

Odense Vandselskab, Nørre Søby Kildeplads

Partikelbane beregninger af boringsnære
beskyttelsesområder

Lars Trolborg



Odense Vandselskab, Nørre Søby Kildeplads

Partikelbane beregninger af boringsnære
beskyttelsesområder

Lars Trolborg

Indholdsfortegnelse

1.	Introduktion	3
2.	Beregningsgrundlag – gennemgang af modellen	4
3.	Risiko analyse og scenario beskrivelser	9
4.	Partikelbane beregninger	11
5.	Konklusion	20
6.	Referencer	22

1. Introduktion

Opgaven, som GEUS skulle bistå Odense Vandselskab (OV) med, omfattede gennemførelse af partikelbaneberegninger af boringsnære beskyttelsesområder på Odense Vandselskabs fremtidige kildeplads ved Nr. Søby. Formålet med modelberegningerne var at visualisere betydningen af transporttider og modelusikkerheder i forbindelse med afgrænsning af boringsnære beskyttelsesområder. Beregningerne gennemførtes på et udsnit af Nr. Søby-modellen, der er opstillet og kalibreret af DHI for Fyns Amt.

På et første projektmøde blev det aftalt, at modelberegningerne af de boringsnære beskyttelsesområder (BNBO) ved Nr. Søby baseres på en detailmodel af det kildepladsnære område. Som detailmodel vælges et udsnit af Nr. Søby modellen, hvor diskretiseringen øges (uden at opdatere geologien) med henblik på at kunne modellere boringsnære forhold, så cellestørrelsen i modellen så vidt muligt bliver i størrelsesordenen 10 til 25 meter.

Placeringen af modelranden fastlægges på basis af beregninger af indvindingsoplandet og i samråd med OV. Det er vigtigt, at der fastlægges en modelrand, der minimerer randeffekten i forbindelse med beregningerne af de boringsnære beskyttelsesområder. Randbetingelserne gives af den stationære udgave af Nr. Søby-modellen.

Beregningerne af BNBO gennemføres for transporttider på $\frac{1}{2}$ år, 1 år, 2 år og 3 år, hvor transporttiden forstås som tiden fra partiklerne slippes løs i modellen til de fanges i indvindingsboringerne. OV skulle levere koordinater på de 7 fremtidige indvindingsboringer samt oplysninger om filterplaceringer og indvindingsmængder.

2. Beregningsgrundlag – gennemgang af modellen

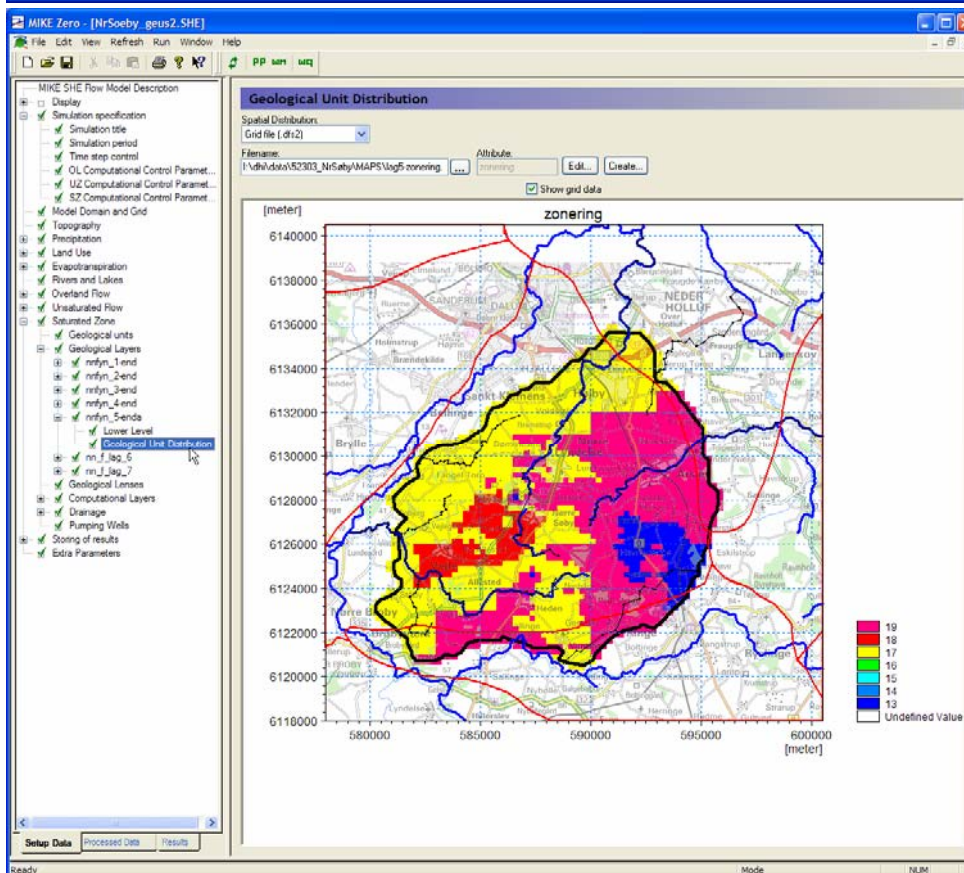
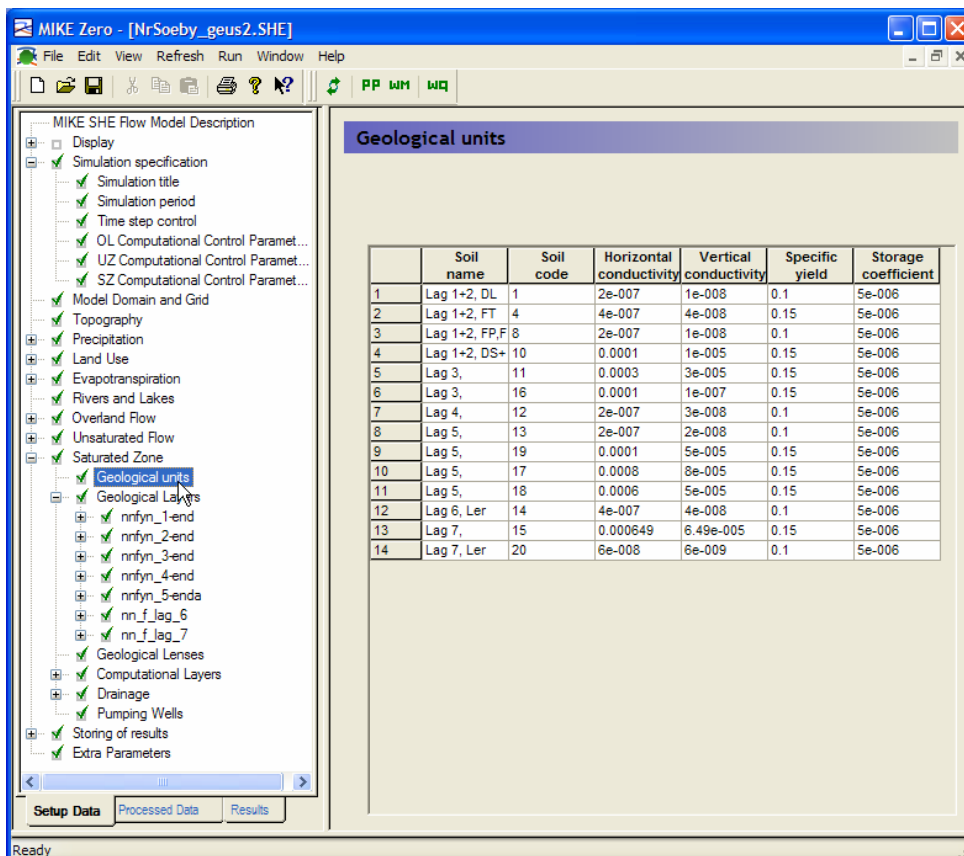
Modellen var blevet opstillet af DHI for Fyns Amt i 2003. Projektræsultaterne skulle anvendes af Fyns Amt i forbindelse med udarbejdelse af indsatsplan for Nr. Søby indsatsområde. Indsatsområdet er beliggende syd for Odense centralt på Fyn. Formålet med projektet var, at etablere en matematisk model, som (ifølge DHI 2004) skulle anvendes til:

- Beregning af grundvandsstrømme og vandbalancer for området.
- Detaljeret kortlægning af indvindings- og grundvandsdannende områder til de eksisterende kildepladser og til alternative kildepladser i indsatsområdet.
- Beregning af transporttiden fra de grundvandsdannende områder til vandværkernes indvindingsboringer.
- Bestemmelse af den arealdistribuerede grundvandsdannelse og infiltrationsområder samt til en vurdering af vandløbspåvirkningen som følge af grundvandsindvindingen.

Modellen var opstillet i Mike SHE og blev ifølge rapporten opbygget, kalibreret og valideret i overensstemmelse med retningslinierne givet i grundvandsståbien (Henriksen et al. 2001). Modellen er i rapporten (DHI 2004) vurderet at producere realistiske og konsistente resultater, og modellen har vist sig i stand til at reproducere målte grundvandspotentialer indenfor et fastlagt nøjagtighedsmål og vurderes at kunne simulere målte potentialer med en middelfejl på 1.5 meter. Modellen vurderes ligeledes i rapporten velegnet til beregning af grundvandsdannende områder samt indvindingsoplande.

Rapporten beskriver således en model som umiddelbart ville kunne anvendes til beregning af bl.a. indvindingsoplande, og som lever op til de generelle modelkrav som anført i grundvandsståbien (Henriksen et al. 2001). I det efterfølgende vil væsentlige model karakteristika blive gennemgået i punktform. Gennemgangen af modellen skal ikke ses som et egentligt model review. Formålet med gennemgangen er at vurdere eventuelle svagheder eller risikofaktorer ved anvendelse af modellen til beregning af indvindingsoplande for udvalgte boringer ved Nørre Søby kildeplads.

Modellen er opstillet med fokus på et område lige nord for de udvalgte boringer med udgangspunkt i den eksisterende DK-model Fyn (Henriksen 1997). Indenfor fokus området er den geologiske model detaljeret således at den eksisterende model struktur med 7 hydrostratigrafiske lag er bevaret, heraf tre vandførende (alle kvartære), den prækvartær overfladen udgør bunden af modellen. Inden for den eksisterende struktur er arbejdet lagt i at få en mere detaljeret topografisk beskrivelse af de enkelte lag (over- såvel som under-side). Udenfor fokus området er der kun sket en begrænset tilretning. Model er der endeligt blevet udvidet med en arealmæssig underopdeling af de enkelte hydrostratigrafiske lag i op til 4 zoner, således at modellen kommer til at indeholde 7 lag og i alt 14 forskellige hydrogeologiske enheder til beskrivelse af den kvartære lagpakke, se Figur 7.



Figur 1 Hydrologiske enheder (øverst) og zonering (nederst)

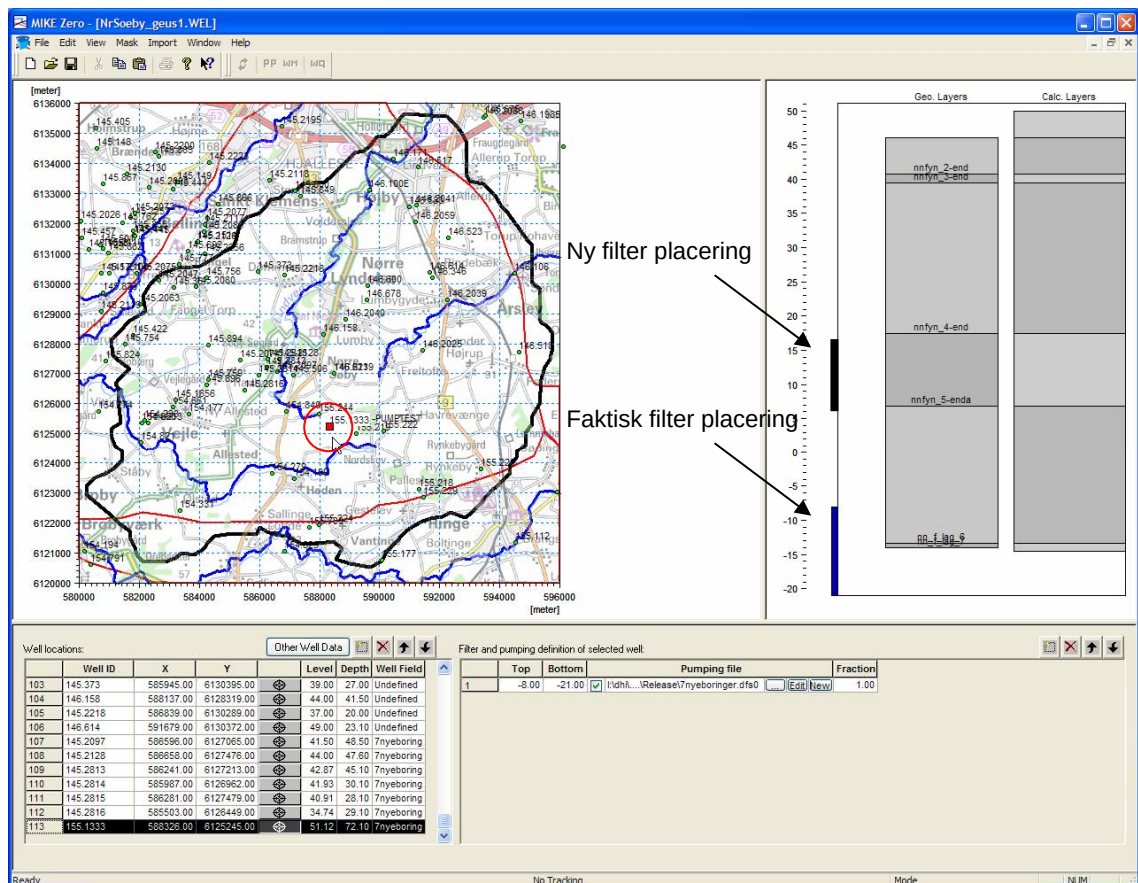
Det er umiddelbart svært at vurdere validiteten af zoneafgrænsningen, og der er da heller ikke umiddelbare geologiske forhold, som taler for at det skulle være nødvendigt at underopdele de enkelte lag. Ud over zoneafgrænsningerne varierer de enkelte hydrauliske parametre i anisotropi, hvormed det samlede antal frie parametre for magasin egenskaberne kan opgøres til 28. Til sammenligning har DK-model Fyn (som dækker dette område og resten af Fyn) 3 frie parametre for samme lagfølge og ingen zoner i de enkelte geologiske lag. Selvom mange frie parametre overordnet set øger modellens evne til at simulere kalibreringsmål (i dette tilfælde 43 tidsserier af trykniveauer), så er det ofte fordi man med mange parametre bedre kan kompensere for evt. strukturelle fejl i modellerne. Isoleret set vurderes denne hydrogeologiske model som noget over-parametriseret. De mest åbenlyse negative konsekvenser af den hydrogeologiske model er:

- Mindsket tillid til kalibreringsresultatet og derved til parameter usikkerheds intervallet
- Forringet overblik angående hvorledes de geologiske strukturer påvirker strømningerne

Der er ikke gjort noget tiltag til at vurdere selve kalibreringen, som forventes at være i orden. Det bemærkes dels, at der i det primære magasin (lag 5, nedre afgrænsning: nnfyn_5-enda) er fire zoner hvoraf en er repræsenteret med hydraulisk konduktivitet på $4e-7$ m/s, hvilket synes meget lavt for magasin materiale, og dels at de i gennemgangen simulerede og observerede tidsserier i Appendiks B (DHI 2004) tyder på, at modellen som gennemsnit rammer pænt mht. middel tryk afvigelser (RMS), men at den har sværere ved at ramme observationernes dynamik.

Modellen benytter en simpel 2 lags model for rodzone/umættet zone beregning (kapitel 5.5 DHI 2004). Sammenligning af den beregnede nettonedbør for perioden 1991-2000 med nettonedbør anvendt i DK-model Fyn for oplandet til Odense Å for samme periode viser, at Nørre Søby modellen har 386 mm/år mens DK-modellen har 250 mm/år dvs. en forskel på ca. 140 mm/år svarende til ca. 35% mindre nettonedbør i DK-modellen. I begge modeller anvendes DMI's klima data (10 km sættet i NrSøby-modellen og 40 km sættet i DK-modellen). Men hvor DK-modellen er kalibreret for et område som dækker hele Fyn med deraf bedre muligheder for at lukke vandbalancen ved at holde simuleret afstrømning op mod en række vandføringsstationer, så dækker NrSøby-modellen kun et delopland til en vandføringsstation. Det er således svært at vurdere validiteten af NrSøby-modellens større nettonedbør.

Randbetingelser er altid et kritisk punkt i hvert fald hvad angår grundvandsmodeller, og de er i dette tilfælde forsøgt håndteret ved at simulere det overordnede strømningsbillede med en storskala model (dk-model fyn). Modellens ydre randbetingelser er således nul-flux langs hele randen i de ikke-vandførende lag og fastholdt tryk baseret på dk-modellen i magasin lagene (lag 3, 5 og 7). Randbetingelserne er placeret uden for det estimerede grundvandsdannende opland, og modellens parametre er kalibreret i forhold til de valgte randbetingelser. Overordnet set forventes de valgte randbetingelser ikke at have betydning for strømningsbilledet i det boringsnære indvindingsopland ved de nye borer.



Figur 2 Model geologi og filterplacering for 155. 1333

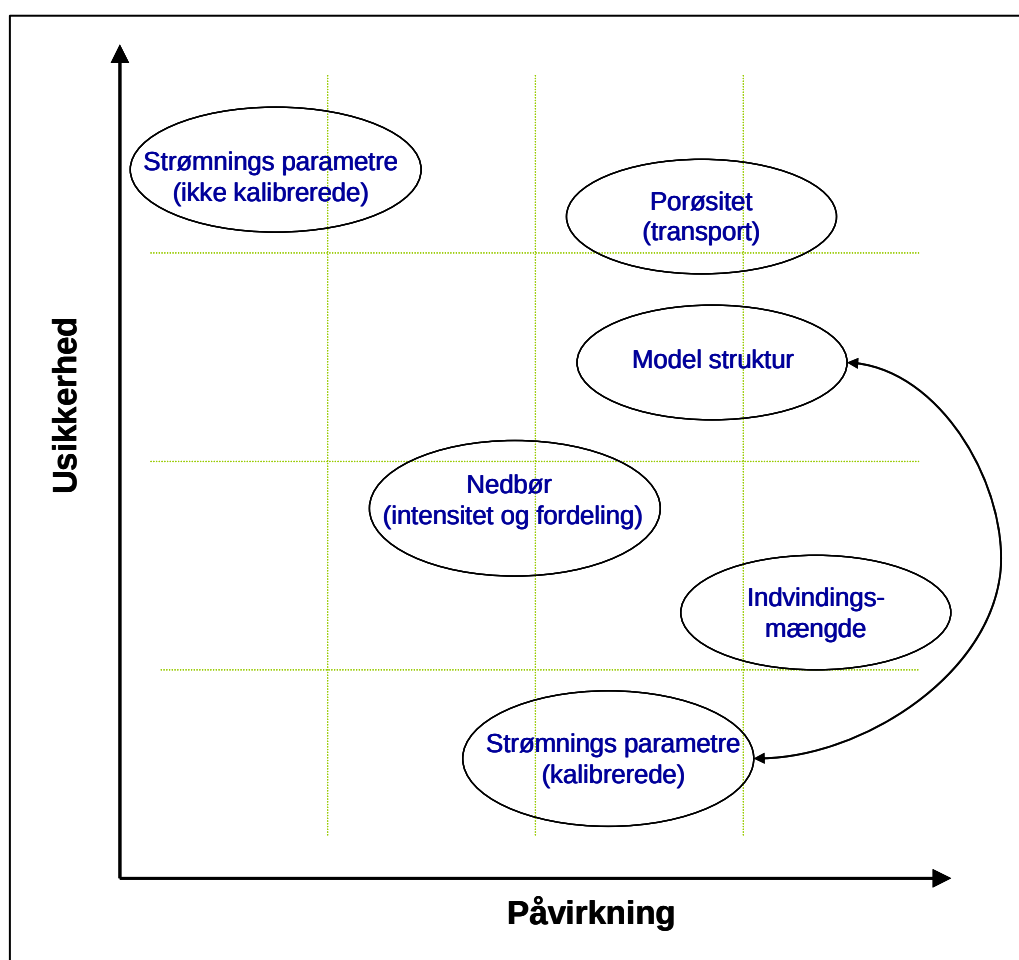
Ved opdatering af indvindingsfilen, som angiver filter størrelser og placeringer samt knytter en tidsserie med indvunden mængde [$\text{m}^3/\text{år}$] til de enkelte filtre, viste det sig, at en enkelt boring havde filter placering under bunden af modellen. OV mente at den korrekte filter placering var i samme magasin (lag 5 i modellen) som de øvrige 6 nye indvindinger. En analyse af modellagets tykkelse i området af den berørte boring viste et noget tyndere lag end OV mente var gældende for området. Sammenlagt antyder problemerne at der ikke er 100% overensstemmelser mellem OV's opfattelse af det primære magasin i området og modellens opsætning (geologisk struktur). En tilretning af dette problem vil i midlertidigt indebære dels en egentlig gennemgang og opdatering af den geologiske model og dels en efterfølgende rekalkibrering af modellen. Problemet blev imødegået ved at flytte filterplaceringen, således at der var overensstemmelse mellem OV's opfattelse af hvilket magasin, der bliver udnyttet og filtrets placering i modellen (se Figur 2).

At den geologiske model ikke passede på boringsniveau er ikke ualmindeligt tolkningsmetoden taget i betragtning. Den geologiske model var forfinet med udgangspunkt i DK-modellens 1km^2 grid. Ved forfiningen af modellen var der således ikke lagt særligt vægt på at lave en boringsnær tolkning af Nr. Søby borerne, i stedet er modellen blevet dannet via en interpolation af profil-tolkninger med god beskrivelse langs disse profiler i kombination, men med fokus på at ramme nogle overordnede trends. Herudover bemærker OV, at der også er uoverensstemmelse mellem DH's modelopsætning og geologien, der er præsenteret i Fyns Amts indsatsplan for Nr. Søby. Yderligere bemærker OV at borejournalen fra boring Odense Vandselskabs boring 155.1333 i øvrigt er i fin overensstemmelse

med den seneste opdatering af den geologiske model. Det er således mest sandsynligt, at der på et forholdsvis sent tidspunkt i amtets kortlægning af indsatsområdet er foretaget en opdatering af den geologiske model uden at der er foretaget en rekallibrering af DHI's model. Dette har betydning for området omkring boring 155.1333, hvor det blandt andet har medført uoverensstemmelser mellem den seneste udgave af den geologiske model og DHI's modelopsætning.

3. Risiko analyse og scenario beskrivelser

Formålet med risikoanalysen er at identificere scenarier som kan bidrage til en bedre forståelse af enkelt faktorerens påvirkning af det beregnede indvindings opland. Valget af scenarier er taget med støtte i denne analyse, og analysen kan isoleret ses som et værktøj til at opnå indsigt i modellens svagheder i forhold til de ønskede udsagn om indvindings oplande. Oplægget til risiko analysen var at OV ønskede gennemført en usikkerhedsbestemmelse af indvindingsoplandet med udgangspunkt i kalibreringsparametrenes 95% konfidensinterval og stokastiske simuleringer. Baggrunden herfor var DHI's slut rapport til Fyns amt (DHI 2004), hvor en tilsvarende øvelse var gennemført for det grundvandsdannende opland til boringer i Nørre Søby kildeplads, med den samme model.



Figur 3 Risiko vurdering af enkelt elementers usikkerhed i forhold til deres påvirkning af modelsimuleringer af indvindingsoplandet

Fordelen ved gennemførelsen af et tilsvarende scenario var, at modelberegningerne tilsyneladende ville være umiddelbart sammenlignelige (samme model, samme type beregninger, nye boringer). Ulempen var, at der kunne tænkes at være andre parametre, som ville have en større påvirkning af indvindingsoplandet, samt at parametrenes usikkerhedsinterval ikke synes at give et fyldestgørende billede af modellens svagheder/simulerings usik-

kerheder (illustreret med pilen mellem model struktur og kalibrerede parametre på Figur 3), jf. problemstillingen omkring den geologiske model i kapitel 2.

På mødet mellem OV, GEUS og WaterVision forsøgte vi at indplacere delfaktorers usikkerhed i forhold til forventet påvirkning. WaterVision skulle gennemføre nogle analytiske beregninger af tidsbestemte indvindingsarealer og deres påvirkning af overordnede grundvands gradienter, mens GEUS skulle lave tilsvarende med udgangspunkt i Fyns Amts numeriske model. Risiko analysen er opsummeret på Figur 3, hvor usikkerhed henviser til størrelsen af et estimeret udfalds rum, mens påvirkningen er fokuseret på det resulterende indvindingsopland (størrelse, retning, osv.). Kalibrerede og ikke-kalibrerede parametre henviser til, hvorvidt det er parametre som har været udsat for kalibrering ved opstilling af modellen eller det er parametre som er bestemt a priori. Ikke kalibrede parametre estimeres til at have lille påvirkningsgrad i forhold til simulering af indvindingsoplande, idet model-løren i det konkrete tilfælde forventes at have inddraget påvirkningsfølsomme parametre i kalibreringen. Mødet mandede ud i, at GEUS skulle fokusere på påvirkningen af elementer som både var præget af høj usikkerhed og høj påvirkningsgrad, i dette tilfælde ændret porøsitet og nettonedbør. Model strukturer (geologiske strukturer) er ligeledes endt højt placeret i skemaet, men det ville kræve en omfattende analyse af rådata, konceptualisering og geologiske forhold, hvilket i sidste ende ville være en ny opgave i sig selv.

WaterVision udtrykker skepsis overfor om nedbøren her spiller den store rolle. Erfaringer fra beregninger udført for KE's kildepladser, hvor $\frac{3}{4}$ af nedsivningen inden for det grundvandsdannende opland til kildepladsen havner i vandløbene og kun $\frac{1}{4}$ i borerne, viser at hvis der er en markant afstrømning gennem dræn, grøfter og vandløb, så er de beregnede arealer robuste over for ændring i nedbør.

Der blev udvalgt to scenarier hvortil der skal laves partikelbane simuleringer, et scenario hvor nettonedbøren er ændret +/- 10% og et scenario hvor der er ændret på den effektive porøsitet [0,1 – 0,2 – 0,25]. Formålet med de to scenarier var at belyse påvirkningsgraden af de modelberegnete boringsnære indvindings oplande.

4. Partikelbane beregninger

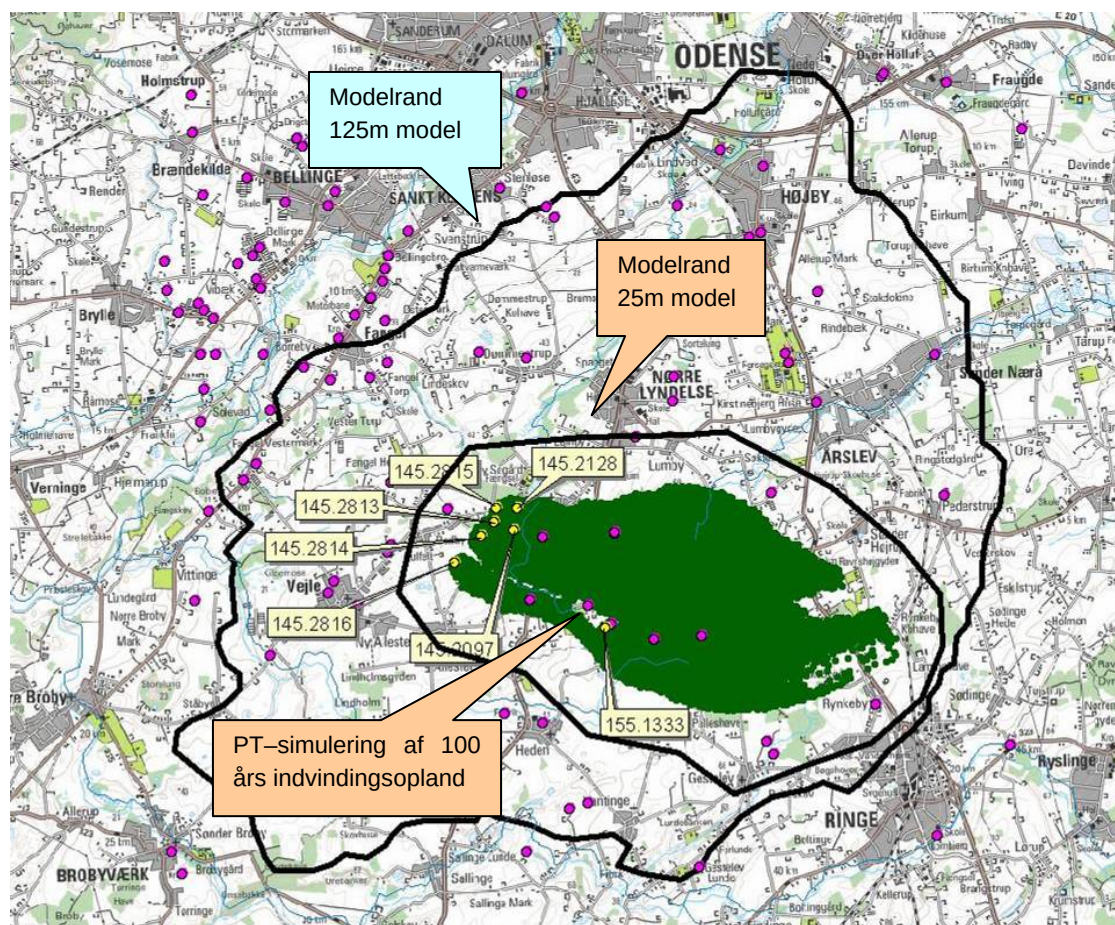
Partikelbane simuleringer af indvindings- og grundvandsdannende oplande foregår ved at placere et antal partikler i hver beregningscelle og følger deres transportvej gennem systemet. Transportvejen bliver en funktion af de simulerede strømninger og antaget effektiv porøsitet. Oplandenes afgrænsning sker ved en opgørelse af startplaceringen og transporttiden af de partikler, som ender i en celle med et indvindingsfilter. Det initiale antal af partikler i modellen er både afgørende for afviklingstiden og opløsningen af afgrænsningen. Partikelbaner har den fordel i forhold til almindelig transportsimuleringer, at de ikke er beregningstunge, og at de i princippet er gridafhængige. Variationerne i strømningsbilledet er dog stadig påvirket af gridopløsningen, hvorfor vi valgte at forfine gridnettet.

Nr. Søby modellen var sat op i 2 grid opløsninger, 250m og 125 m. Begge vurderedes at have en mulig påvirkning af simuleringen af de indvindingsnære oplande, hvorfor det blev besluttet at forsøge at opstille modellen i et finere grid, så evt. lokalpåvirkning/indvindingstragt kunne simuleres. Det valgte gridnet på 25m vurderedes som et fornuftigt kompromis mellem modelareal og computer kapacitet, hvis modelarealet blev indskrænket til kun at omfatte et udsnit omkring borerne svarende til det estimerede 100 års indvindingsopland. Partikelbane simuleringerne blev afviklet i 2 faser. Fase 1, som havde til formål at identificere modelrande til 25 m modellen og give bud på de indvindings- og grundvandsdannende oplande, blev afviklet i Nr. Søby modellen med 125 m grid opløsning. Fase 2, med formål at identificere variationer i de boringsnære indvindings oplande, blev afviklet i den beregningsnet forfinede 25 m udgave af Nr.Søby modellen.

MST bemærker i deres vejledning (Miljøstyrelsen 2007) at man ved beregning af BNBO med en grundvandsmodel formentligt skal ned på 10m diskretisering. Den anvendte transport simulering rutine (partikelbane simulering) i princippet er grid uafhængig, hvorfor en diskussion af selve grid opsætningen er af mindre værdi. Den anvendte metode er derimod partikel "afhængighed", dels skal man være opmærksom på at der frigives et fastsat antal partikler pr grid og ikke pr. m^2 (f.eks. fase 1's 10 partikler pr grid svarer til 640 partikler/ km^2 , fase 2's 5 partikler pr. grid svarer til 8000 partikler/ km^2), og dels er metoden følsom over for hvorledes partiklerne registreres som en del af indvindingsoplandet. I dette tilfælde registreres alle partikler som kommer i kontakt med en beregningscelle med tilknyttet indvindingsfilter (dvs. registreres som stammende fra indvindingsoplandet), herigennem mindskes betydningen af modellens evne til at simulere indvindingstragter. Alternativt kunne man nøjes med at registrere partikler som rent faktisk bliver indvundet i modellen med deraf følgende større følsomhed overfor gridopløsning (jo' større celler des mindre indvindingsvolumen/celle volumen, dvs. des mindre andel af partikler som entrere cellen vil blive fjernet gennem indvinding).

Fase 1 omfattede partikelbane beregninger af indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande til OV's nye borer. Fase 1 versionen af Nr. Søby modellen svarer fuldstændig til Amtets model bortset fra, at der er indsat OV's 7 nye borer (som nævnt alle i det primære magasin = lag 5 i modellen), og at den er opdateret og aftestet til at køre i Mike She version 2007 (modtaget i version 2003).

Partikelbane beregningerne er lavet på baggrund af modellens simulerede strømninger for reference perioden 1990-2003 og med en uniform effektiv porøsitet på 0,2. Da indvindingsoplandet og det grundvandsdannende opland indeholder transporttider som langt overstiger 15 år, så er strømningsperioden for 1990-2003 i fase 1 gentaget et antal gange svarende til godt 2000 år. Ved beregningerne er der frigivet 10 partikler i hver beregningscelle i de øverste 5 beregningslag (dvs. fra toppen til og med det primære magasin) og efter "2000 år" er >99% af alle partikler ude af modellen igen (gennem boringer, vandløb og andre randbetingelser). Den sidste <1% er typisk "fanget" i lavpermeable enheder dybt i modellen med meget lidt strømning og reelt uden betydning for afgrænsning af indvindingsoplandet såvel som grundvandsdannende oplande. 10 partikler pr. 125 m² celle er i dette tilfælde en anelse groft til at give et bud på det boringsnære indvindingsopland, men nok til at give et bud på det totale indvindings- og grundvandsdannende opland og dobbelt så mange som ved beregningerne gennemført for Amtet (DHI 2004).



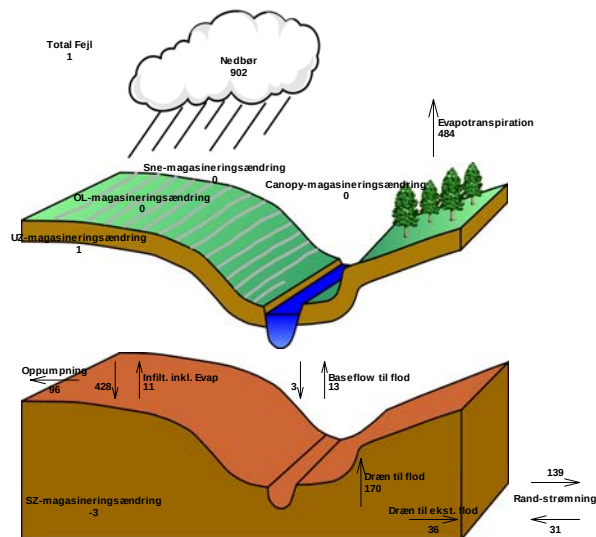
Figur 4 Modelrand, placering af nye boringer, 100 års indvindingsopland og "25m model" rand (NrSøby geus 2 basis)

Fase 2 beregningerne er af de udvalgte scenarier på baggrund af strømningssimuleringer foretaget i 25m NrSøby modellen. Randbetingelserne for 25m strømningsmodellen er trykniveau randbetingelser og beregninger af nettonedbør hentet fra simuleringen i 125 gridet for perioden 1990-2003. Trykniveau randbetingelserne er placeret approximativt 1 km udenfor 100 års indvindings oplandet beregnet i fase 1, se Figur 4.

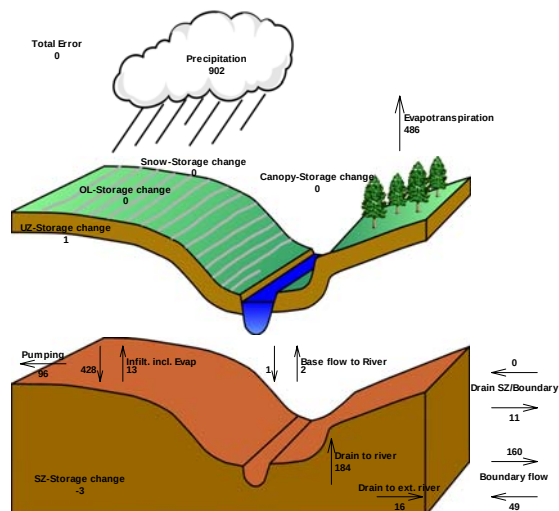
Opstillingen af 25m modellen er stort set identisk med 125m modellen, bortset fra at beregningsgridet er 25x25m², dvs. 25 gange så fint. Det meste af den nye model er stadig distri-

bueret i 125 m grid, som f.eks. nedbør, dræn, geologi og topografi. Indvindinger og vandløb er indplaceret som linieelementer som er UTM koordinat fastsat, hvorfor påvirkningen på celleniveau bliver kraftigere (som f.eks. lokal påvirkning af indvinding). Modellen er ikke forsøgt rekalkuleret indenfor lokal området, hvilket giver lidt forskelle, ligesom fase 2 modellen er simuleret stationært i modesætning til fase 1 modellen, hvilket igen giver nogle små justeringer.

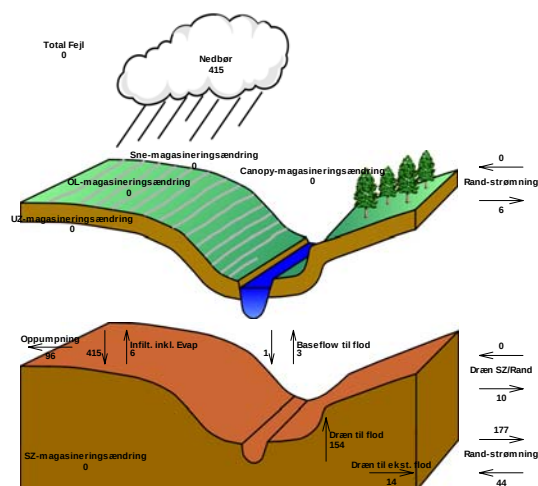
Forskellene på fase 1 og 2 fremgår af vandbalancerne (Figur 5, Figur 6 og Figur 7). De væsentligste forskelle omhandler ændringer i fordeling dræn- og direkte tilstrømning til vandløb. Hertil kommer mindre ændringer i udstrømning over randen. Ændringerne i vandbalance skyldes primært at modellens udveksling mellem grundvand og vandløb er delvist afhængig af beregningsgriddet. De resterende model-parametre er principielt set griduafhængige. Forskellen på nedbør og fordampning mellem NrSøby_geus4 og de andre simuleringer skyldes at modellen er simuleret stationært, hvorfor det ikke er muligt at simulere nedbør-fordampning direkte i modellen. For NrSøby_geus4 er nedbør-fordampnings rutinen negligeret og udtrukkede data for nedsivningen til grundvandet fra NrSøby_geus2 simuleringen er i stedet anvendt direkte som nedbør.



Figur 5 Vandbalance for 125m model (NrSøby_geus2 - transient simulering)



Figur 6 Vandbalance for 25m model (NrSøby_geus3 - transient simulering)

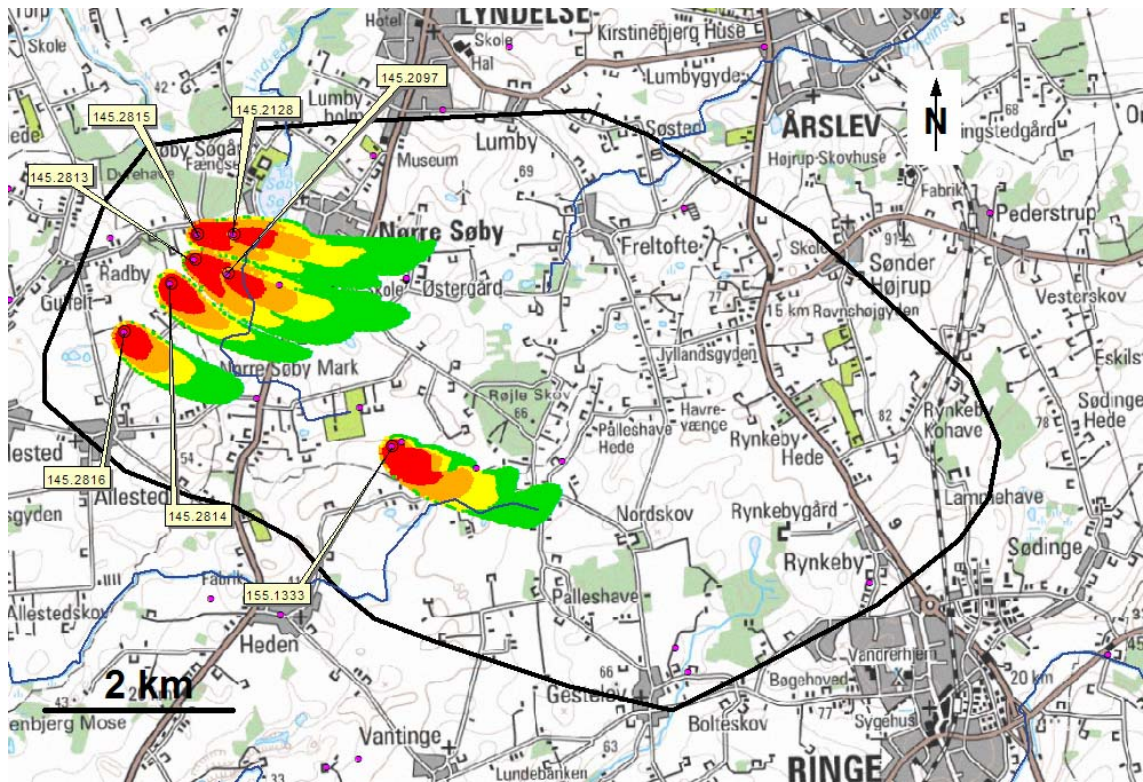


Figur 7 Vandbalance for 25m model (NrSøby_geus4 - stationær simulering)

Partikelbane simuleringerne for de fase 1 og 2 er:

Fase 1	
NrSøby_geus2_basis	Beregning af indvindings oplandet, samt det grundvandsdannende opland for de syv nye boringer. 10 partikler pr celle i de øverste 5 beregningslag. Reference situation svarende til 1990-2003 med ligeligt fordelt forventet indvinding i de nye boringer
Fase 2	
Fælles	Beregning af 0-25 års indvindings oplandet for de syv nye boringer. Modelsetup (-grid), randbetingelser og reference nettonedbør hentet fra fase 1. Beregningsgrid = 25x25m. 5 partikler pr. celle i lag 5
NrSøby_geus4_basis	Porøsitet = 0,2 Nettonedbør svarende til reference situationen
NrSøby_geus4_p010	Porøsitet = 0,10 Nettonedbør svarende til reference situationen
NrSøby_geus4_p025	Porøsitet = 0,25 Nettonedbør svarende til reference situationen
NrSøby_geus4_N090	Porøsitet = 0,2 Nettonedbør svarende til 90 % af reference situationen
NrSøby_geus4_N110	Porøsitet = 0,2 Nettonedbør svarende til 110 % af reference situationen

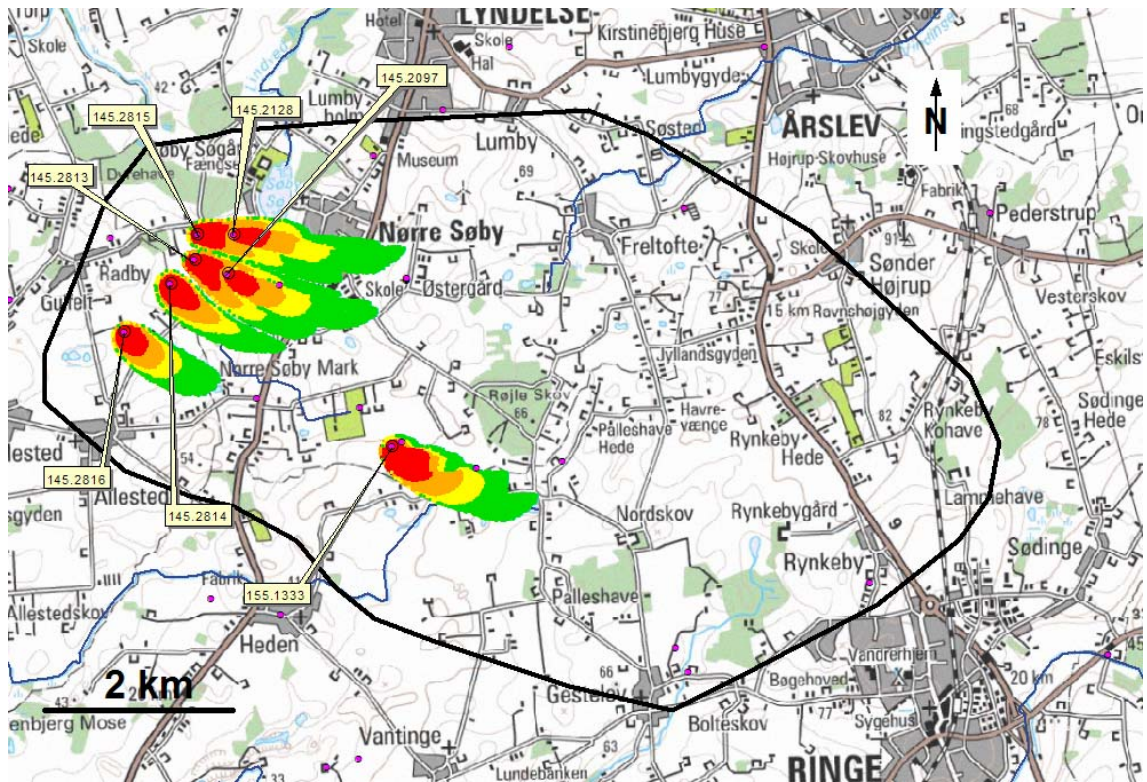
Partikelbane beregningerne for fase 2 er gennemført ved at der er frigivet 5 partikler i alle celler i det primære magasin svarende til 349.375 partikler (25 gange flere pr arealenhed end i fase 1). Alle partikelbane beregningerne i fase 2 er foretaget på baggrund af simuleringerne af stationære strømningsbillede for perioden 1990-2003. Resultaterne er afleveret på med et filsæt pr simulering [shape-format koordinat sat i UTM 32 ed50 med formatet: start x, start y, start z, start lag, start tid, alder, dummy, boring, kildeplads].



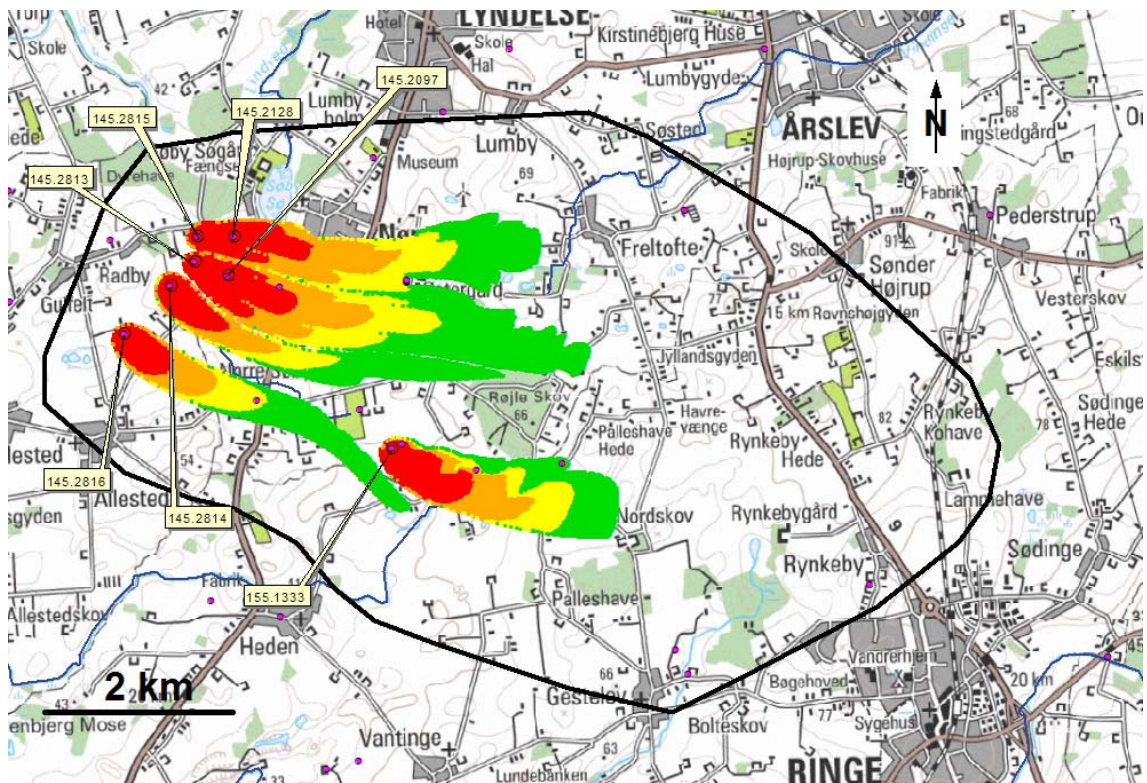
Figur 8 Beregninger af transporttider i det primære magasinet. Rød = < 1 år, Orange = 1-2 år, Gul = 2-3 år, Grøn = 3-5 år (NrSøby_geus4_basis, porøsitet = 0,20)

Figur 8 viser beregninger af transporttider i det primære magasin, hvilket kan sidestilles med de boringsnære indvindingsoplande, i dette tilfælde indenfor 0-5 års transport tid. Figuren udgør basis scenariet, som de efterfølgende figurer skal sammenlignes med. Alle de beregnede boringsnære indvindingsoplande er, som forventet, langstrakte med tydelig hale opstrøms boringen. Det bemærkes ligeledes at de enkelte indvindingsoplande er påvirket af omkringliggende indvindinger, hvilket også fremgår af Figur 14, som illustrerer beregninger af 25 års indvindingsoplandene for de enkelte boringer.

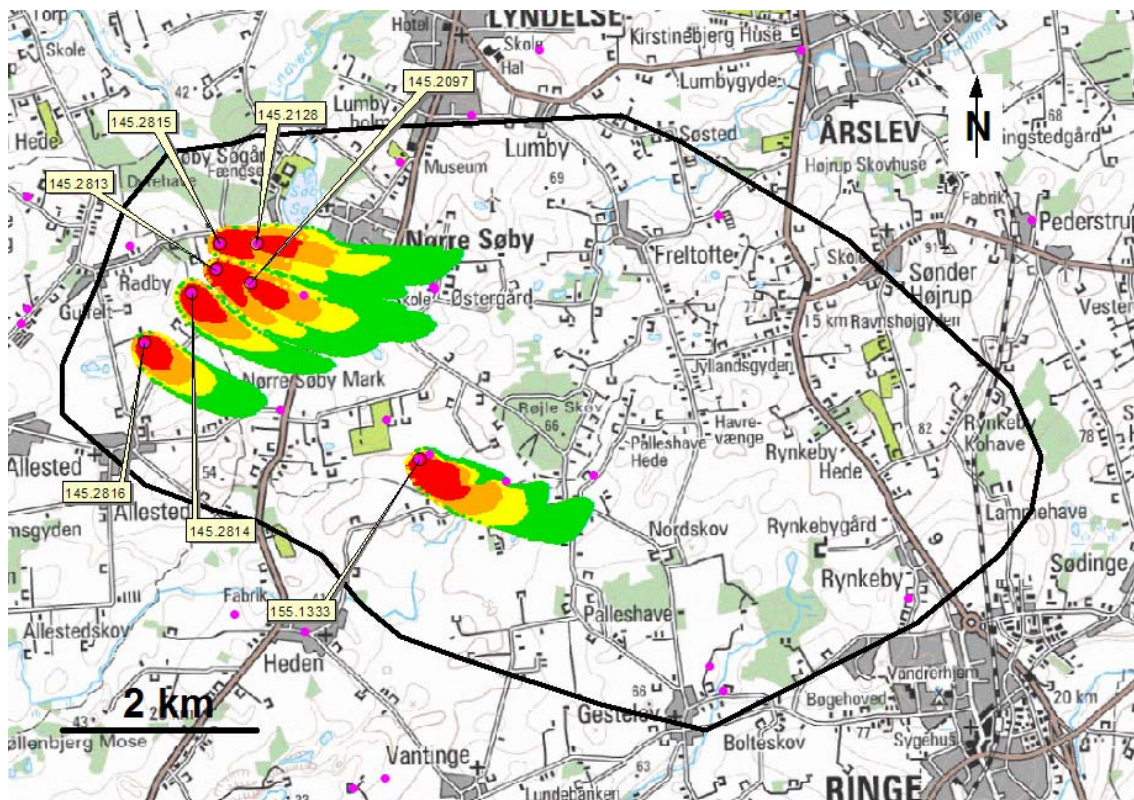
Figur 9 og Figur 10 viser effekten af at ændre porøsiteten for modellen. Porøsiteten er som tidligere nævnt en forholdsvis usikker størrelse og i beregningerne er den varieret i intervallet 0,1 – 0,25. Effekten af en sådan variation er som ventet markant på indvindingsoplandets udbredelse, det interessante er i dette tilfælde at det ikke kun er indvindingsoplandets størrelse, men også at formen på indvindingsoplandet ændres. "Form-ændringen" skal ses som en kombination af den geologiske variabilitet og påvirkningen af andre boringer i oplandet, des mere homogent og fri for andre indvindinger, des mindre "form-ændring" må der forventes. Dette vil i sidste ende spille tilbage på usikkerheden knyttet til modelstrukturer og modellens evne til at belyse geologisk heterogenitet.



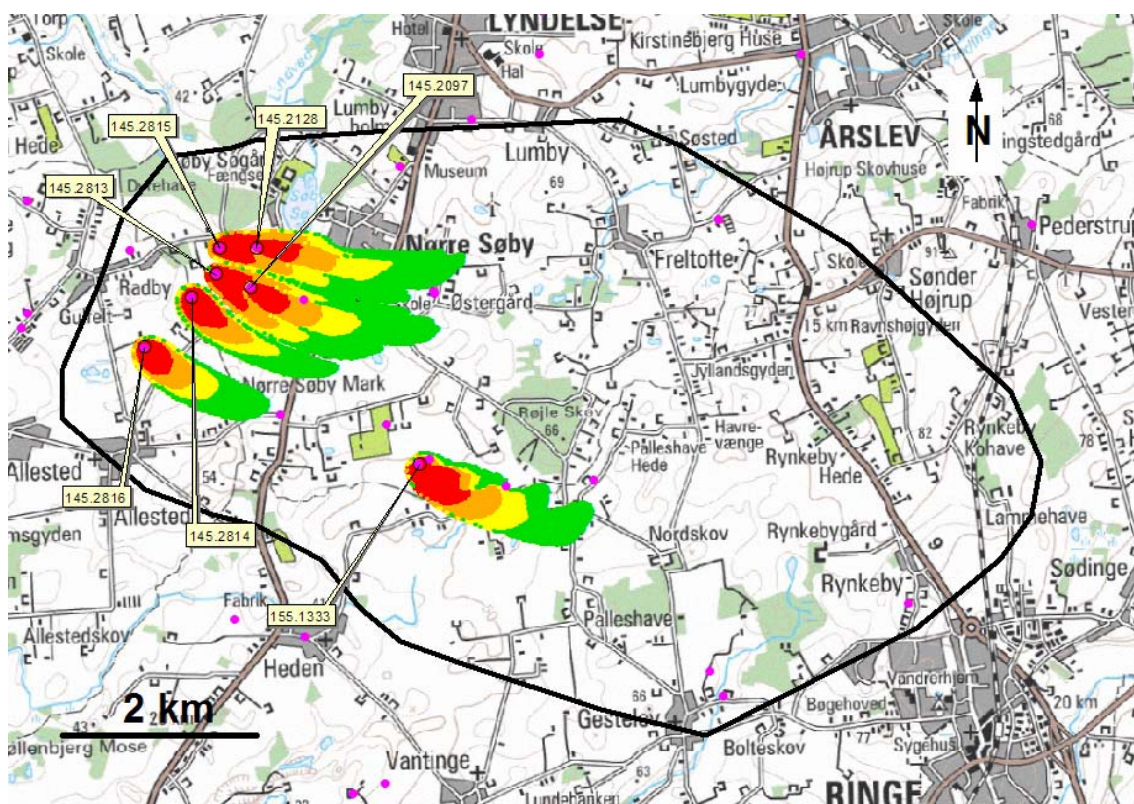
Figur 9 Beregninger af transporttider ved ændret porøsitet (NrSøby_geus4_p025, Porøsitet = 0,25)



Figur 10 Beregninger af transporttider ved ændret porøsitet (NrSøby_geus4_p010, Porøsitet = 0,10)

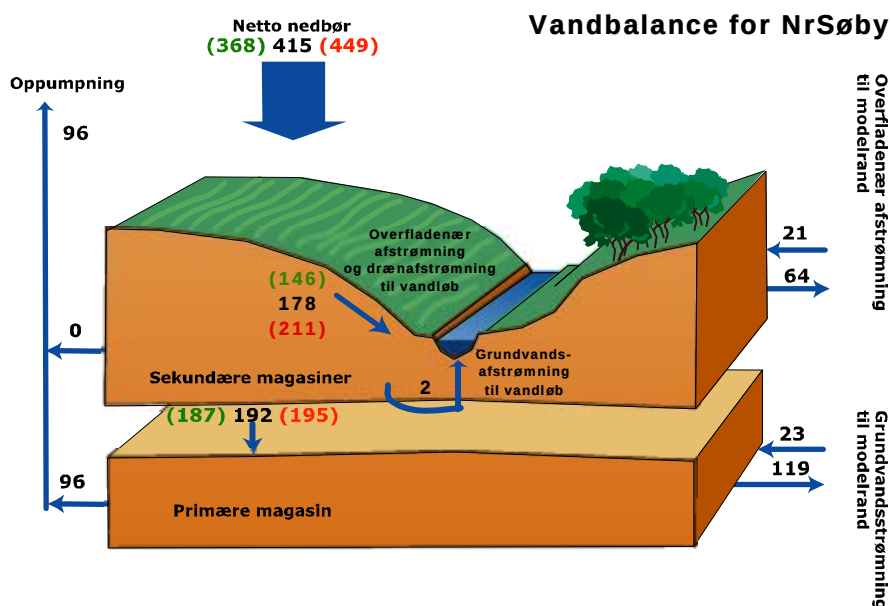


Figur 11 Beregning af transport tider ved ændret nettonedbør (NrSøby_geus4_N090, nettonedbør = 90% af tilsvarende i basiskørsel)



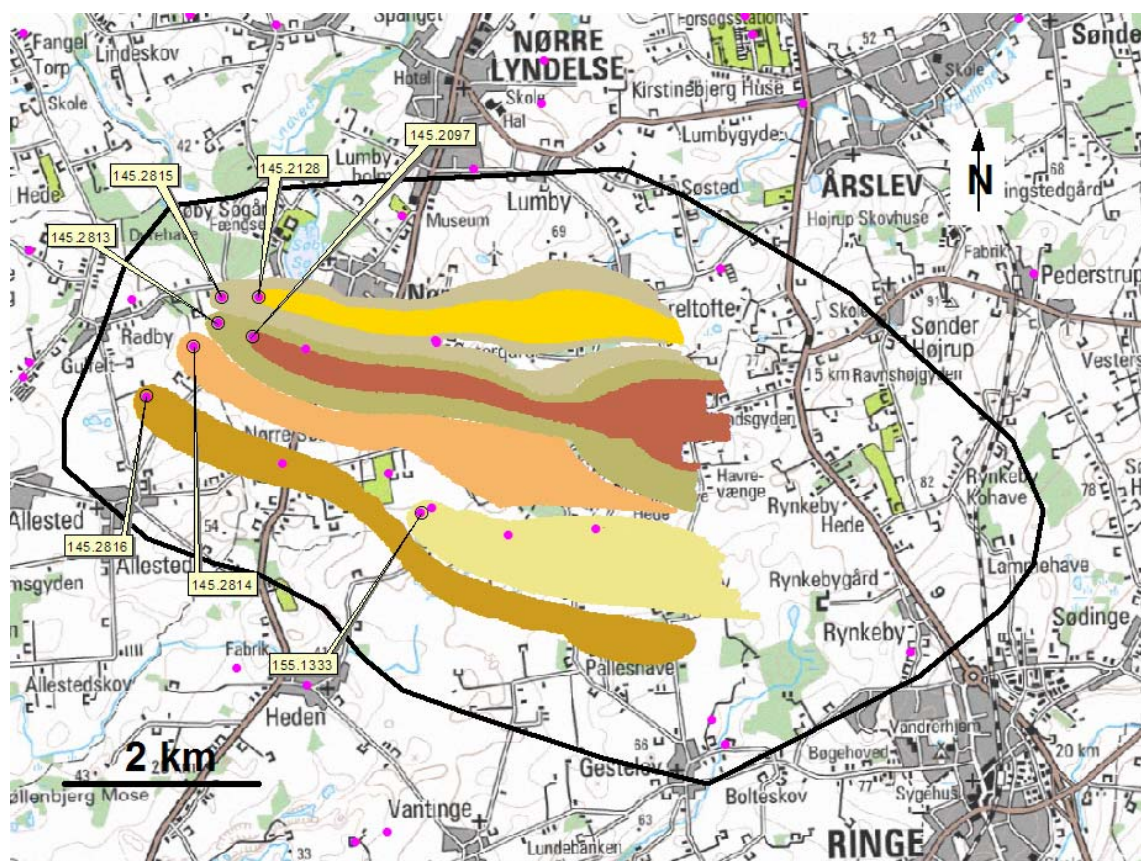
Figur 12 Beregning af transport tider ved ændret nettonedbør (NrSøby_geus4_N110, nettonedbør = 110% af tilsvarende i basiskørsel)

Figur 11 og Figur 12 viser indvindingsoplandene som følge af en 10% ændring i nettonedbørs intensitet. Forskellene mellem figurerne er umiddelbart små, og der er da heller ikke kvantitativt den store forskel. Den lille påvirkningsgrad ændringer i nettonedbør synes at have på beregninger af det boringsnære indvindingsopland stemmer overens med de erfaringer WaterVision havde gjort i forbindelse med modellering af kildepladser for Københavns Energi. Forklaringen skal formodentligt findes i oplandenes dræningsgrad og geologisk heterogenitet af den overliggende lagserie som overlejer magasinet. Et nærmere kig på vandbalancen (Figur 13) for de to nettonedbørs-model kørsler i forhold til basis-model kørslen viser at ændringen på $\pm 10\%$ i nettonedbør er blevet til $\pm 2\%$ ændring i strømning til det primære magasin, hvorimod "dræn til vandløb"s komponenten er ændret med $\pm 18\%$. Den samlede indvindingsprocent (indvinding/grundvandsdannelse) indenfor oplandet ændres fra 50% til 49% henholdsvis 51%.



Figur 13 Vandbalance for NrSøby_geus4_basis. Tal for 90% og 110% nettonedbør er angivet i grøn henholdsvis rød.

Vandbalance figuren giver samtidigt et bud på betydningen af randbetingelserne, idet en meget stor del af den samlede strømning løber over de ydre rande, hvor betingelserne var fastholdt tryk (hentet fra 125m modellen). Ændringer i randbetingelserne til en anden type (f.eks. no-flow eller gradient) giver ikke umiddelbart mening med mindre at der er håndfaste målinger fra området, og vandbalancen for modellen tyder da også på at andre typer randbetingelser vil give meget anderledes resultater.



Figur 14 Beregninger at 25 års indvindingsopland (NrSøby_geus4_basis). Bemærk de kantede afbræk i oplandene til 145. 2097 og 155. 1333, som skyldes en zonerings i magasinet med ler-lignende hydrauliske egenskaber, se evt. zonerings-diskussion i afsnit 2)

5. Konklusion

BNBO simuleringerne er gennemført i et 25m² grid hvilket er lidt grovere end MST's anbefalinger på 10m². Det er ikke på baggrund af modelberegningerne muligt at sige noget generelt om diskretisering niveauet i forhold til de indvundne mængder, men det vurderes at den samlede påvirkning af det boringsnære overordnede trykniveau er simuleret gennem den anvendte transport rutine som i princippet er grid uafhængig, ved at simulere et stort antal partikler (8000 pr km²) og gennem registrerings kompensering ved at alle partikler som kommer i kontakt med en "indvindings"-beregningsscelle registreres som stammende fra indvindingsoplandet. Det er samtidigt klart at en øget diskretisering ville øge muligheden for at forfine den geologiske model, og således øge heterogenitet som vil påvirke strømningsvejene. Dette ville dog uden tvivl kræve en ekstra ordinær indsats idet der inden for området kun er der ca. 8 boringer pr. km² med en dybde på 20 meter i gennemsnit. Vi har i dette tilfælde taget udgangspunkt i en eksisterende models geologisk struktur og udelukkende øget grid opløsningen for at forbedre muligheden for at simulere boringsnære sænkningstragter, hvilket i øvrigt er i overensstemmelse med MST's anbefalinger. Fordelen ved at anvende den numeriske model er udover forbedret mulighed for at simulere påvirkninger som følge af geologisk heterogenitet og topografisk variation, at den numeriske model åbner op for analyse af gensidig indvinding påvirknings, hvilket tydeligt ses i dette tilfælde.

Simuleringerne af gradientforhold er i overvejende grad styret af de topografiske variationer og modellens geologiske strukturer. Samtidigt er den numeriske models force at det i den er muligt at indarbejde geologiske og topografiske variationer og sammenholde disse med f.eks. trykniveau observationer og afstrømningsmålinger og eventuelt tilrette variationerne gennem kalibrering. I denne sammenhæng er det uhensigtsmæssigt at den geologiske models zonerings er modelteknisk funderet og som sådan ikke kan retfærdiggøres uafhængigt af model simuleringerne (rykker modellen fra fysisk distribueret mod lumped). Modellens lagstruktur er fundet repræsentativ for grupper af boringer, om end enkelte afvigelser er registreret på enkelt boringsniveau, f.eks. 155. 1333. Variationer indenfor den etablerede geologiske model, dvs. mindre variation af de hydrauliske parametre forventes ikke at påvirke partikelbane simuleringer, hvorimod forsøg fra områder med tilsvarende magasinforhold taler for at alternative geologiske modeller vil have stor effekt i forhold til partikelbane simuleringer (Troldborg 2004). Det skal bemærkes ændringer i den geologiske model uden samtidigt at rekalibrere samme ikke vil give mening. Det skal også bemærkes at jo tættere vi kommer på boringerne des mindre usikkerhed forventes der at være forbundet med den geologiske model.

Modelsimuleringerne viser at porøsitet har afgørende betydning for størrelsen af BNBO, hvorimod nettonedbør betyder mindre i dette område. Nettonedbøren kan principielt ikke ændres uden at det påvirker modellens evne til at simulere afstrømning og trykvariationer og er således "låst fast" af modelkalibreringen. Porøsiteten indgår derimod ikke i kalibreringen er som sådan en "fri" parameter, i det omfang at der ikke er målinger af hastighedsgradient sammenhænge eller direkte transport data at holde simuleringerne op imod. De anvendte porøsiteter er repræsentative i forhold til det forventede spænd af effektive porøsiteter for det givne magasin, og simuleringerne kan ses som et bud på forskelle i BNBO

som følge af dette spænd under de givne gradientforhold. Samtidigt viser modelsimuleringerne at gradientforholdene er forholdsvis ufølsomme overfor ændringer i nettonedbør.

Med udgangspunkt i konklusionen må det forventes at simuleringerne dækker et meget stort spænd af sandsynlige variationer i BNBO, og følgende anbefalingerne til videre arbejde er primært fokuseret på at opnå større tillid til modellen og simuleringerne. For at udvikle denne tillid kan det være nødvendigt:

- at arbejde videre med den geologiske model med udgangspunkt i geologisk variabilitet i det boringsnære område
- at bearbejde de numeriske zonerings som er indført i modellen
- at skaffe målinger som kan indkredse spændet for porøsitet eller give mulighed for kalibrering af porøsitet
- at skaffe bedre grundlag for at vurdere modellens trykniveau simuleringer i model oplandet og ikke mindst i det boringsnære område (flere trykniveau målinger)
- at udvide modelområdet således at modellen også kalibreres efter afstrømningsmålinger, dvs. at det som minimum kommer til at dække hele oplandet til nærmeste vandførings station, eller eventuelt tager udgangspunkt i en mere regionalt dækkende model.

6. Referencer

DHI (2004). Grundvandsmodellering ved Nr.Søby – modelopstilling og modelanvendelse (slut rapport), Fyns Amt Miljø-og arealafdelingen.

Henriksen,HJ., Knudby,CJ., Rasmussen,P., Nyegaard,P. (1997) National vandressource model – Modelopstilling og kalibrering for Fyn, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse rapport 1997/139.

Henriksen,HJ., Refsgaard,JC., Sonnenborg,TO., Gravesen,P., Brun,A., Refsgaard,A., Jensen,KH. (2001). Ståbi i grundvandsmodellering, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse rapport 2001/56.

Miljøstyrelsen (2007). Boringsnære beskyttelses områder – BNBO, Vejledning fra Miljøstyrelse nr.2 2007

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