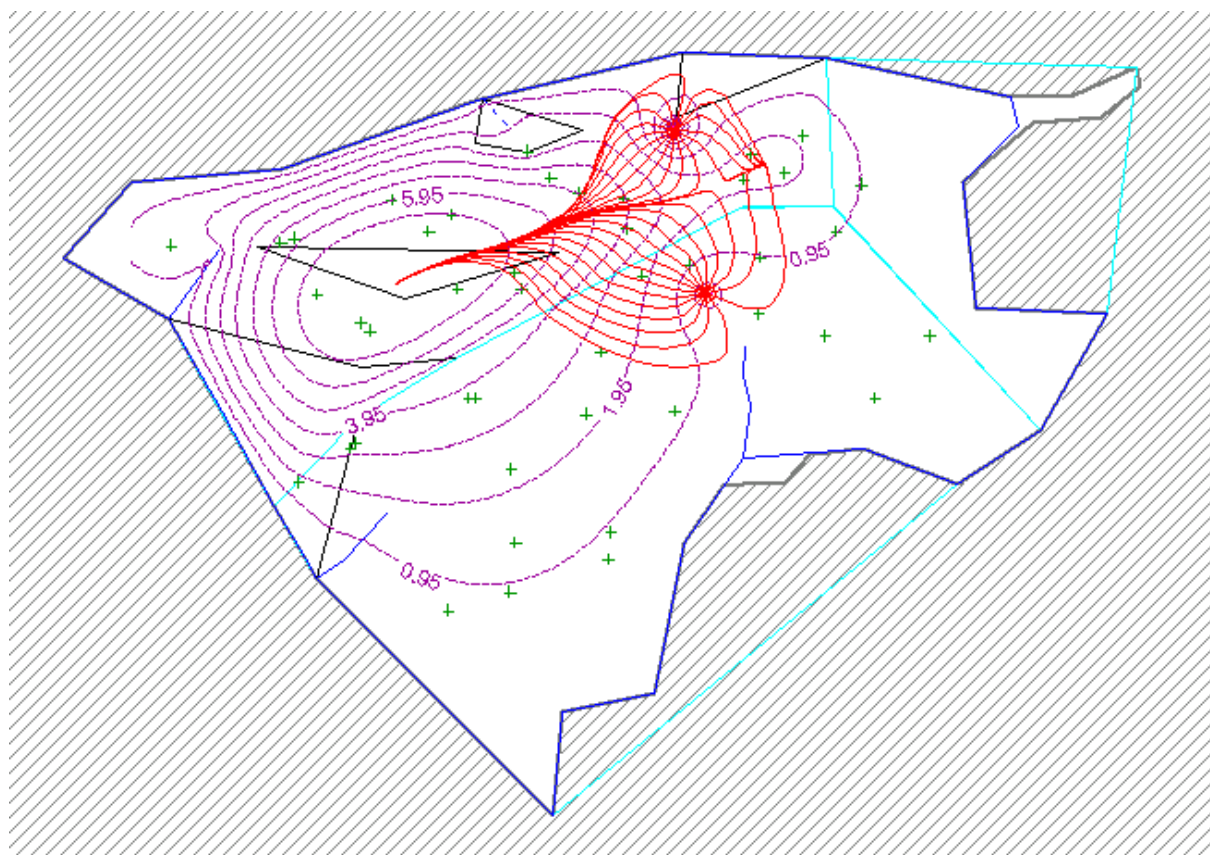
Kalibrering af modellen er sket inverst på de udvalgte parametre (transmissivitetsszoner samt grundvandsdannelse). Figur 3-20 viser Modflow (observeret) tryk mod AEM modellens tryk samt kalibreringsstatistik. Der er nogen variation i AEM modellen, der dog er fri for bias.



Figur 3-20: Beregnet og observeret tryk fra AEM model samt kalibreringsstatistik

De to indvindingsboringer er placeret således, at den ene boring ligger relativt tæt på den fastholdte trykrand, mens den anden boring er placeret med en god afstand til kysten, og er derfor ikke påvirket af randeffekter. Begge oplande forløber mod grundvandskællet på øens nordvestlige del. Figur 3-21 viser AEM modellens opstilling, grundvandspotentiale og partikelbaner for ind-

vindingsopland. Området er inddelt i tre zoner, en nordlig, en østlig og en sydlig. Tabel 11 viser en oversigt over parameterværdierne for de analytiske elementer.



Figur 3-21: Beregnet grundvandspotentiale og AEM oplande for scenarium 1+2.

Tabel 11: Oversigt over de analytiske elementer i modellen

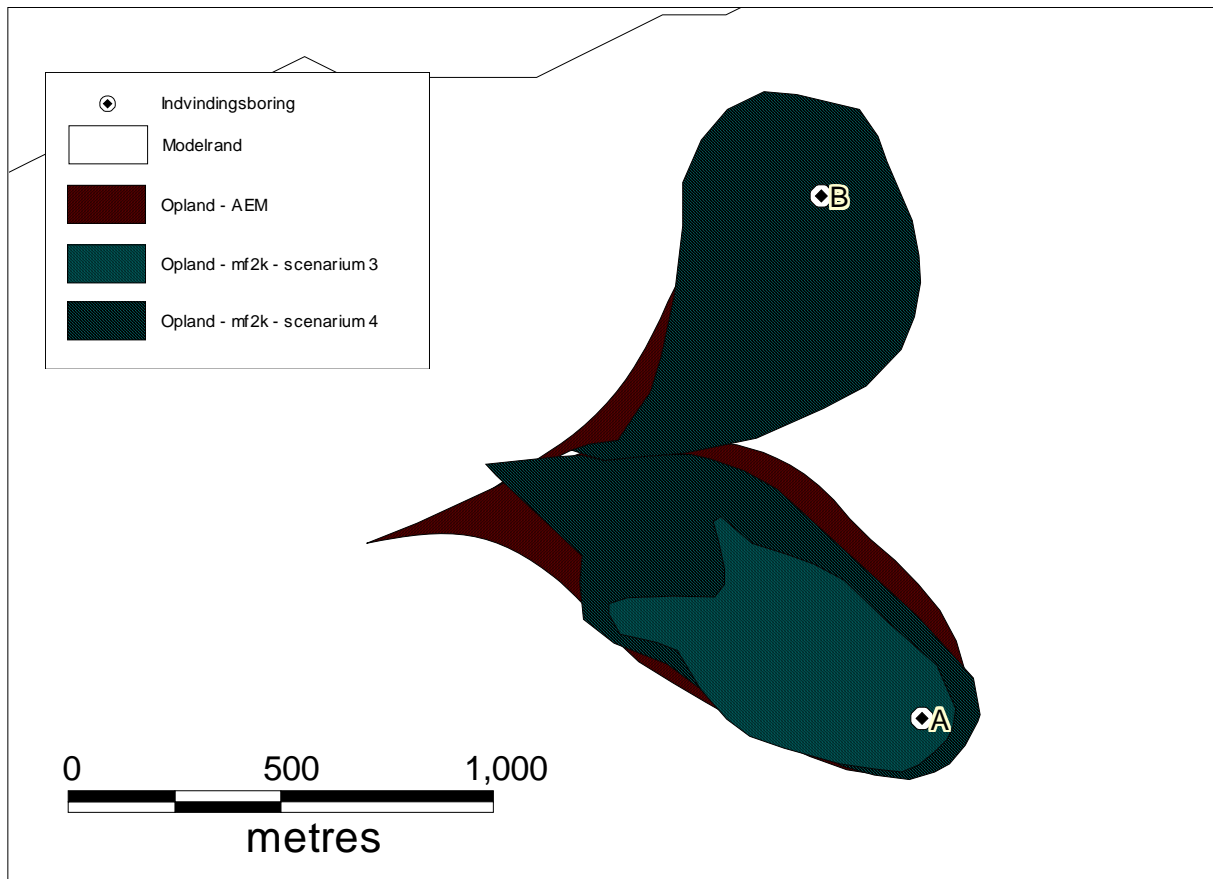
Element	Karakteristika
Globalt strømningsfelt	$K = 5.6 \cdot 10^{-5}$ m/s. Base ved kote -30 m
Grundvandsdannelse	Nordlige del : $10^{-8}$ m/s (315 mm/år) Østlige del: $5.5 \cdot 10^{-9}$ m/s (173 mm/år) Sydlige del: $5 \cdot 10^{-10}$ m/s (15 mm /år)
Lav K Zoner	Sandede områder i nord: $8 \cdot 10^{-5}$ m/s Østlige del: $1 \cdot 10^{-4}$ m/s Sydlige del: $2 \cdot 10^{-4}$ m/s
Vandløb	Følger primært randen som 0 m. Enkelte mindre vandløb i modelområdet Det antages, at der er fuld hydraulisk kontakt.



### 3.3.5 Resultater

#### 3.3.5.1 Enkeltindvinding

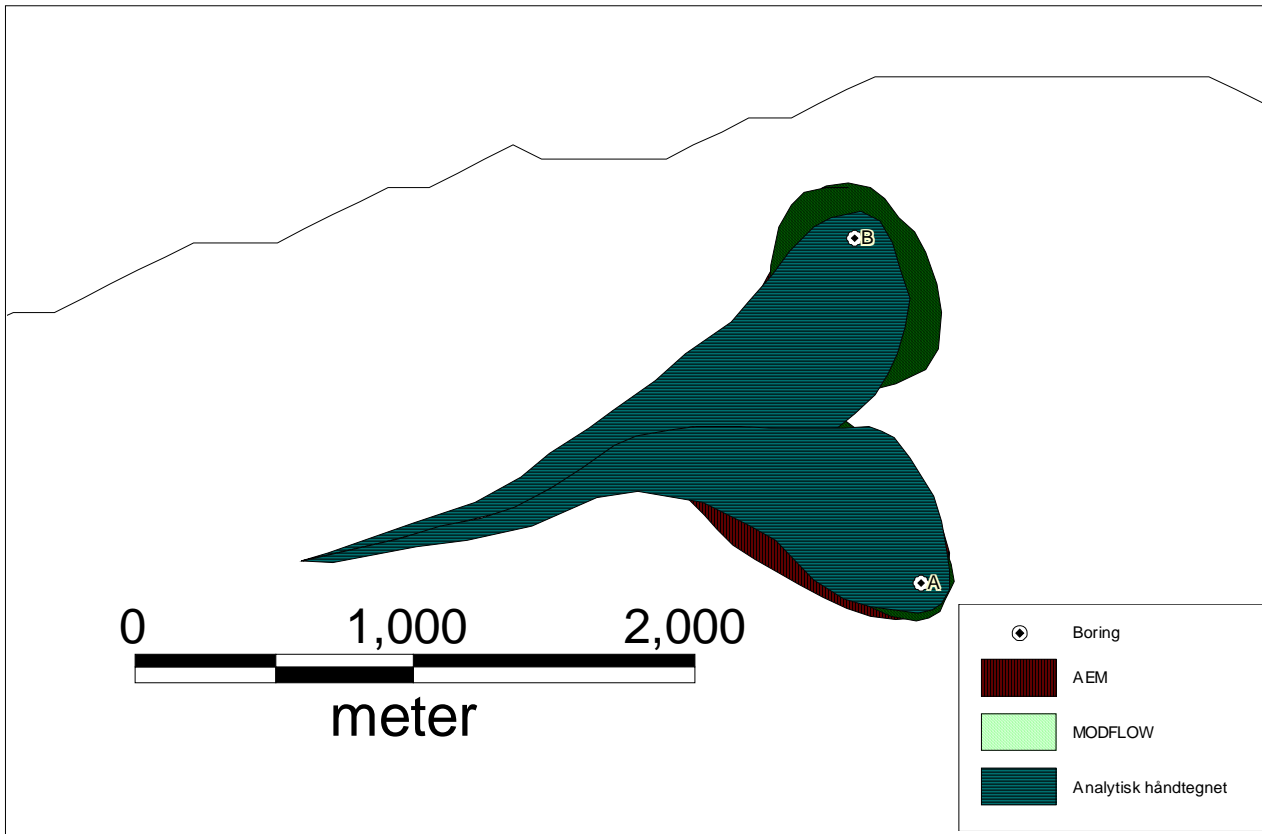
Scenarium 1+2 og 3+4 gav ca. samme resultat, og derfor er scenarium 3+4 præsenteret her. Figur 3-22 viser oplande for indvindingsboringerne A og B for scenarium 3 og 4. Boring B løb tør for vand for scenarium 3 (indvinding i lag 2, nær terræn), og er derfor ikke benyttet til oplandsberegningen. Indvindingen sker i hele magasinet i AEM modellerne, og derfor er dette ikke noget problem så lang tid, at grundvandspotentialet er over bunden af AEM magasinet.



Figur 3-22: Oplande for Scenarium 3+4 i model C.

Indvindingsoplandet for boring A er næsten identisk for scenarium 4, hvor der i MODFLOW indvindes fra bunden af magasinet. Indvindingsoplandene har næsten samme form og bredde. AEM modellen har en lidt længere hale. I scenarium 3 i MODFLOW, hvor der kun indvindes i den øvre del af magasinet, opnås en reduktion i oplandets størrelse, men bredden bibeholdes i stor udstrækning.

Indvindingsoplandet til boring B har samme dråbeform for de to metoder. Oplandet for AEM modellen når ikke så langt mod nord som MODFLOW modellen, hvilket kan skyldes, at MODFLOW modellen er mere påvirket af den fastholdte trykrand på grund af en lavere transmissivitet ( $K = 5 \times 10^{-6}$  m/s, ca. halvdelen af AEM modellen). Oplandene har ca. samme bredde.

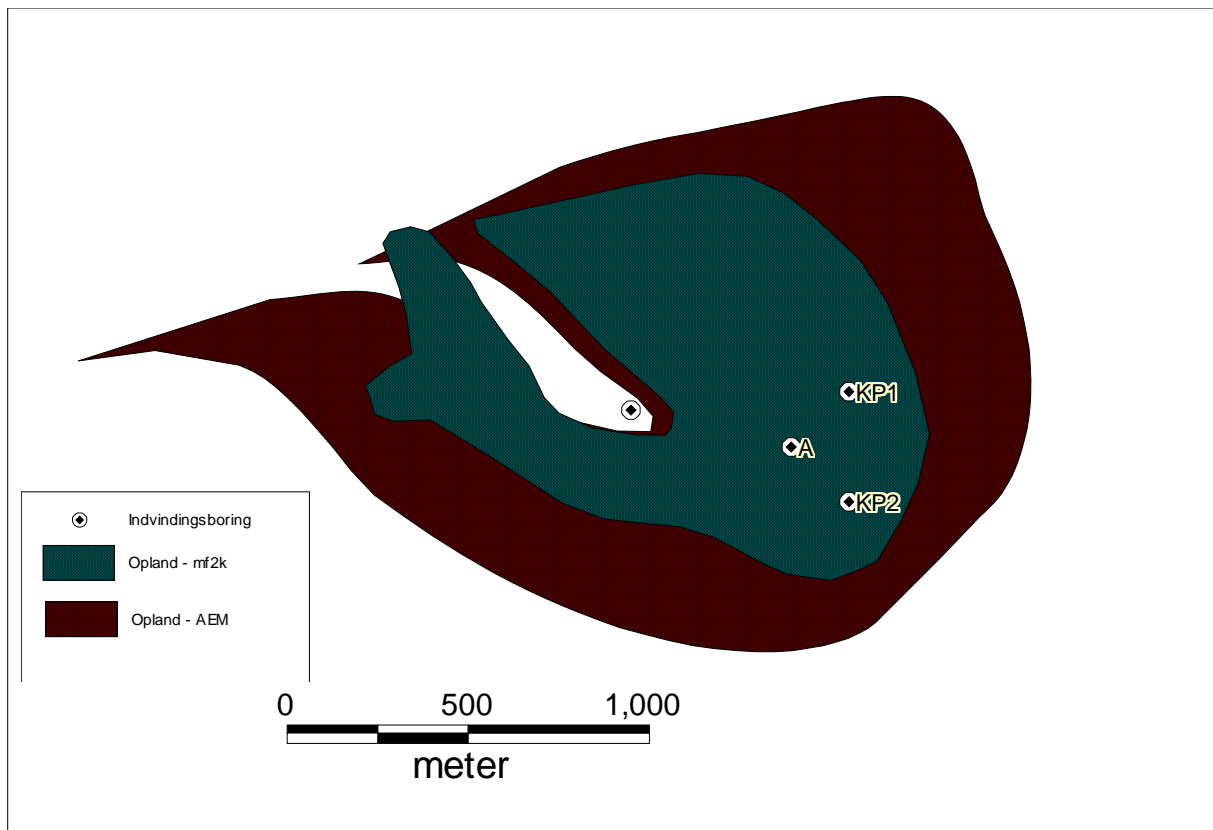


**Figur 3-22: Håndtegnede oplande sammenholdt med oplande fra AEM og MODFLOW-modellen.**

For de håndtegnede oplande ses en rimelig god overensstemmelse imellem disse og de modelberegneede oplande for både boring A og B. Dog ses det, at halerne på de håndtegnede oplande er noget længere end de modelberegneede oplande for både boring A og B (jf. figur 3.22). Dette skyldes, at de håndtegnede oplande er optegnet så de strømmer helt til grundvandsskellet, som det anbefales i Geo-Vejledning 2 /13/.

### 3.3.5.2 Kildepladsindvinding

Ved boring A er der indlagt 2 indvindingsboringer. Det samlede opland for de to modeller er vist på Figur 3-23. AEM oplandet er bredere end MODFLOW modellen, hvilket antageligt skyldes, at den hydrauliske ledningsevne i AEM modellen er lidt mindre end MODFLOW modellen. Begge oplande har næsten ens udstrækning, dog har AEM oplandet en lidt længere oplandshale i vestlig retning. Skyggeboringen optræder i de to modeller ens i form og bredde. Skyggeboringens opland i MODFLOW har en lidt mere nordlig retning.



Figur 3-23: Oplande for Scenarium 6 i model C.

### 3.3.6 Sammenfatning på oplande fra ø med rodet geologi

- God overensstemmelse mellem oplandenes form og udstrækning
- Kildeplads med 'skyggeboring' godt præsenteret. AEM opland lidt bredere end MODFLOW opland
- Dyb Indvindingsdybde giver bredere opland i MODFLOW i forhold til AEM model

## 3.4 Model D – Kalkmagasin

Modellen tager udgangspunkt i en hydrostratigrafi, hvor indvindingen overvejende sker i et kalkmagasin. Kalkmagasinet er fortrinsvis overlejret af kvartære sedimenter – både ler og sand, men kan også være overlejret af mere impermeablet palæocent ler.

I nærværende model undersøges oplande, hvor der er geologiske vinduer samt et større lerlege mellem sand- og kalkmagasinet, således at der i modellen forekommer markant forskellig strømning i de forskellige magasiner. Den komplicerede hydrostratigrafi udfordrer AEM modellens forudsætninger om et todimensionalt magasin.

Ofte er kalkmagasiner også fragmenterede og kan derfor udvise anisotrope magasinforhold. Derfor vil der i denne undersøgelse også blive foretaget en vurdering af oplande i et magasin med anisotropi.

### 3.4.1 Data

Indvindingen foretages i kalkmagasinet. Der undersøges oplande fra i alt fire lokaliteter i området med forskellige overlappende geologityper over kalkmagasinet.

Tabel 12 viser en oversigt over indvindingsboringer i modellen. Der er placeret fire indvindingsboringer i modellen med forskellige oplande. Boring A er placeret i et område med et opland i fortrinsvis sandet magasin, mens boring B og C har sandede geologiske vinduer i oplandet. Boring D er placeret i et område, hvor der ikke forekommer heterogeniteter i oplandet. Tabel 13 viser indvindings-scenarierne. Scenarium 1 og 2 har hvert fire oplande og der udarbejdes i alt 10 oplande.

**Tabel 12: Oversigt over indvindingsboringer i modellen**

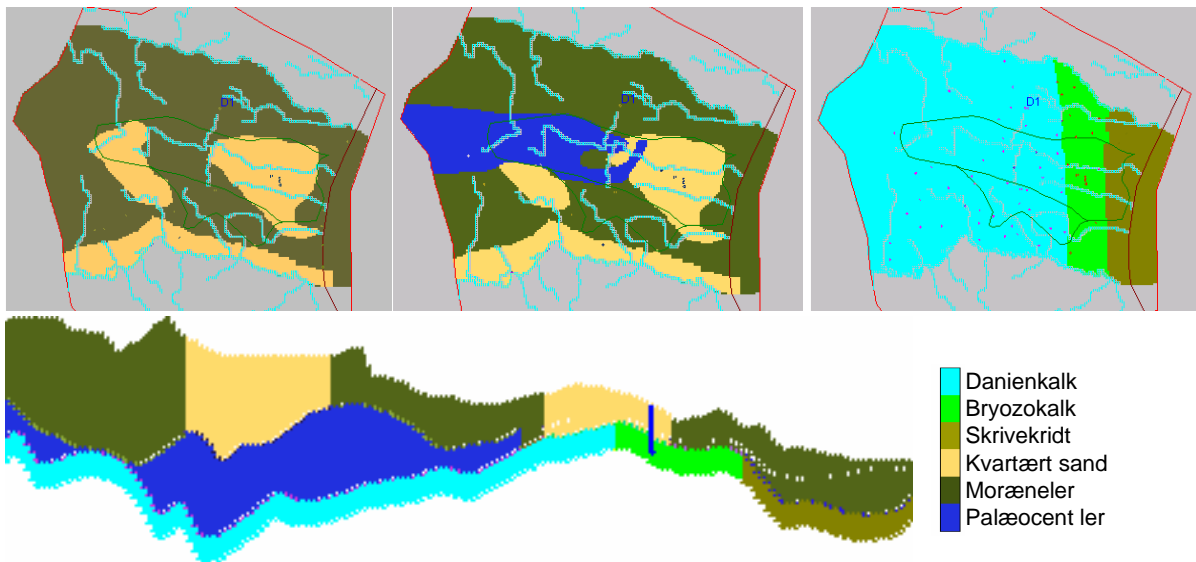
Name	Modellag	Note
A	3	Sand overlejrer kalkmagasinet
B	3	Blandet geologi
C	3	Indvinding fra kalk med geologisk vindue opstrøms
D	3	Ingen geologiske vinduer i opland
KP1	3	Kildepladsboring
KP2	3	Kildepladsboring
SB	3	Indvinding i opland

**Tabel 13: Oversigt over indvindingsscenarier**

Scenarium	
1	Indvinding A, B, C og D, lag 3, 200.000 m <sup>3</sup> /år
2	Indvinding A, B, C og D, lag 3, 400.000 m <sup>3</sup> /år
3	Indvinding A, KF1 og KF2, 100.000 m <sup>3</sup> /år. Indvinding lag 3 (alle)
4	Indvinding A, KF1 og KF2, 100.000 m <sup>3</sup> /år og opstrøms indvinding på 50.000 m <sup>3</sup> /år. Indvinding lag 3 (alle)

### 3.4.2 Modflow model

Modellen består af tre lag. Øverste modellag består af kvartært sand og moræneler. Lag nummer to er en kopi af lag 1, dog med tilstedeværelsen af et lav-permeabelt palæocent lerlag. Lag 3 består af kalken. Kalken er opdelt i tre zoner, lavpermeabelt skrivekridt mod øst, herefter et bånd med højpermeabel bryozokalk, mens den vestlige del består af tættere danien kalk.



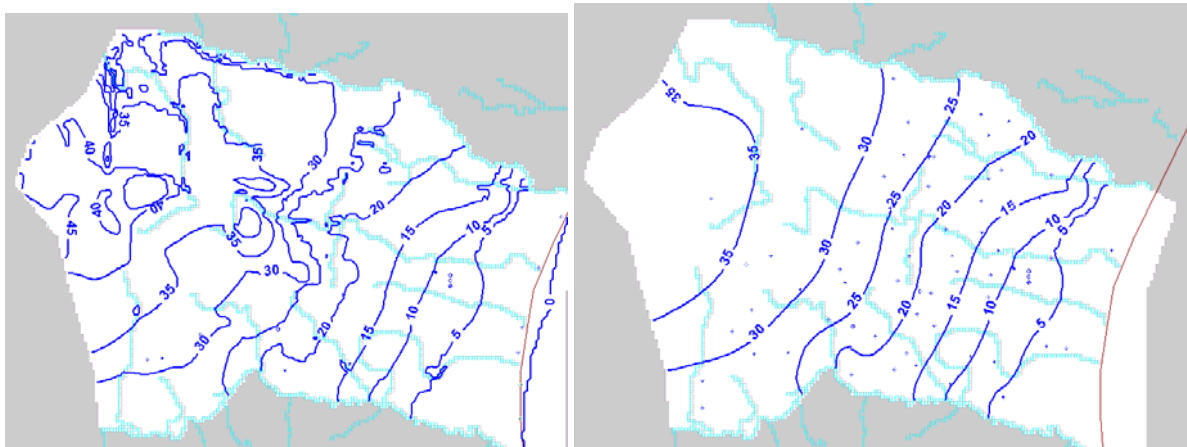
**Figur 3-24: Hydraulisk zonerung i lag 1, 2 og 3 samt vest – øst profil.**

Modflowmodellen er modificeret en del i forhold til den originale model, idet antallet af modellag er reduceret til 3 og de hydrostratigrafiske flader udglattet. I de kvartære lag er de hydrologiske sandvinduer ændret til nogle større sammenhængende områder.

Ydermere blev der i modellen tilføjet en nord-syd gående anisotropi til kalken for at vurdere konsekvensen af anisotropi på oplandene.

Nettonedbøren er uniform fordelt til det øverste beregningslag over hele modelområdet med 170 mm/år. Da der er indlagt dræn i store dele af modellen, svarer nettonedbøren derfor ikke til grundvandsdannelsen til modellen.

Figur 3-25 viser det hydrauliske potentiale for MODFLOW modellens lag 1 og lag 3.



Figur 3-25: Beregnet potentiale i strømningsmodellens lag 1 (venstre) og lag 3 (højre).

### 3.4.3 Håndtegnede oplande

Der er udarbejdet analytiske håndoptegnede oplande for borerne A, B, C og D svarende til scenarium 2 med en indvinding på 400.000 m<sup>3</sup>/år, hvor der indvindes fra det primære magasin i lag 4.

Formlerne for magasin med gradient og spændt magasin er anvendt i optegningerne af de analytiske oplande (jf. formel 3.1 – 3.3.) /13/.

For boring A er I ved kildepladsen beregnet til 0,0031 og T ved kildepladsen er beregnet til 2,5 E-02 m<sup>2</sup>/s. Her fås stagnationspunkt til 26 m, og oplandsbredden beregnes til 82 m og den asymptotiske beregnes til 165 meter.

For boring B, C og D er I ved kildepladsen er beregnet til 0,0034 og T ved kildepladsen er beregnet til 6.0 E-03 m<sup>2</sup>/s. Her fås stagnationspunkt til 99 m, og oplandsbredden beregnes til 312 m og den asymptotiske beregnes til 623 meter.

Endelig er der udført et arealtjek på alle 4 oplande efter formel 3.4. N er sat til 170 mm/år og Q 400.000 m<sup>3</sup>/år. Herved fås et opland på 2,35 km<sup>2</sup> (jf. figur 3-31).

### 3.4.4 AEM model

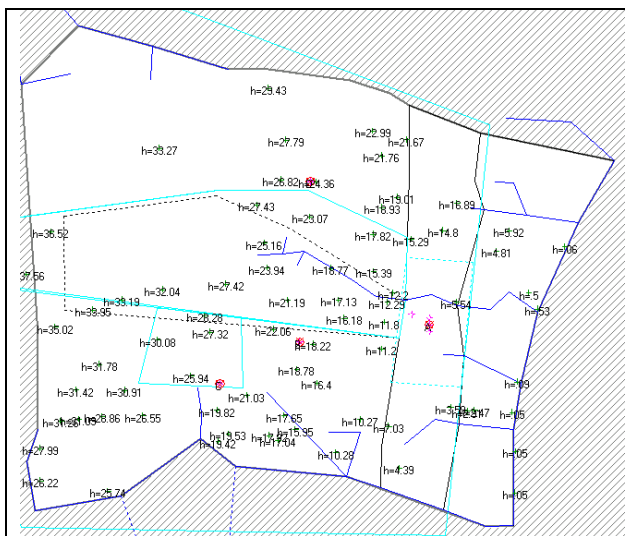
AEM modellen benytter som udgangspunkt samme randbetingelser som MODFLOW modellen. Mod vest er der ingen rand, og herved opstår et naturligt grundvandsskel.

Vandspejlet i vandløbene lå i den initiale kalibrering i en del områder over grundvandsspejlet, og herved lækkede de vand til magasinet. For at undgå lækage til magasinet fra tørre vandløb, blev flere af de øvre mindre vandløbsstrækninger inaktiveret.

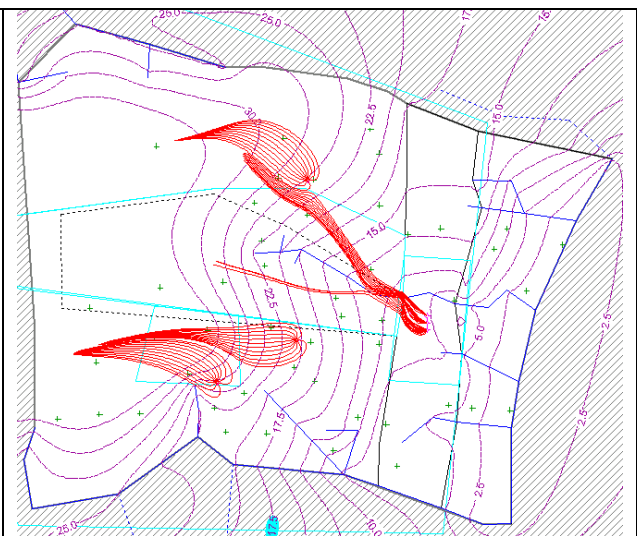
Modellen indeholder ingen sandvinduer. Disse kunne evt. efterfølgende tilføjes som ekstra *re-charge* elementer, hvilket ikke er gjort i nærværende model.

En markant forskel i forhold til MODFLOW-modellen er området med Bryozokalk, hvor den højere hydrauliske ledningsevne bevirker et meget fladt grundvandsspejl. I AEM modellen ses en tendens til en sydlig strømningsretning, hvilket er forskelligt fra MODFLOW modellen. AEM modellen er ikke opstillet med anisotropi, idet denne egenskab ikke eksisterer i VisualAEM. Dette er ikke tilgængeligt i den benyttede software, om end der eksisterer anisotropi i AEM løsninger, eksempelvis 0.

Generelt er AEM modellen svær at kalibrere tilfredsstillende mod pejleobservationerne fra MODFLOW, idet MODFLOW modellen har mange heterogene elementer, som ikke kan modelleres i AEM-modellen.



**Figur 3-26: Opsætning af AEM modellen med potentielemålinger.**



**Figur 3-27: Hydraulisk potentiale og oplande for AEM modellen.**

Figur 3-27 viser beregnet potentiale samt placering af indvindingsboringer med partikelbaner for AEM opsætningen af model D.

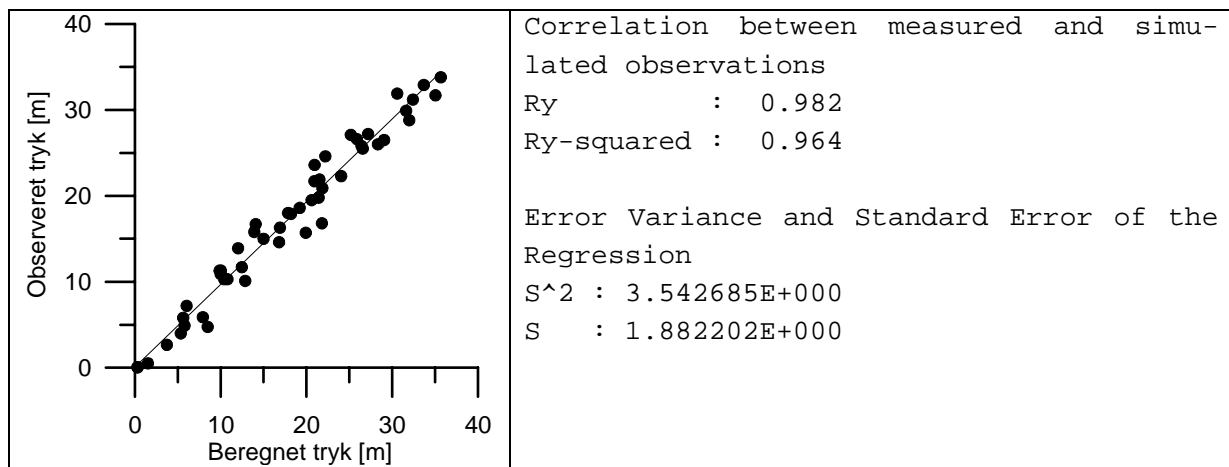
**Tabel 14: Analytiske elementer i AEM modellen.**

Element	Karakteristika
Globalt strømningsfelt	$K = 1.3 \cdot 10^{-4}$ m/s for et magasin på 10 m. Dette svarer til kalken i den vestlige del af modellen.
Lav K Zoner	$K = 1.5 \cdot 10^{-3}$ m/s for bryozokalken i modellens østlige del $K = 8.4 \cdot 10^{-6}$ m/s for kridt mod øst
Grundvandsdannelse	Modellen har en grundvandsdannelse på $2.87 \cdot 10^{-9}$ m/s svarende til 90 mm/år I området med palæocent ler er grundvandsdannelsen

	reduceret til $8 \cdot 10^{-10}$ m/s (25 mm/år).
Vandløb	Der er fuld kontakt mellem vandløb og magasin. Øvre vandløbssegmenter med potentiale større end grundvandsspejlet er inaktive

### 3.4.5 Kalibrering

AEM modellen er kalibreret efter observationer fra MODFLOW modellen. De fleste observationer er placeret i modellens østlige del, mens antallet af observationer i modellens vestlige del er mere sparsomt. Figur 3-28 viser AEM modellens beregnede tryk sammenlignet med MODFLOW modellens. Modellen er generelt velkalibreret mod observationerne og  $r^2$  har en størrelse på 0.96.



Figur 3-28: Kalibreret AEM potentiale sammenholdt med MODFLOW data.

### 3.4.6 Resultater

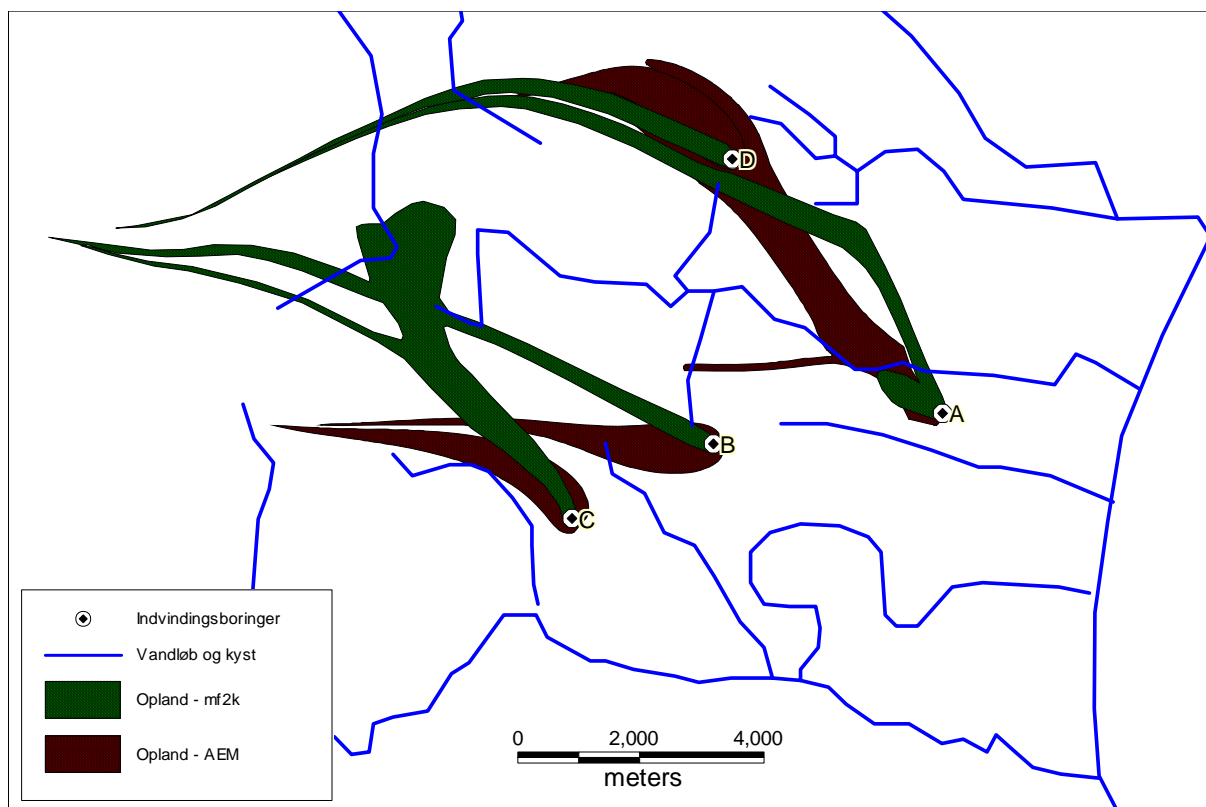
Resultatet af oplandsberegningerne for kalkmodellen er vist i det følgende afsnit.

#### 3.4.6.1 Scenarium 1

Figur 3-29 viser de beregnede indvindingsoplande for scenarium 1. Der ses generelt en stor forskel i oplandene, og årsagen hertil skal dels findes i kalibrering af modellen og dels i forskellen i strømningsbilledet.

Indvindingsboring A er placeret i bryozokalken og er derfor i et medium med meget høj transmissivitet. MODFLOW modellens opland for denne boring har en nordlig strømningsretning nede i kalken, indtil man kommer ind i en zone med lavere transmissivitet, hvorefter oplandet tager en mere vestlig retning. Oplandet er herefter smalt og når næsten randen i vest. For AEM modellen har oplandet for boring A en nordvestlig retning. AEM modellen har ikke det markante knæk i oplandet, hvilket skyldes mindre skift i transmissivitet, og specielt mindre anisotropi. Oplandet her når indvindingsboring D og smyger sig omkring oplandet til denne boring.



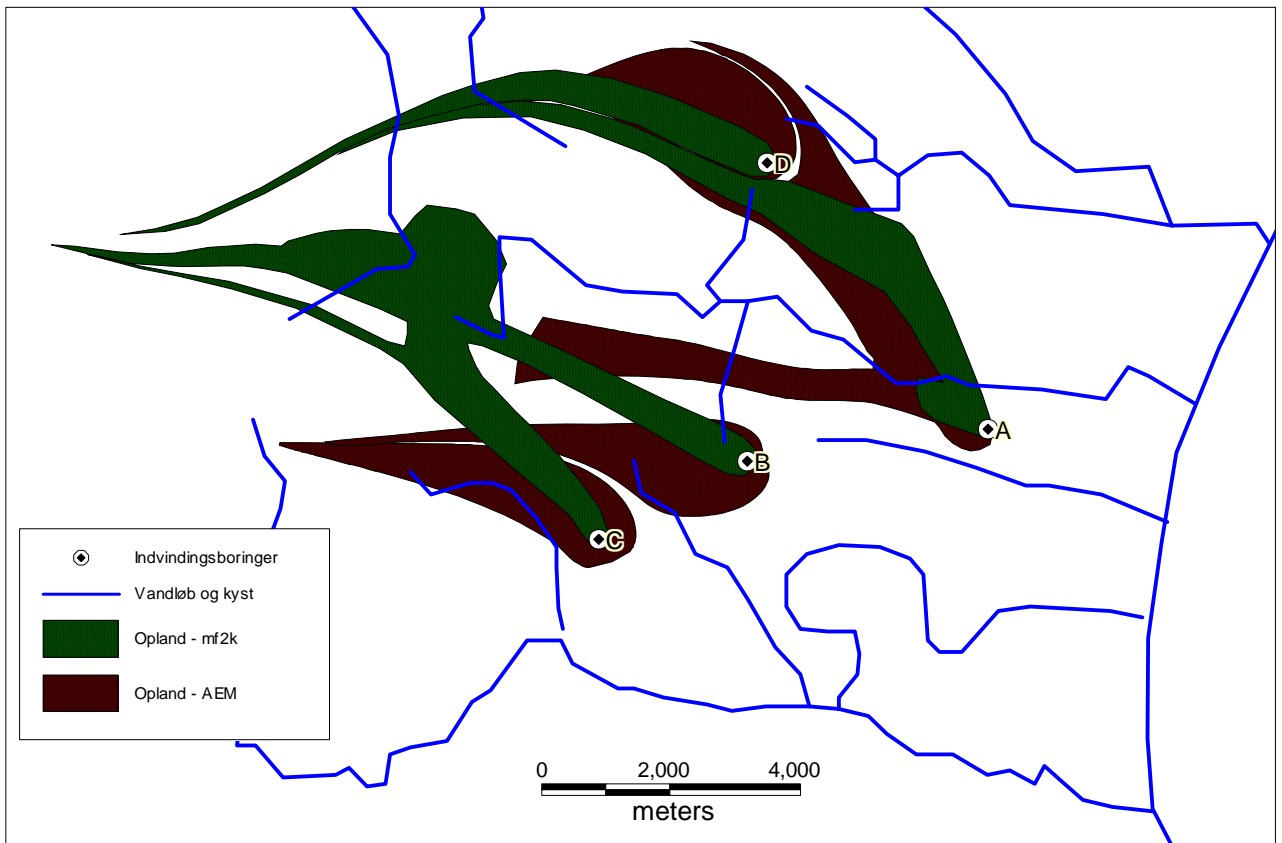


**Figur 3-29: Indvindingsoplande for scenarium 1**

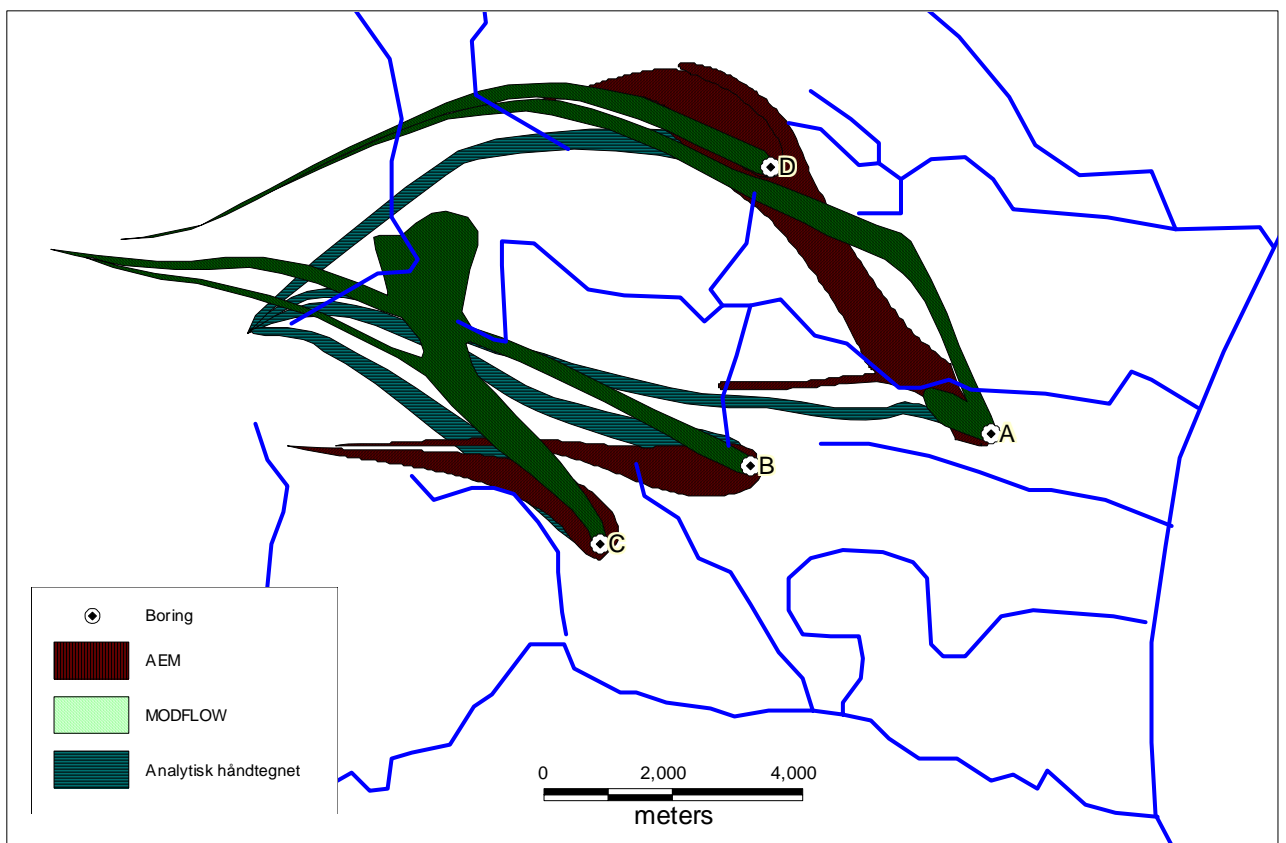
Oplandene til indvindingsboringerne B og C er markant forskellige. AEM modellens oplande for de to boringer har en generel vestlig retning. For MODFLOW modellen ser man, at indvindingsoplandene tager en nordvestlig retning, hvor de krydser hinanden. Dette skyldes, at indvindingsoplandet til boring B ligger i kalken. Og oplandet når ind under det palæocene ler, og bliver herved lækagebettinget. Indvindingsoplandet til boring C når op i et sandvindue, og oplandet når herved op i et større sandområde, som ligger over det palæocene lerlag. Der er herved tale om et kompliceret tredimensionelt strømningsbillede i MODFLOW-modellen, hvilket AEM-modellen ikke kan honorere pga. forudsætningerne for en todimensional AEM model. Derfor ses der denne markante forskel i de modellerede oplande med de to forskellige metoder.

Indvindingsboring D er placeret således, at der ikke er heterogene vinduer i oplandet, dvs. kalken udgør et relativt tyndt spændt magasin overlejret af moræneler. Oplandet til indvindingsboring D for MODFLOW modellen er smalt og har en vestlig retning med et kurvet forløb. For AEM modellen er oplandet her bredere og når ikke samme længde. Bredden skyldes at den kalibrerede AEM model har en lavere hydraulisk ledningsevne lokalt ved indvindingsboringen i forhold til MODFLOW modellen, hvilket derved giver en større sænkning og et bredere opland. MODFLOW modellens lange opland skyldes at partikler i MODPATH har en tendens til at ligge langs bunden af modellen, hvis bunden udgør en no-flow rand. Generelt er der rimelig overensstemmelse mellem AEM og MODFLOW oplandene for boring D.

Scenarium 2 viser generelt det samme som scenarium 1, med bredere oplande på grund af den større indvinding. Figur 3-30 viser disse oplande. Bemærk at oplandene omkring AEM modellens boring A påvirkes af dræning til vandløbet, hvilket ses på, at oplandet deles i to. Dette blev også observeret i nogle af MODFLOW modellens indledende oplandsberegninger, men blev fjernet ved en senere fintuning af startbetingelser for partiklerne til MODPATH.



Figur 3-30: Indvindingsoplande for scenarium 2, model D

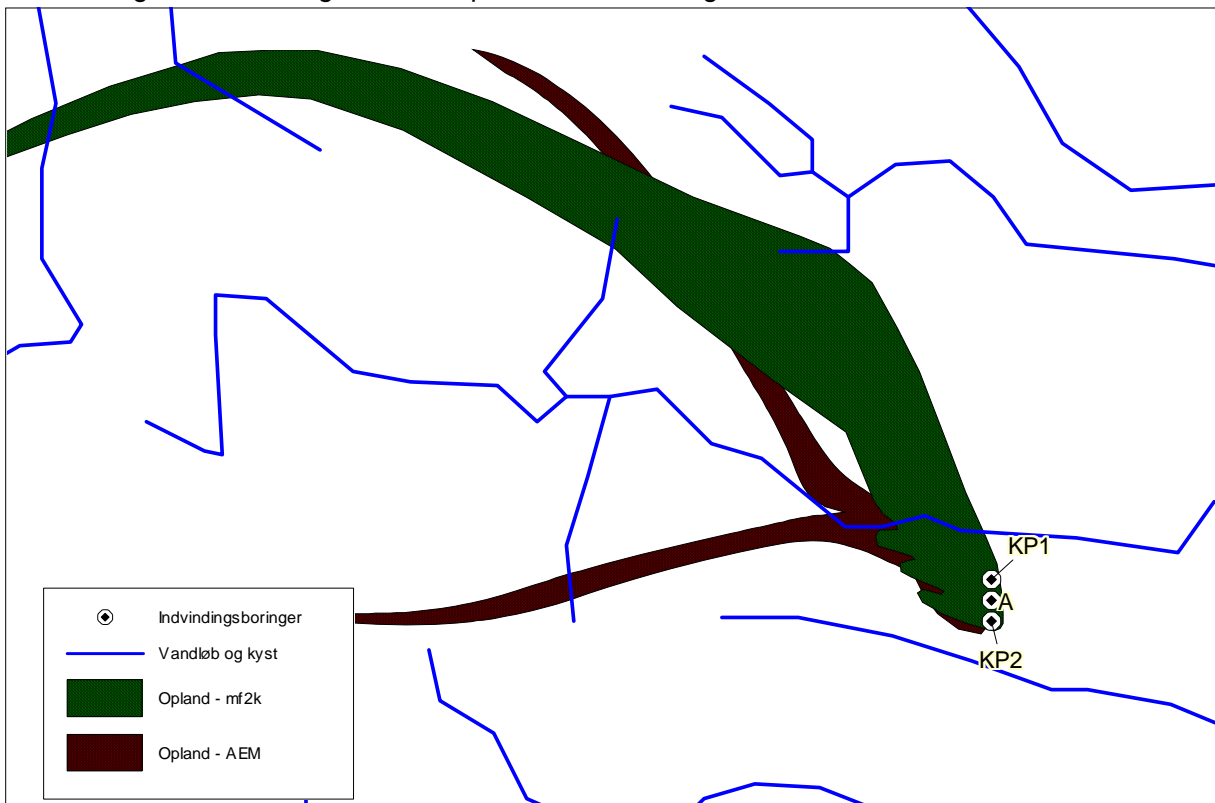


Figur 3-31: Håndtegnede oplande sammenholdt med oplande fra AEM og MODFLOW-modellen.

For de håndtegnede oplande ses en dårlig overensstemmelse imellem disse og de modelbereg- nede opland især for boring A, C og D. Dette skyldes, at der i den numeriske model er indlagt anisotropi, som ikke kan reproduceres ved håndtegningsmetoden. For boring B ses det, at ret- ningen på det håndtegnede opland nogenlunde følger de modelberegnete oplande, og således er beliggende imellem oplandet beregnet for henholdsvis AEM og MODFLOW-oplandet. Det be- mærkes, at de håndtegnede oplande strømmer op til grundvandsskellet for alle 4 boringer.

### 3.4.6.2 Scenarium 3+4 – kildeplads

Figur 3-32 viser oplandet til en kildeplads. Der er enighed om bredden i oplandet, men retningen er ikke så godt bestemt og svarer til oplandet i de to foregående scenarier.

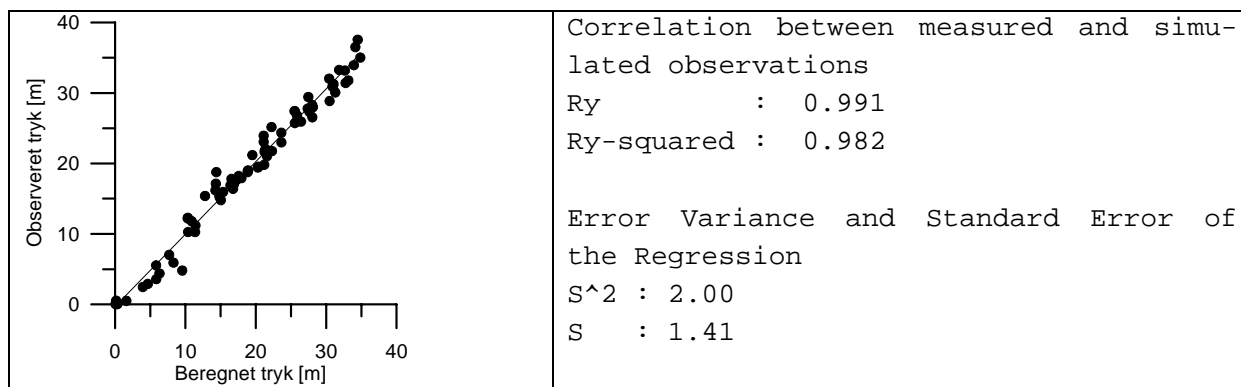


Figur 3-32: Indvindingsoplande for scenarium 3, model D – kildeplads.

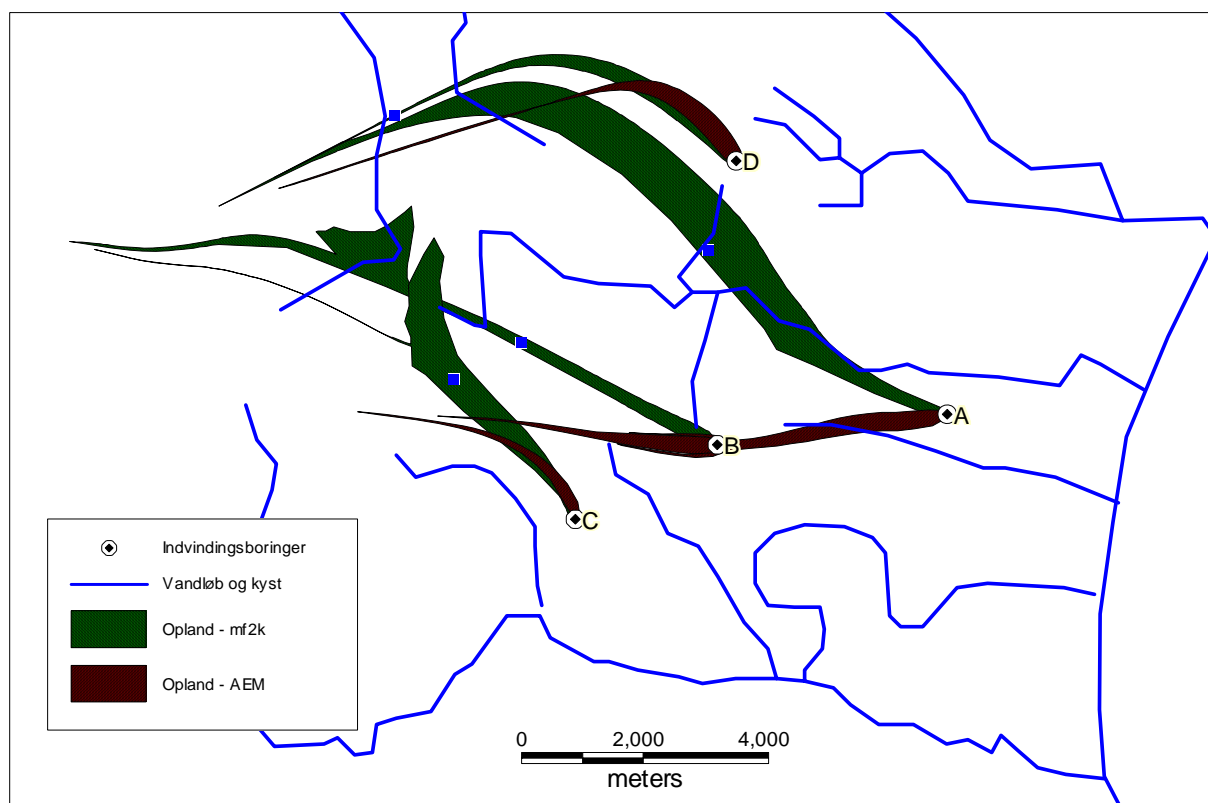
### 3.4.6.3 Anisotropi

Der er afslutningsvis udført kalibrering af MODFLOW-modellen, hvor anisotropien fra den høj- permeable del af kalkmagasinet er fjernet. Ud fra denne recalibrering er der lavet et nyt udtræk af observationsboringer fra MODFLOW, som er anvendt til at recalibrere AEM-modellen.

Figur 3-33 viser potentialet i den kalibrerede AEM model sammenholdt med observationer fra MODFLOW modellen. AEM-modellen kalibreres til bedre fit uden anisotropi end den oprindelige model med anisotropi, se Figur 3-28, side 54.



Figur 3-33: Kalibreringsfit og -statistik for scenarium 1, model D – uden anisotropi.



Figur 3-34: Indvindingsoplande for scenarium 1, model D – uden anisotropi.

Figur 3-34 viser indvindingsoplande til borerne for scenarium 1, model D – uden anisotropi.

Oplandet til indvindingsboring A har i forhold til modellen med anisotropi taget en mere vestlig retning for begge oplande. MODFLOW modellen er ikke i så høj grad påvirket af den store transmissivitetskontrast mellem Danien og Bryozokalken, og oplandet følger i stor grad vandløbet i vestlig retning. Samme opland beregnet med AEM modellen har en mere sydvestlig retning, og oplandet her når indvindingsboring B. Der er god overensstemmelse med oplandsformen og størrelsen, men retningen er forskellig, og dette kan skyldes forskelle i potentiale og gradientforhold, og kan have en baggrund i både den komplekse hydrostratigrafiske model i MODFLOW modellen, samt forskelle i måden kontakten til vandløb er sat op i de to modeller.

Oplandene til indvindingsboringerne B og C viser samme opland som modellen med anisotropi. AEM modellen har en vestlig retning, mens MODFLOW modellens oplande når forskellige hydrostratigrafiske enheder, og oplandene krydser. Den kalibrerede AEM model har en hydraulisk ledningsevne nær den originale MODFLOW model, og dette giver oplande med initialt samme bredde.

## 4 Diskussion og konklusion

Traditionelt har man inden for forvaltning af vandressourcer i mange år anvendt enten en analytisk tilgang eller numeriske strømningssmodeller til at beregne og fastlægge indvindings- og grundvandsdannende oplande. I dette dokument er der foretaget en vurdering af Den Analytiske Element Metode (AEM) som en mulig supplerende metode.

I nærværende undersøgelse er der belyst oplande beregnet både med todimensionale AEM modeller og tredimensionale numeriske strømningssmodeller i MODFLOW, og påvist at AEM oplandene i flere tilfælde kan reproducere oplandene i det omfang, strømningen ikke er for kompliceret i tre dimensioner. Derfor kan man godt anbefale AEM modeller i områder, hvor hydrostratigrafien tillader, at man kan beskrive strømningen i to dimensioner (overholdelse af Dupuit-Forchheimer antagelse omkring horisontal strømning).

For den simple Hedeslettemodel er der udført oplandsberegninger vha. partikelbaner i 2 boringer, hvor den ene boring er placeret langt fra vandløb, og den anden boring er placeret tæt på vandløb. For begge boringer er der indvundet i forskellige filterniveauer.

For boringer langt fra vandløbet ses der en fin overensstemmelse i oplandet imellem AEM og strømningssmodellen, hvor oplandene både i form og udbredelse er rimelig ens.

Anderledes ser det ud for boringen nær vandløbet. Her ses en markant forskel i oplandenes form og udbredelse. Dette skyldes, at lækageforholdene og vandløbskonduktanserne ikke behandles ens i de 2 metoder. Desuden har strømningssmodellen fire beregningslag og vandløbet har kontakt til det øverste modellag, mens AEM modellen antager vandløbskontakt i hele magasinet. De opstillede AEM modeller antager god kontakt mellem vandløb og magasin, mens de numeriske strømningssmodeller har en reduceret vandløbskontakt.

Betydningen af, at den numeriske metode kan benytte flere modellag og således håndtere indvindinger i forskellige dybder ses i scenarierne udført ved boringen ved vandløbet, hvor partikelbanekørsler udført især for lag 3 og 4 viser, at en del af partikelbanerne strømmer horisontalt langt under vandløbet og videre op på den anden side af vandløbet. Denne detalje kan kun beregnes i tredimensionale strømningssmodeller. En væsentlig begrænsning i AEM modellen er således beskrivelsen af udveksling mellem grundvand og vandløb.

Modellen for den begravede dal viser en overraskende fin overensstemmelse i form og udbredelse mellem de beregnede AEM- og de numerisk beregnede oplande for begge boringer. Dette gælder især for scenarium 1 og 2, hvor der indvindes fra det dybe lag i den begravede dal.

I begge modeller ses toppunkter i grundvandspotentialet både nord og syd for den begravede dal, samtidig med et nord-syd-gående grundvandsskel er nogenlunde ens beliggende for begge modeller. Toppunkterne i grundvandspotentialet og det nord-syd-gående grundvandsskel er meget styrende for oplandenes udbredelse, og deres ens beliggenhed i de to modeller er antagelig medvirkende til, at der genereres meget ensartede oplande ved de to metoder.

Indvindes der i den øvre del af den begravede dal (scenarium 3 og 4), har AEM modellen svært ved at genskabe oplandene beregnet i den numeriske model. Oplandene bliver noget længere i AEM end i strømningsmodellen. Dette skyldes, at AEM modellen er opstillet for et potentialebillede, hvor den begravede dal er aktiv. Derfor var det relevant at opstille en alternativ AEM-model, hvor den begravede dal blev gjort inaktiv. Gennem denne øvelse lykkedes det at tilnærme de beregnede oplande fra strømningsmodellen og således gøre oplandene i AEM kortere.

Ud fra ovenstående analyse må det konkluderes, at når der tale om begravede dale med en heterogen tredimensional hydrostratigrafisk opbygning vil de numeriske strømningsmodeller være at foretrække i forbindelse med oplandsberegninger.

Endelig er der udarbejdet et kildepladsscenario, hvor der indvindes fra 3 borer. Her ses det, at både AEM modellen og strømningsmodellen simulerer det samlede kildepladsopland rimelig ens. Dog ses det igen at "halerne" i AEM-oplandene er noget længere sammenlignet med strømningsmodellens oplande.

Modellen for randmoræneområdet viser, at AEM- og de numerisk beregnede oplande er næsten sammenfaldende for begge borer. Oplandene til boring A forløber mod NV, og oplandet til boring B forløber mod SV mod toppunktet i grundvandspotentiallet. Begge oplande er kraftigt styret af et toppunkt i grundvandspejlet, som er beliggende vest for de 2 indvindinger.

Der ses forskelle i oplandenes form og udbredelse, når den numeriske metode indvinder i forskellige dybdeintervaller. Oplandet bliver mindre i areal ved boring A, når der indvindes tættere på terræn, hvilket AEM ikke kan opløse, idet metoden antager indvinding i hele magasinet dybde.

Den forholdsvis enkle hydrostratigrafi i randmorænemodellen bryder ikke antagelsen om horisontal strømning i magasinet og er antageligt årsagen til, at de 2 metoder simulerer resultaterne af oplandene rimelig ensartet.

I kalkmodellen indvindes der fra 4 forskellige borer i kalkmagasinet, A, B, C og D. De 4 borer overlejres af forskellige magasin og dæklag, hvilket bidrager til en kompleks hydrostratigrafisk model opbygning.

Boring A og D overlejres af henholdsvis sand og ler, hvorimod boring B og C overlejres af paleocænt lavpermeabelt ler samt moræneler med geologiske vinduer.

I to borer (A og D), som kun er overlejret af henholdsvis sand eller ler, ses det, at AEM-oplandene nogenlunde følger de numeriske oplande i form og udbredelse. Dog ses den indlagte anisotropi at slå igennem i det numerisk beregnede opland for, især boring A, hvor oplandet fra kildepladsen forløber i nordlig retning men hvor AEM oplandet forløber mod NV.

De strømningsmodelberegnete oplande for borerne A og D når for begge borer næsten helt til grundvandsskellet mod vest, hvor AEM-oplandene er halvt så lange.

For borerne B og C, hvor der ses en mere kompleks hydrostratigrafisk opbygning, er det svært at finde ligheder imellem AEM- og de numeriske oplande. AEM modellens oplande har en vestlig retning, mens strømningsmodellens oplande har en nordvestlig retning, hvor de krydser hinanden. Dette skyldes, at indvindingsoplandet til boring B, beliggende i kalken (lag 3), strømmer ind

under det palæocene lavpermeable ler, og oplandet bliver herved lækagebetinget, da vandet ikke uhindret kan trænge op gennem laget (lag 2). Indvindingsoplandet til boring C, også beliggende i kalken, når op i et sandvindue (lag 2), hvor vandet og oplandet strømmer op i et større sandområde (lag 1), som ligger over det palæocene lerlag.

Der ses her, for begge boringer, et kompliceret tredimensionelt heterogent strømningsbillede i strømningsmodellen, som AEM-modellen ikke kan honorere pga. forudsætningerne omkring uniform horisontal strømning. Derfor ses der denne markante forskel i de modellerede oplande med de to forskellige metoder.

#### 4.1.1 AEM modeller som værktøj

AEM modeller har i mange år været anvendt i udlandet til samme formål, og er som værktøj under en stor udvikling. De første prototyper af AEM modeller, som benytter transiente forhold samt strømning i adskilte hydrostratigrafiske enheder, er udviklet. På nuværende tidspunkt mangler der til disse modeller en let anvendelig brugerflade, og derfor er der kun benyttet AEM som todimensionale modeller.

AEM oplande er ikke blot konkurrencedygtig med væsentlig bedre værktøjer end de håndtegnede oplande, hvor tiden benyttet på udarbejdelse af potentialekort, beregning af analytiske oplandsafgrænsninger (stagnationspunkt, oplandsbredde) samt digitalisering af oplande nemt udgør samme tidsforbrug. Der er dog begrænsninger i AEM ved stor heterogenitet, 3D strømning osv., men selv under disse forhold giver AEM nok en bedre indledende analyse end analytisk håndtegnede oplande. Opstilling og kalibrering af en tredimensional-strømningsmodel er i en helt anden klasse og tidsmæssigt noget større, og FDM eller FEM giver samtidig bedre mulighed for at beskrive randbetingelser, vandløbsudveksling, dynamik og 3D forhold end AEM. Man bør derfor ved opstilling af en AEM model vurdere, om antagelserne kan begrundes. Hvis man ikke har det rette datagrundlag til fx en FDM model (eksempelvis hydrostratigrafisk model, formodning / kendskab til strømning i tre dimensioner), bør man konkret vurdere, om en AEM model kan anvendes til screening i den konkrete sag.

## 4.2 Konklusioner

AEM modeller er et godt screeningsværktøj i planlægningsfasen til en ny kildeplads og til planlægning af den videre kortlægning i fase 2. Man får her et godt bud på det fremtidige indvindingsopland og et rimeligt præcist bud på, hvor kortlægningsressourcerne skal anvendes i forbindelse med den videre kortlægning hen imod indsatsplanlægningen.

AEM metoden er et velegnet redskab til beregning af indvindingsoplande i områder, hvor der ikke eksisterer en strømningsmodel, og hvor den geologiske kompleksitet er begrænset. Metoden har sine begrænsninger, idet AEM modeller har sammenfaldende **indvindingsoplande og grundvandsdannende opland i enkeltlagsmodellerne**. For at få adskilt grundvandsdannende områder fra indvindingsoplande er det påkrævet, at man benytter AEM modeller i flere lag eller de traditionelle numeriske strømningsmodeller i tre dimensioner.



AEM modeller kan med rette anvendes i sagsbehandlingen gennem overslagsberegninger og lokalisering af indvindingsoplande i områder med sparsom kendskab til hydrogeologien. Modellerne skal ikke betragtes som en erstatning for tredimensionelle strømningsmodeller, men et supplement til de redskaber, man har til rådighed.

Undersøgelsen her har vist, at AEM modeller kan anvendes i områder med simpel hydrostratigrafi, som det er tilfældet for hedeslettemodellen. Dog er der problemer ved indvindinger tæt på vandløb. Metoden anbefales ikke i områder med heterogene strømningsforhold, som kan være et resultat af en kompliceret hydrostratigrafi (eksempelvis heterogene begravede dale). Dette ses i modellen med det komplekse kalkmagasin med overlappende dæklag og magasinlag.

## 5 Reference

- /1/ Iversen C.H, Lauritsen, L.U., Nyholm og Kürstein, J., 2008. Geo-Vejledning nr. 2 Udpegning af indvindings- og grundvandsdannende oplande GEUS.
- /2/ Miljøministeriet (2009). Administrationsgrundlag for Miljøministeriets afgiftsfinansierede grundvandskortlægning, 75 pp.
- /3/ Hunt, R.J. (2006) Ground Water Modeling Applications Using the Analytic Element Method. Ground Water (44) 5-15.
- /4/ Kraemer, S.R. (2007) Analytic Element Ground Water Modeling as a Research Program (1980 to 2006). Ground Water (45) 402-408.
- /5/ Jenkins, C.T. (1970): Computation of rate and volume of stream depletion by wells. U.S. Department of the Interior.
- /6/ Hantush, M.S. (1965): Wells near stream with semi pervious beds. Jour. Geophys. Research, Vol. 70, No. 12, p. 2829-2838.
- /7/ Stang, O. (1980): Stream depletion by wells near a superficial, rectilinear stream. Proceedings fra Nordisk Hydrologisk Konference i Vemdalen 10-16 august 1980. UNGI Rapport Nr. 53, 359-369
- /8/ Butler, J.J., X. Zhan & V. A. Zlotnik (2007): Pumping-induced drawdown and stream depletion in leaky aquifer system. Groundwater, 45(2), pp 178-186
- /9/ Miljøstyrelsen, (1995): Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen Nr.8 1995 "metoder til udpegning af indvindingsoplande".
- /10/ Bakker, M. (2007): Simulating groundwater flow to surface water features with leaky beds using analytic elements. Advances in Water Resources 30 (2007) 399–407.
- /11/ Bakker, M. & E.I. Anderson (2003): Steady flow to a well near a stream with a leaky bed. Vol 41 (6) GROUND WATER. Nov- Dec. 2003 – 833-840.
- /12/ GeoGIS 2000, (2003): GeoGIS 2000 -Påvirkningssystemtet. Notat udarbejdet af Rambøll.
- /13/ [www.kmd.dk](http://www.kmd.dk)
- /14/ [http://www.niras.dk/upload/best\\_folder.pdf](http://www.niras.dk/upload/best_folder.pdf)
- /15/ Miljøstyrelsen (2007): Boringsnære beskyttelsesområder BNBO. Vejledning fra Miljøstyrelsen Nr. 2 2007. Miljøstyrelsen
- /16/ Miljøstyrelsen (2000): Zonering. Detalkortlægning af arealer til beskyttelse af grundvandsressourcen. Vejledning fra Miljøstyrelsen Nr. 7 2000
- /17/ Randall J. Hunt (2006): Ground Water Modeling Applications Using the Analytic Element Method. Vol. 44, No. 1—GROUND WATER—January–February 2006 (pages 5–15)
- /18/ <http://www.epa.gov/ada/csamos/models/whpa.html>
- /19/ T. Neil Blandford & Yu-Shu Wu (1993): Addendum to the WHPA code Version 2.0. Users Guide. Implementation of Hydraulic Head Computation and Display into the WHPA code. U.S. Environmental Protection Agency.
- /20/ A. Ceric, H. Haitjema (2005): On Using Simple Time-of-Travel Capture Zone Delineation Methods GROUND WATER 43, no. 3: 408–412

- /21/ Haitjema, H.M., V.A. Kelson & K.H. Luther (2000): Analytical Element Modeling og Groundwater Flow and High Performance Computing. Environmental Research Brief. EPA/600/s-00/001. EPA
- /22/ Ahern, Julie Anne. (2005): Ground-water capture zone delineation: Method comparison in synthetic case studies and a field example on Fort Wainwright. Thesis. University of Alaska Fairbanks.
- /23/ Kraemer, S.R., H.M. Haitjema & O.D.L. Strack (1994): Capture zone modelling using the WhAEM (wellhead analytical element model), In: Analytical Element Modeling of the Groundwater Flow. Proceedings of the international Conference, school of Public and Environmental Affairs, Indiana, 55-59.
- /24/ <http://www.epa.gov/athens/software/whaem/>
- /25/ Haitjema, H., Wittman, J., Kelson, V., and Bauch, N. (1994). WhAEM: program documentation for the wellhead analytic element model. Report EPA/600/R-94/210, U.S. Environmental Protection Agency.
- /26/ McDonald, M. and Harbaugh, A. (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground-water model. U.S. Geological Survey.
- /27/ DHI, 2004. MIKE SHE: An Integrated Hydrological Modeling System. Danish Hydraulic Institute, Hørsholm, Denmark.
- /28/ Kraemer, S., Haitjema, H., and Kelson, V. (2005). Working with WhAEM2000: capture zone delineation for a city wellfeld in a valleyfill glacial outwash aquifer supporting wellhead protection. Report EPA/600/R-05/151, US Environmental Protection Agency.
- /29/ Strack, O., Anderson, E., Bakker, M., Panda, W., Pennings, R., and Steward, D. (1994). CZAEM user's guide: Modeling capture zones of ground-water wells using analytic elements. EPA Project Report EPA/600/R-94/174, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. <http://www.epa.gov/ada/csmos/models/czaem.html>.
- /30/ Strack, O. (1989). Groundwater Mechanics. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- /31/ Haitjema, H. (1995). Analytic Element Modeling of Groundwater Flow. Academic Press, San Diego.
- /32/ Raymond, H.A. m.fl. (2006): Using Analytic Element Models to Delineate Drinking Water Source Protection Areas. Vol. 44, No. 1—GROUND WATER—January–February 2006 (pages 16–23)
- /33/ Haitjema, H. (1995). GFLOW1 Verifications
- /34/ Dupuit, J.(1963). Etudes Theoriques et Pratiques sur le Mouvement des Eaux dans les Canaux Decouverts et a Travers les Terrains Permeables, 2nd ed. unknown, Dunod, Paris.
- /35/ James Craigh & S. Matott (2005): Visual Bluebird 2.0 Users Manual. <http://www.groundwater.buffalo.edu/software/VBB/downloads/Visual%20Bluebird%20Manual.pdf>
- /36/ <http://www.civil.uwaterloo.ca/jrcraig/VisualAEM/Main.html>
- /37/ Matott, L.S., (2005): OSTRICH, An optimization software tool, documentation and user's guide, Version 1.6: State University of New York at Buffalo, 114 p. <http://www.groundwater.buffalo.edu/software/Ostrich/OstrichMain.html>.
- /38/ Haitjema, H.M. (2007): Modeling flow in the vertical plane with GFLOW.
- /39/ Steward, D. R., and W. Jin, Drawdown and capture zone topology for nonvertical wells, Water Resour. Res., 39(8), 1219, doi:10.1029/2002WR001709, 2003.

/40/ T.N. Olsthoorn (1999): A comparative review of analytic and finite difference models used at the Amsterdam Water Supply. Journal of Hydrology 226 (1999) 139–143.

/41/ <http://www.groundwater.buffalo.edu/software/ArcAEM/ArcAEMMain.html>

/42/ [http://www.dmu.dk/Udgivelser/Kort\\_og\\_Geodata/AIS/](http://www.dmu.dk/Udgivelser/Kort_og_Geodata/AIS/)

Fitts, C. R. (2004): Discrete Analytic Domains: a New AEM Formulation for Modeling Anisotropy and Heterogeneity. Geosciences Department. University of Southern Maine. In U.S. EPA/NGWA FRACTURED ROCK CONFERENCE: STATE OF THE SCIENCE AND MEASURING SUCCESS IN REMEDIATION, pages 867{879, Portland, Maine. NGWA.





9 788778 712561

## TEST AF ANALYTISKE ELEMENT MODELLER (AEM) SAMMENLIGNET MED DEN NUMERISKE METODE TIL UDPEGNING AF INDVINDINGSOPLANDE

(Delprojekt 1 om oplande)

Som støtte for den nationale grundvandskortlægning udarbejder GEUS i samarbejde med By- og Landskabsstyrelsen og miljøcentrene faglige vejledninger i forskellige aspekter inden for grundvandskortlægningen.

I 2008 udgav GEUS Geovejledning 2 *Indvindings- og grundvandsdannende oplande*. I forlængelse af denne udgivelse blev der igangsat nogle delprojekter, som har til formål at udbygge Geovejledning 2 i en revideret udgave. Den reviderede udgave af Geovejledningen om oplande inkluderer et afsnit om brugen af Analytiske Element Modeller – AEM, til bestemmelse af oplande.

Nærværende rapport beskriver de undersøgelser, som er foretaget ud fra fire semisyntetiske modeller, der hver dækker en typisk dansk geologitype: en hedeslette, et østdansk moræne-landskab, en begravet dal samt et kalkområde. For alle fire modeller er der beregnet indvindingsoplande med AEM og med den numeriske metode. Der er foretaget en komparativ analyse af indvindingsoplande beregnet ud fra de to metoder.

Formålet med undersøgelsen har været at afdække, om AEM kan anvendes i forbindelse med grundvandskortlægningen til bestemmelse af indvindingsoplande, idet metoden ligger mellem den analytiske løsning og de traditionelle numeriske grundvandsmodeller.