

# 3D hydrologisk strømningssmodel for Egebjerg området

Beskrivelse og uddybning af A2 klima scenariet  
med henblik på CLIWAT projektet

Hans Jørgen Henriksen & Lars Trolborg



# **3D hydrologisk strømningmodel for Egebjerg området**

Beskrivelse og uddybning af A2 klima scenariet  
med henblik på CLIWAT projektet

Hans Jørgen Henriksen & Lars Trolborg

# Indholdsfortegnelse

<b>1.</b>	<b>Resumé</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>Introduktion</b>	<b>7</b>
2.1	Problemstilling .....	7
2.2	Modelformål .....	7
2.3	Vurdering af væsentlige usikkerhedskilder og deres potentielle betydning .....	7
2.4	Introduktion til modelområdet og tidligere undersøgelser.....	7
<b>3.</b>	<b>Metodik til vurdering af klimaændringers effekter på hydrologi og grundvand</b>	<b>8</b>
3.1	Modelanvendelse .....	8
3.2	Øvrige usikkerheder .....	10
<b>4.</b>	<b>Modelopstilling</b>	<b>12</b>
<b>5.</b>	<b>Modellens dokumenterede anvendelsesområde</b>	<b>14</b>
<b>6.</b>	<b>Scenarieopstillinger</b>	<b>15</b>
6.1	Opstilling af scenarier.....	15
<b>7.</b>	<b>Tilladelser</b>	<b>18</b>
<b>8.</b>	<b>Resultater for A2 emissionsscenariet 2071-2100</b>	<b>27</b>
<b>9.</b>	<b>Diskussion</b>	<b>34</b>
9.1	Direkte effekter af klimaændringer (A2) .....	34
9.2	Indirekte effekter af klimaændringer på hydrologi og grundvand .....	38
<b>10.</b>	<b>Referencer</b>	<b>40</b>

# 1. Resumé

Denne rapport beskriver simuleringer med en 3D hydrologisk strømningsmodel i forbindelse med Interreg IV-B projektet CLIWAT (se [www.cliwat.eu](http://www.cliwat.eu)) for Egebjergområdet. Den hydrologiske modelopstilling og kalibrering er nærmere beskrevet i kortlægningsrapporten, GEUS rapport 2011/101, Henriksen, H.J. og Troldborg, L. (2011).

Nærværende rapport beskriver og uddyber resultater af A2 scenariet. A2 scenariet forudsiger en stadig kraftigt stigende udledning af drivhusgasser. Scenariet beskriver en heterogen verden med lokalt forankret udvikling, hvilket resulterer i en fortsat stigning i verdens befolkningstal. Økonomisk udvikling foregår primært på regionalt plan, og økonomisk vækst samt teknologisk forandring er mere fragmenteret og sker langsommere end i de øvrige scenarier ([www.klimatilpasning.dk](http://www.klimatilpasning.dk)). A2 scenariet for Danmark for perioden 2071-2100 er benyttet som input til Egebjerg modellen med henblik på CLIWAT projektet. Fokus i CLIWAT er bestemmelse af effekter af klimaændringer på grundvandssystemet og derigennem effekter på overfladevand og vandforsyning (inkl. bygninger, veje og ændret udvaskning fra punkt og fladekilder). Målet med modelleringopgaven for Egebjerg har specifikt været at udvikle og implementere innovative metoder til analyse af klimaændringernes effekt på hydrologien og specielt grundvandet i områder med begravede dale.

Sammenligningen af nuværende og fremtidigt klima (IPCC scenarie A2 ved slutningen af dette århundrede) viser, at der er væsentlige ændringer i trykniveau og max - afstrømning i et varmere klima bedømt ud fra A2 scenariet 2071-2100 med referencen 1991-1960, når de direkte effekter af ændret nedbør, temperatur og fordampning beregnes.

En række forhold er ikke inddraget i vurderingen, det gælder f.eks. usikkerheden på de globale og regionale klimamodeller (GCM/RCM), usikkerheden som følge af nedskaleringmetode (der er anvendt "delta-change metoden" i analysen for Egebjerg), usikkerheden på den hydrologiske model, samt den fremtidige udvikling i oplandets opbygning og karakteristika.

Beregningerne med A2 scenariet viser at områder med en vis dybde til det øverste grundvandsspejl (dybde > et par meter) vil få væsentlige ændringer i grundvandsspejlet svarende til stigninger i det øvre grundvandsspejl på mere end 1 meter for 2071-2100 i forhold til 1961-1990, og lokalt 2-5 meter. Ændringer i grundvandstanden kan kræve mere effektiv dræning i områder hvor der i dag ikke er drænet. Det er i modellen antaget at der er dræn overalt, og at der dermed på landbrugsjord vil ske dræning i et fremtidigt klima. I områder hvor der i dag er højtliggende grundvandsspejl (0-1 meter under terræn) vil den forøgede grundvandsdannelse blive afdrænet til dræn og vandløb, hvorved at maksimumsvandføringen vil stige. For LI. Hansted å oplandet (St. 27.01) giver A2 scenariet således stigninger i vinterafstrømningerne januar – marts på i gennemsnit 30 – 45 %, og stigninger i maksimumsafstrømningen i samme størrelsesorden. Samtidig ses en reduktion i afstrømningen september – november af størrelsesorden 5 – 25 %. Det er derfor en væsentlig udfordring at kunne holde de øgede mængder vand og stof tilbage i oplandet om vinteren og det tidli-

ge forår så klimaændringerne ikke forværrer f.eks. risiko for oversvømmelser nedstrøms f.eks. i Horsens by, eller stoftilførslen til Horsens Fjord. Samtidig vil der, i takt med at afstrømningen reduceres i sensommeren og efterårsmånederne, være en risiko for udtørring af vandløb og vådområder f.eks. omkring Nørrestrand. Da stigningerne i grundvandsstanden primært vil ske omkring vandskel, så vil de overordnede grundvandskel ikke ændre sig væsentligt, i områder beliggende i større afstand fra havet.

De direkte effekter af ændret nedbør, fordampning og temperatur har betydning for placeringen af indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande. Men for Egebjerg området med dybe begravede dalsystemer, har de direkte effekter kun sekundær betydning, viser beregningerne, sammenlignet med betydningen af usikkerheder på konceptuel model og parameterværdier. De markant ændrede grundvandstande i et fremtidigt klima (på 1 meter eller mere) af det øvre terrænnære grundvand, vil kunne medføre ændret udvaskning og forureningsbelastning fra punktkilder og diffuse kilder, og heraf følgende ændret belastning af grundvand og overfladevand fra disse forureningskilder. Direkte effekter af klimaændringer vil give et øget trykniveau i de dybere magasiner, altså en positiv virkning på muligheden for vandindvinding fra dybere magasiner, idet der vil kunne fastholdes en uændret afsenkning ved en højere vandindvinding (altså en øget kvalitetsmæssig bæredygtig resource).

De indirekte effekter af klimaændringer, f.eks. ændret arealanvendelse, vandindvinding, dræning osv. er ikke konkret vurderet i nærværende rapport for A2 scenariet, men en analyse ud fra tilladte indvindinger sammenlignet med aktuelle indvindinger viser, at indirekte klimaeffekter har større betydning end direkte effekter (f.eks. ændret nedbør og temperatur) på de afgrænsede indvindings- og grundvandsdannende oplande for området ved Egebjerg med dybe begravede dale. Indirekte effekter udgør derfor et overset problem. Ved blot små ændringer i vandindvindingen (f.eks. 7 % for Højballegård, og indtil 50 % for de øvrige små vandindvindinger) er der fundet større afvigelser på indvindingsoplande, end for ændret nedbør, temperatur og fordampning som følge af klimaændring. Da der i de kommende år vil kunne ske væsentlige ændringer i vandindvindingsstrukturen, både som følge af forurenninger der til dels er klimagenererede (f.eks. i forbindelse med kraftige regnskyl), men også som følge af regionale ændringer i vandindvindingen som følge af ændret arealanvendelse, afgrødevalg, markvanding, dambrug mm., så udgør de indirekte effekter samlet set en effekt der bør tænkes ind i såvel vandplanlægningen og grundvandsbeskyttelsen, i form af egentlig scenarieudvikling.

Medtaget i analysen er desuden en sammenligning af resultaterne for A2 (2070-2100 med ref. 1961-90) ud fra PRUDENCE datasættet med resultater for A1B (2080-2100 med ref. 1991-2010) ud fra ENSEMBLES datasættet. I ENSEMBLES datasættet findes der ikke resultater for A2 emission scenariet, derfor er det noget mere moderate A1B emission scenarie anvendt til analysen. A2 har noget større korrektionsværdier for f.eks. nedbøren i vinterhalvåret, de er ca. dobbelt så høje som A1B, dels som følge af at scenariet er mere moderat, dertil kommer, at den ændrede nutidsperiode svarende til 1991-2010 i stedet for 1961-1990, kan give mindre forskelle mellem fremtidig periode og reference periode. I A1B scenariet topper de menneskelige udledninger af drivhusgasser omkring 2050, hvorefter de

falder. A1B forudsætter en hurtig økonomisk vækst med en global befolkning, som kulmine-  
rer midt i århundredet. Scenariet indebærer en hurtig introduktion af nye og mere effektive  
teknologier og forudsætter, at der anvendes en blanding af fossile og ikke-fossile energikil-  
der ([www.klimatilpasning.dk](http://www.klimatilpasning.dk)).

## **2. Introduktion**

Nærværende rapport beskriver et forsknings- og udviklingsprojekt gennemført i samarbejde mellem Naturstyrelsen Aarhus og GEUS. Målet med projektet har været at udvikle og implementere innovative metoder til analyse af klimaændringers effekt på hydrologien og specielt grundvandet i områder med begravede dale.

### **2.1 Problemstilling**

Udgangspunktet er den ved udgangen af juli 2011 opstillede 3D hydrologiske model for Egebjerg (Henriksen og Troldborg, 2011), der bygger på en 3D voxel geologisk model (Møller og Jørgensen, 2011).

### **2.2 Modelformål**

Rapporten beskrives i detaljer simuleringer af indvindingsoplande, grundvandsdannende oplande, vandbalancer, trykniveau og vandløbspåvirkninger for nutids og fremtidsklima (A2 og A1B) for nuværende indvinding og tilladte indvindinger, med henblik på vurdering af mulige effekter af klimaændringer på vandkredsløb og grundvandsbeskyttelse.

Den anvendte metodik omfatter innovative metoder til analyse af klimaændringers effekt på hydrologien og grundvandet.

### **2.3 Vurdering af væsentlige usikkerhedskilder og deres potentielle betydning**

Der er væsentlige usikkerheder omkring fremtidige scenarier for indvindingsforhold, indvindingsstruktur og arealanvendelse (management scenarier). Her har især fremtidige indvindingsforhold (indvindingsstruktur) og drænforhold betydning og udgør potentielle usikkerhedskilder. Direkte effekter af klimaændring (nedbør, temperatur og fordampning) undersøges eksplicit i opgaven (frem til slutningen af 2100), hvorimod der ikke foretages scenarieudvikling og modelanalyse med hensyn til ændret indvinding, arealanvendelse mv.

### **2.4 Introduktion til modelområdet og tidligere undersøgelser**

Der henvises her til Henriksen og Troldborg (2011).

## 3. Metodik til vurdering af klimaændringers effekter på hydrologi og grundvand

### 3.1 Modelanvendelse

Metodik for vurdering af klimaændringers effekter på hydrologi og grundvand baserer sig på en sammenligning mellem det nuværende klima og et muligt fremtidigt klima (Fig. 3.1). Der tages i denne rapport udgangspunkt i IPCC's A2 scenarier (2071-2100) som er sammenlignet med et nuværende klima svarende til 1961-1990.

Først benyttes en global klimamodel (GCM), som foretager beregninger med horisontale beregningsceller på 200-300 km (Fig. 3.1). Beregningsnettet, hvor Danmark stort set repræsenteres af en enkelt celle, er for grov til at sige noget meningsfuldt om andet end middeltemperaturer. Derfor benyttes der som regel regionale klimamodeller (RCM), som benytter randbetingelser fra en GCM og laver mere detaljerede beregninger for en region, typisk med en opløsning på 12 eller 25 km. Et eksempel på en RCM er DMI's HIRHAM model, der til beregninger af det danske klima opstilles så den dækker det meste af Europa og Nordatlanten.

Klimamodellens resultater for det nuværende klima (kontrolperioden) sammenlignes herefter med historiske klimadata (Fig. 3.1). Her viser det sig at klimamodellen på nogle områder ikke giver en særlig nøjagtig beskrivelse af det nuværende klima. Klimamodeller er som regel gode til at simulere temperatur, knap så gode til årlig nedbør, lidt dårligere til den sæsonmæssige fordeling af nedbør og endnu dårligere til ekstreme nedbørsforhold. Vi kan derfor ikke benytte de rå data fra klimamodellerne direkte som input til en hydrologisk model, men er nødt til at foretage en korrektion (Nedskalering og bias-korrektion), hvor det antages at selv om de absolutte tal fra en klimamodel er fejlbehæftet, så har den trods alt en vis evne til at beskrive hvordan klimaet vil ændre sig. Den mest anvendte korrektionsmetode i dag er Delta Change metoden, hvor det fremtidige klima beskrives ved de historiske klimadata korrigeret med de ændringer, som klimamodellerne fortæller, der vil ske fra det nuværende til det fremtidige klima, i form af månedlige korrektionsfaktorer (Refsgaard et al., 2009).

I CLIWAT er det valgt at benytte A2 scenariet 2071-2100 i forhold til 1961-90 (jf. beslutninger i CLIWAT projektet, PRUDENCE datasæt) til analysen af betydningen af ændret klima-input for indvindings- og grundvandsdannende oplande. Der benyttes 'delta-change' korrektionsfaktorer på månedsbasis jf. tabel 3.1, beregnet ud fra 2071-2100 og sammenlignet med 1961-1990. Disse månedlige korrektionsfaktorer er multipliceret med de observerede daglige nedbørsdata fra 10 km klimagridet fra DMI for perioden 1990-2010.



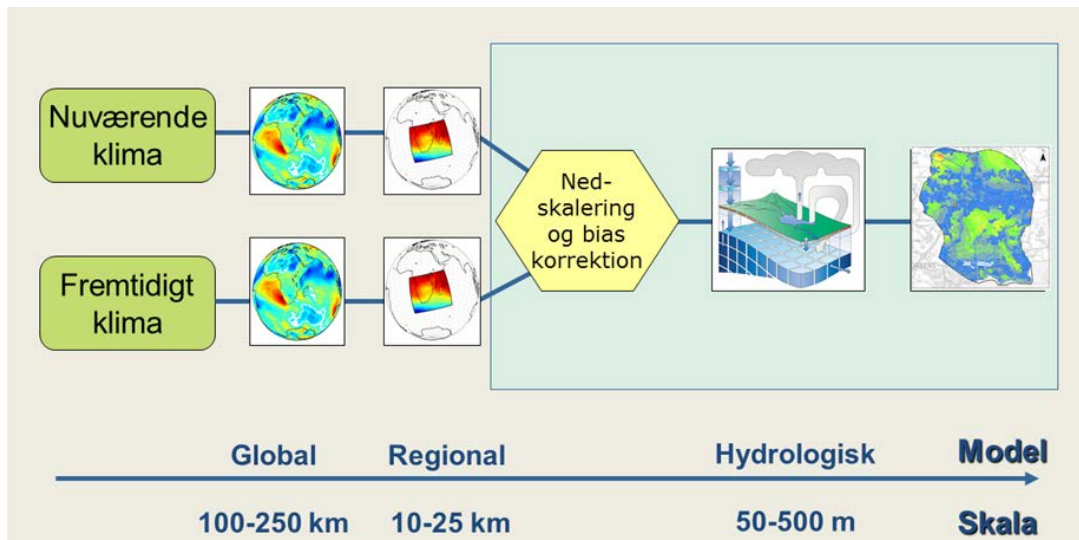


Fig 3.1 Metodik for beregning af klimaændrings effekter på hydrologi og grundvand

For A1B scenariet er input baseret på ENSEMBLE og ECHAM/KNMI modellen som regnes for en 'middelmodel' i ENSEMBLET, altså den der repræsenterer medianen af samtlige de forskellige klimamodeller. For A1B er benyttet en tilsvarende metode, blot er perioden 2081-2100 her sammenlignet med 1991-2010 for at få de månedlige korrektionsfaktorer. Disse er så efterfølgende multipliceret med observerede data fra 10 km klimagriddet fra DMI for 1991-2010.

Tilsvarende metodik er benyttet for hhv. temperatur og potentiel fordampning.

Det anvendte A1B scenarie forventes at give lidt mindre markante effekter af ændret klima sammenlignet med det kraftigere A2 klimascenarie (se tabel 3.1 hvor delta change faktorer er sammenlignet), fordi referenceperioden er den faktiske nutidsperiode 1991-2010, i stedet for 30-års klimaperioden 1961-1990.

Tabel 3.1 Delta change faktorer for vurdering af klimaændringers betydning for vandkredsløb, grundvandsdannelse, grundvandstand og indvindings/grundvandsdannende oplande

	A2 scenariet 2071-2100 ref. 1961-90 Van Roosmalen et al. (PRUDENCE)			A1B scenariet Echam/KNMI 2081-2100 ref. 1991-2010 (ENSEMBLES)		
	Nedbør (relativ)	Temp. (oC abs.)	Fordamp. (relativ)	Nedbør	Temp.	Fordamp.
Januar	1,49	3,51	1,78	1,34	2,51	1,29
Februar	1,51	2,70	1,33	1,12	2,31	1,20
Marts	1,24	2,57	1,09	1,07	1,96	1,10
April	0,95	2,95	1,15	0,92	2,01	1,14
Maj	0,99	2,86	1,09	1,28	2,50	1,08
Juni	1,02	2,35	1,11	0,85	2,26	1,15
Juli	0,92	2,59	1,12	1,00	2,16	1,09
August	0,63	3,53	1,28	0,82	2,12	1,08
September	0,73	4,08	1,33	0,84	2,29	1,14
Oktober	1,20	3,53	1,23	0,93	2,71	1,19
November	1,13	3,82	1,62	1,20	2,58	1,19
December	1,30	3,03	1,64	1,25	2,92	1,19
Okt-Marts	1.31			1.15		

Det fremgår af tabel 3.1 at A1B har "delta change" korrektionsfaktorer for vinterhalvåret (oktober – marts) på 1.15. Sammenlignet hermed har A2 scenariet værdier for vinterhalvåret på 1.31 altså ca. dobbelt så store ændringer i vinternedbøren i forhold til anvendte korrektionsfaktorer for nedbør ud fra A1B. Det betyder, at man med A1B vil se mere moderate ændringer i grundvandsdannelse og grundvandstand og dermed indvindingsoplande end ved A2.

### 3.2 Øvrige usikkerheder

Usikkerhed er særligt vigtig i relation til klimaeffekter fordi hydrologiske modeller ikke kan kalibreres imod data for fremtidige forhold, hvilket betyder at der er større simuleringsusikkerhed, end der ellers vil være, og at man ikke kan validere klimaeffekter på f.eks. hydrologi og grundvand på basis af uafhængige observationsdata.

Når vi ser frem mod ændringer i temperatur og nedbør gælder det desuden, at forskellige modeller (GCM/RCM) er mere enige om fremskrivningen af temperatur ændringerne, end om fremskrivningen af nedbøren i et varmere klima. Det forhold bliver endnu mere udtalt, jo mindre skala der kigges på. Der er altså større usikkerhed på fremskrivningen af nedbøren end temperaturen, og usikkerheden på nedbøren f.eks. 2071-2100 er mere usikker, end hvis analysen havde været for hele Skandinavien.

Når det gælder usikkerheden på emissionsscenariet (A2 versus A1B) så gælder det at usikkerheden først bliver af afgørende betydning frem mod 2100, og har meget mindre betydning f.eks. omkring 2050. Eksempelvis fremskriver både A2 og A1B en stigning i temperaturen på 1.5 – 2 grader frem mod 2050, hvorimod de frem mod 2100 giver væsentlige forskelle. Her har A2 en stigning på ca. 3 grader, mens A1B har stigninger på knap 2,5 grader når det gælder den globale middeltemperatur.

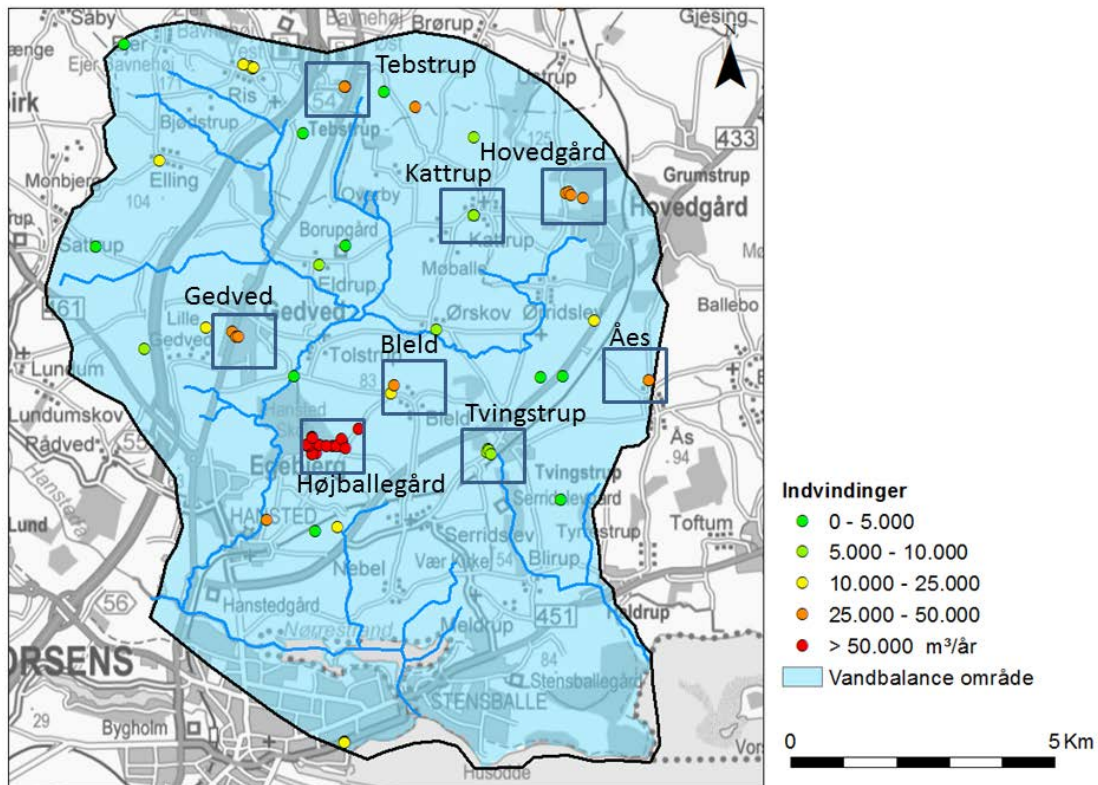
I CLIWAT er benyttet delta-change metoden, og det er formentlig en god tilnærmelse sålænge fokus er ændringer af grundvandstanden i gennemsnit eller indvindingsoplande. I forbindelse med klimaeffekter hvor nedbørsintensiteten er vigtig (f.eks. oversvømmelseshændelser som følge af ekstrem nedbør, eller pesticidudvaskning) benytter man typisk en histogram korrektionsmetode (intensitetsbaseret korrektionsmetode hvor klimamodellens middelværdi og varians er tilpasset referenceperiodens observerede middelværdi og varians).

Dernæst er der usikkerheden på den hydrologiske model. Her er det især parameterusikkerheden men også konceptuel usikkerhed (f.eks. dræne/de ikke dræne arealer) der er i spil. Omkring parameterusikkerheden vil det primært være på de parametre der giver ikke lineære ændringer i f.eks. grundvandstanden i et ændret klima (typisk parametre såsom roddybde, magasinkoefficient, dræntidskonstant osv.). Der er ikke foretaget nogle usikkerhedsvurderinger af Egebjergmodellen.

Endelig er der variabiliteten. Her er der lavet nogle undersøgelser af Hawkins og Sutton (2009) for de britiske øer, der viser den relative betydning af forskellige usikkerheder på klimamodellernes fremskrivning af nedbøren. Der er tale om midling af nedbøren i form af dekadeværdier (10 års glidende gennemsnit). Undersøgelserne har vist, at det i den nære fremtid (10-30 år) gælder at usikkerheden som følge af intern (naturlig) variabilitet i klimamodellerne er langt den vigtigste, altså bl.a. de forskelle der fremkommer når man sammenligner forskellige global og regional modeller, initialbetingelser osv. Disse usikkerheder udgør relativt set 50 – 75 % af det samlede usikkerhedsbånd på nedbøren. Mod slutningen af århundredet, altså når vi ser frem mod 2080-2100 med A1B, så får variabiliteten mindre betydning og udgør nu kun 20-30 % af den samlede usikkerhed. Her får emissionsscenariet lidt større betydning ca. 10 % når det gælder fremskrivning af nedbør over de britiske øer, men altså ikke nogen helt afgørende betydning i forhold til de øvrige scenarier. Det har vi også set fra tidligere undersøgelser i Danmark hvor f.eks. B2 scenariet gav større ændringer i grundvandstanden end A2 scenariet, selvom B2 er mindre voldsomt mht. global opvarmning (Sonnenborg et al., 2006). Den vigtigste usikkerhed relativt set mod århundredets slutning udgøres for nedbøren af den globale klimamodel (GCM). Hvis man inddrager denne usikkerhed, kan man derfor få en noget større usikkerhedsbånd på resultaterne. I Egebjerg er denne usikkerhed ikke inddraget, men der er valgt en GCM/RCM som udgør en slags middelværdi, nemlig ECHAM/KNMI, den tysk / hollandske klimamodel.

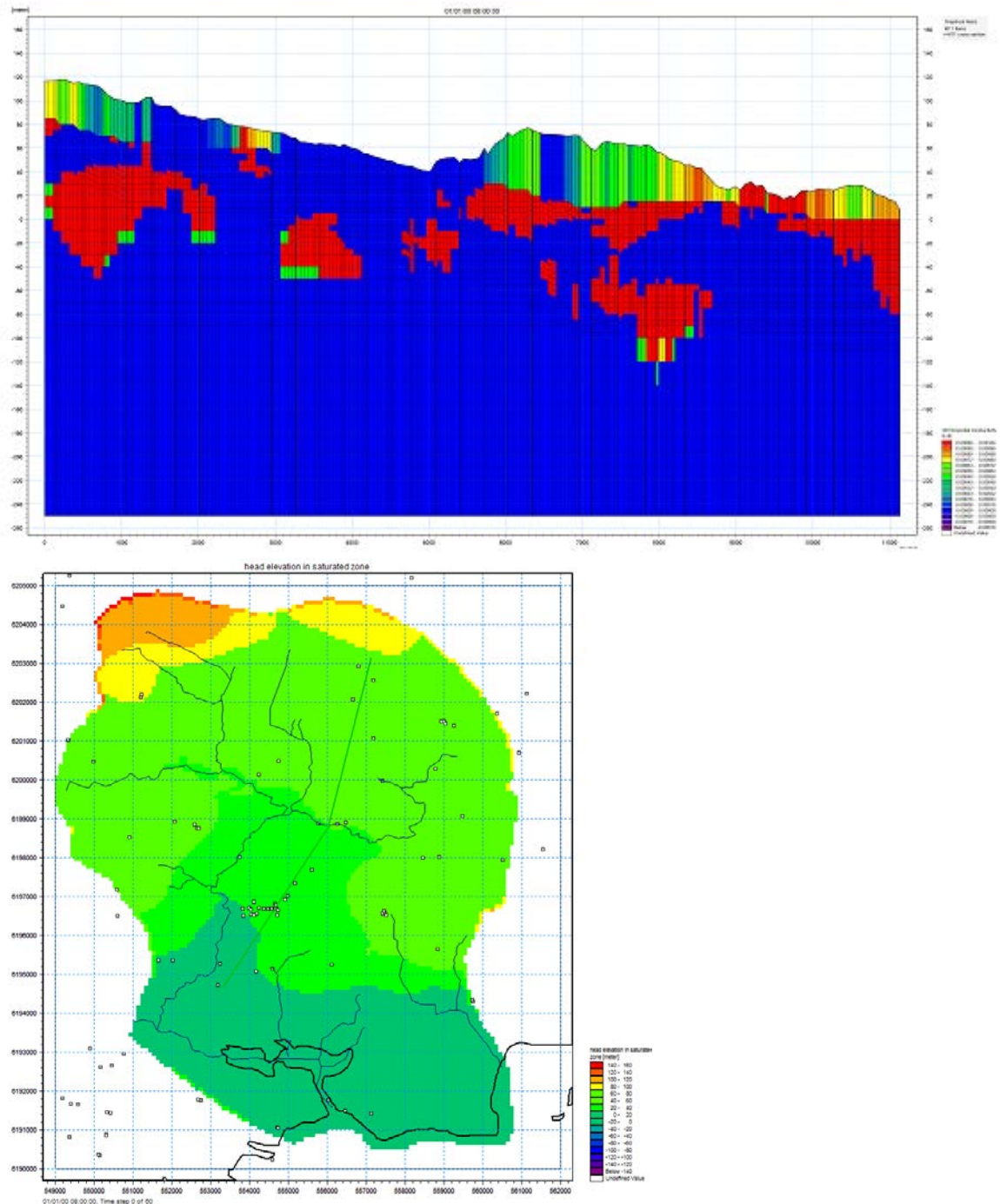
## 4. Modelopstilling

I dette kapitel resumeres kortfattet Egebjerg modelområdet. I Fig. 4.1 er vist en oversigt over de 8 kildepladser der indgår i vurderingen af ændrede indvindings- og grundvandsdannende oplande samt transporttider. Der henvises til Henriksen og Trolborg (2011) for en mere uddybende beskrivelse.



Figur 4.1 Indvindinger samt vandløbsopsætning. Figuren viser indvinding pr. indvindingsboring. For mange af vandværkerne er der flere indvindingsboringer for hver kildeplads. Eksempelvis har Tebstrup 2, Hovedgård 4, Gl. Katstrup 3, Højballegård 17, Tvingstrup 4 og Gedved 4 indvindingsboringer tilhørende kildepladsen

Figur 4.2 viser vertikal diskretisering af modellen. Modellen har 30 beregningslag. Det øverste lag er fastlagt med bunden 2 meter under grundvandsspejlet, dog således at bunden af lag 1 føres ned til det nærmeste 5-meter niveau, så bunden er i overensstemmelse med diskretiseringen af den geologiske model. Det vil sige at bunden af lag 1 vil ligge mellem 2 og 7 meter under grundvandsspejlet. Som minimumslagtykkelser er valgt 5 meter, og det betyder, at modellen er i stand til at opløse lagfølgen, f.eks. omkring Højballegård kildepladsområdet. Randbetingelser til modellen udgøres af no-flow randbetingelser langs vestlige, nordlige og østlige rand. Mod syd er anvendt et fastholdt trykniveau langs fjorden og i øverste modellag for Nørrestrand.



Figur 4.2 Nederst: Område med placering af NØ-SV tværsnit, indvindinger og vandløb. Øverst: Tværsnit med vertikal diskretisering. Farveskalaen på øverste figur illustrerer horisontal hydraulisk ledningsevne ud fra intialparametre, hvor rødt betyder høj ledningsevne (jf. sand) og blått lav ledningsevne (jf. ler). Farveskalaen på nederste figur illustrerer grundvandspejlets variation.

Effekter af havstigninger er ikke inkluderet i Egebjergmodellen, hvilket begrundes med at det med Egebjergmodellen er effekter i nogen afstand fra kysten der er i fokus. I KIMONO (Koncept for integreret vurdering og risikostyring af punktkildeforureninger i kystzonen)/Horsens Fjord model projektet belyses effekter at havstigning detaljeret.

## 5. Modellens dokumenterede anvendelsesområde

Nærværende afsnit giver et kort resume over hvilke anvendelser (geografiske områder, typer af beregninger, nøjagtighedsniveau) modellen er dokumenteret gyldig for ud fra valideringstest og som beskrevet i detaljer i kortlægningsrapporten (Henriksen og Troldborg, 2011).

Vurderingen er i Henriksen og Troldborg (2011) foretaget i forhold til tre temaer:

- 1) detaljeret afgrænsning af det samlede indvindingsopland og grundvandsdannende opland til de 8 vandværker i området (som indbyrdes er stærkt afhængige og indbyrdes påvirkede af indvindingen ved Højballegårdværket)
- 2) detaljeret vurdering af de samlede vandbalanceforhold, grundvandsdannelse, udbredelse af sænkninger og vandløbspåvirkning og dermed bæredygtig udnyttelse
- 3) screening i forhold til klimaeffekter på grundvandsforhold (ændret grundvandstand og ændrede indvindingsoplande/grundvandsdannende oplande)

I forbindelse med kortlægningsopgaven var vurderingen, at modellen for Egebjerg udgør et solidt og det bedst mulige faglige grundlag for vurderingen af ovenstående 3 temaer. Heri lå implicit, at argumentationen om modellens gyldighed og anvendelsesområde, tog sit udgangspunkt "på det foreliggende kortlægningsgrundlag". Vurderingen var dermed delvist baseret på kvalitative kriterier, således kunne modellen ikke honorere performancekrav til simulering af vandføringen. De hydrologiske observationsdata blev i øvrigt vurderet spinkle.

I forbindelse med CLIWAT analyserne i nærværende rapport, er en revurdering af datagrundlaget relevant baseret på en kritisk analyse af detailkortlægningsgrundlaget med udgangspunkt i de anbefalinger der er nævnt i kortlægningsopgaven (Henriksen og Troldborg, 2011, side 106-107). Her hedder det bl.a., at beregninger af oplande (tema 1) er baseret på aktuelle indvindinger 2006-2008 ligesom "Det anbefales at foretage en simulering af grundvandsdannende oplande og indvindingsoplande i forhold til tilladelser". Det var begrundet med, at Højballegårdværket blev analyseret med en indvinding der oversteg tilladelsen, mens øvrige vandværker havde indvindinger lidt under tilladelsen. En simulering ud fra tilladelsen for samtlige 8 vandværker, kan derved belyse hvor stor betydning ændringer i den indbyrdes fordeling af vandindvindingen for de 8 vandværker kan have på oplandsvurderingerne. En kørsel med tilladelser ville derfor kunne belyse dette forhold.

I nærværende rapport har GEUS derfor valgt at inkludere resultaterne af en kørsel med tilladelser. Resultatet af denne simulering ud fra tilladelser er beskrevet i det efterfølgende kapitel 7 Tilladelser. I kapitel 8 Resultater foretages en beskrivelse af resultaterne for A2 scenariet, som i øvrigt var vedhæftet kortlægningsrapporten i Appendiks 1 (Henriksen og Sonnenborg, 2011). Denne del udbygges og vurderes i forhold til øvrig viden omkring klimaeffekter og hydrologi, bl.a. fra Horsens fjord modellen (KIMONO projektet). Denne diskussion beskrives i kapitel 9 Diskussion. I det følgende kapitel skal scenarie opstillingen kort resumeres.

## 6. Scenarieopstillinger

### 6.1 Opstilling af scenarier

Der er i Kortlægningsområdet Egebjerg udpeget i alt 8 kildepladsoplande for hvilke der skal vurderes grundvandsdannende oplande og indvindingsoplande:

Tabel 6.1 Indvindingsmængder for vandværker der indgår i partikelbanesimuleringer. Med parentes er angivet hvor stor en procentdel indvindingen fordeler sig over hele indvindingsmængden for de 8 vandværker.

Vandværk	Nr.	Tilladelse m <sup>3</sup> /år	Aktuel indvinding m <sup>3</sup> /år 2006-2008
Hovedgård VV amba	72296	130000	120000 ( 3 %)
Gl. Katrupvej VV	82297	32400	27000 ( 1 %)
Højballegårdværket	72322	2800000	3000000 ( 87 %)
Tvingstrup VV	72376	40000	30000 ( 1 %)
Åes VV	72377	40000	29000 ( 1 %)
Blæld VV	72937	25000	22000 ( 1 %)
Gedved VV	74466	240000	160000 ( 5 %)
Tebstrup VV	80210	73000	65000 ( 2 %)
I ALT indenfor modelområde		3380400	3453000 (100 %)

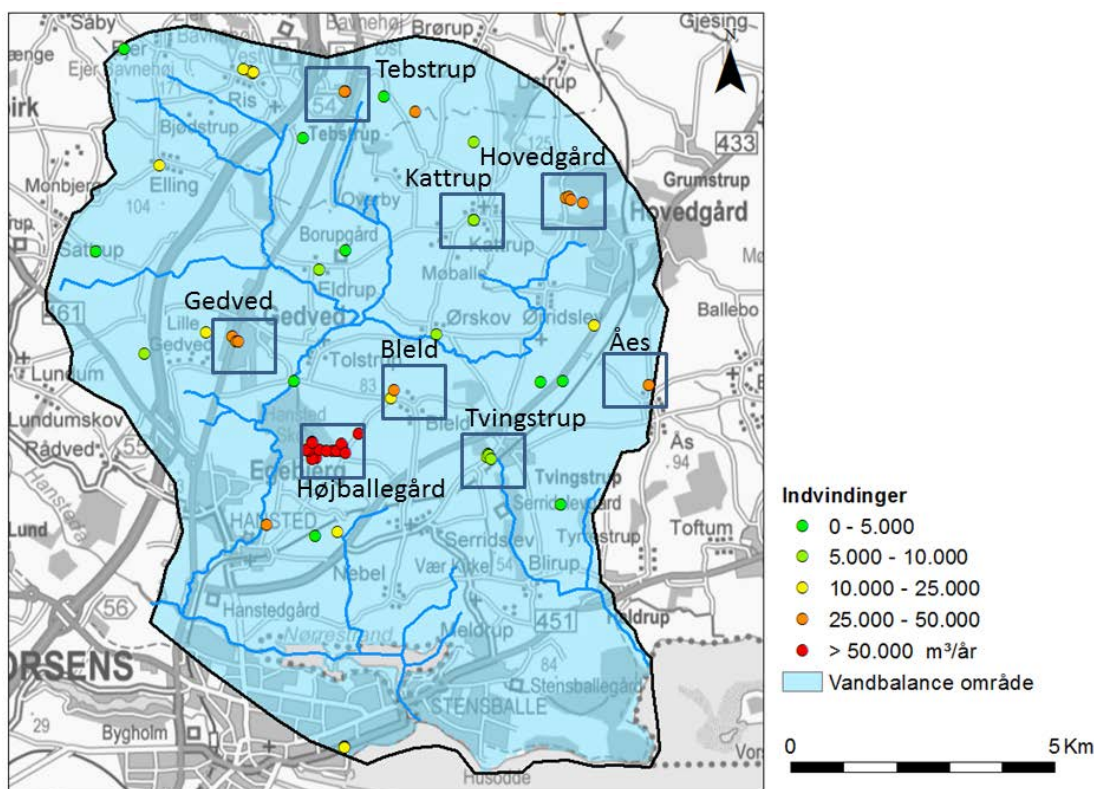
Det fremgår af tabel 6.1 at aktuel indvinding for 2006-2008 er af samme størrelsesorden som tilladt indvinding. Aktuel indvinding anvendes derfor i beregningsscenarier (A2 scenariet). Højballegård udgør i alt 87 % af indvindingen fra de 8 vandværker og dominerer derfor mht. udnyttelse af grundvandsmagasinerne.

I beregningerne ud fra tilladelser er i kapitel 7 som nævnt ovenfor foretaget en sensitivitetsvurdering på baggrund af tilladt indvindingsmængde.

For øvrige vandindvindinger udover de otte vist i tabel 6.1 er anvendt tal for aktuelle op-pumpninger (2006-2008) i simuleringerne. Øvrige vandindvindinger indgår i beregningen men vises ikke på figurer med partikelbanesimuleringer for boringer i relation til grundvandsdannende oplande og indvindingsoplande. I fig. 6.1 er placeringen af indvindinger vist.

De scenarier der indgår i nærværende rapport er beskrevet i tabel 6.2

Indvindingsoplande samt grundvandsdannende oplande bestemmes ved brug af partikeltransportmodulet i MIKE SHE (PT-modulet). MIKE SHE PT anvender strømningsfelter fra beregning af vandstrømningsmodellen. Der er mulighed for at benytte en transient strømningssimulering, genbruge en periodisk strømningssimulering, eller benytte et stationært (eller rettere et øjeblik) strømningsmønster.



Figur 6.1 Aktuell indvinding i modelområdet på indvindingsboringsniveau

Tabel 6.2 Scenarier

Scenarium	Navn	Klima	Indvindingsstruktur / mængde
I - 2a	Reference	Aktuel 1991-2010	Aktuel 2006-2008
II - 4a	Fremtidigt klima A1B	A1B 2081-2100 i forhold til ref. 1991-2010	Aktuel 2006-2008
III - 2d	Tilladelser	Aktuel 1991-2010	Tilladelse
IV - 4c	Fremtidigt klima A2	A2 2071-2100 i forhold til ref. 1961-1990	Aktuel 2006-2008

Periodisk strømningssimulering er benyttet for alle scenarier, hvor perioden 1991-2009 er "recyklet" (der ses dermed bort fra det første år 1990 for at undgå initial effekter).

Transporttider i grundvandszonen er ofte meget store, nogle gange adskillige hundrede år eller mere. Der er gennemført PT simuleringer svarende til 500 år med anvendelse af en effektiv porøsitet på 0,1. Initialt er benyttet 100 partikler (tilfældigt fordelt indenfor cellerne på 100x100 m) i hver beregningscelle i det øverste modellag i grundvandsmodellen for



partikelbanesimuleringerne af grundvandsdannende oplande og indvindingsoplande. For de øvrige lag er benyttet 4 partikler fra hver beregningscelle (100x100 m).

Arbejdsgangen er som følger. Først køres en 'forward' kørsel for 1990-2009 med den vandindvinding der benyttes i det pågældende scenarie (enten aktuel indvinding 2006-2008 eller ingen indvinding). Herefter køres refkørslen med initialbetingelser fra forward kørslen. Dvs. modellen har kørt i 2x20 år, og antages derfor at være i ligevægt i forhold til ændringerne i vandbalancen. Hver kørsel afsluttes med partikelbanesimulering, hvor strømningsmodellen recykles og køres i alt 500 år, med henblik på at afgrænse indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande for en lang årrække.

## 7. Tilladelser

I figur 7.1-7.5 er vist simulerede oplande ud fra tilladelser, hvor der er zoomet ind på kildepladser:

1. Højballegårdværket (Fig. 7.1)
2. Gedved VV i det vestlige område (Fig. 7.2)
3. Tebstrup, Katstrup og Hovedgård VV i det nordlige område (Fig. 7.3)
4. Bleld VV indhyllet i Højballegård området (Fig. 7.4)
5. Tvingstrup og Åes VV, i det sydøstlige område (Fig. 7.5)

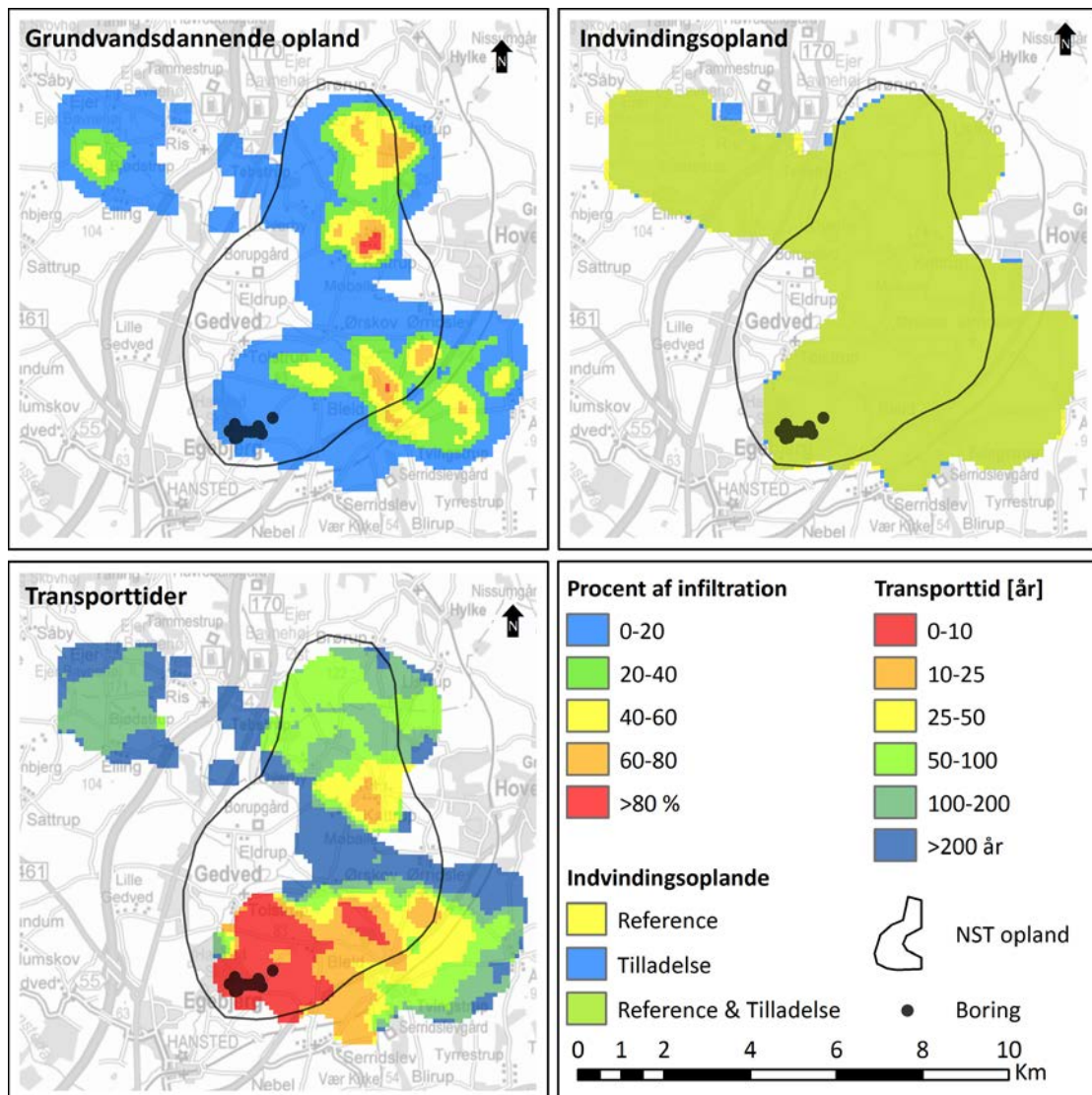
Generel metodik, se kortlægningsrapporten (Henriksen og Troldborg, 2011).

På figurerne af indvindingsoplande (Fig. 7.1-7.5 øverste figur til højre) er vist resultater fra partikelbanekørsler for tilladt indvinding (Scenarie III – 2d, Tabel 6.2) sammenlignet med referencen (Scenarie I – 2a, Tabel 6.2). Fællesoplandet for tilladelser (Scenarie III) og reference (Scenarie I) er vist med en vissengrøn farve (i legende markeret som Reference & Tilladelse). Det vil sige at både reference og tilladelse er enige om at det "vissengrønne" område er en del af indvindingsoplandet. Det vil sige, der er både blå (tilladelse) og gult (Reference) bag hvert eneste grid i det vissengrønne område. For de gule grids (Reference) gælder, at de er en del af indvindingsoplandet for referencekørslen, men ikke er en del af oplandet for tilladelsen. Omvendt betyder blå grids, at disse ligger udenfor indvindingsoplandet for tilladt indvinding, men indenfor indvindingsoplandet for referencen. Der er generelt meget små forskelle mellem tilladelse og reference.

På temaet grundvandsdannende opland (Fig. 7.1-7.5 øverste figur til venstre) er vist resultatet for tilladelsen. Denne kan så sammenlignes med de tilsvarende resultater for aktuel indvinding i Henriksen og Troldborg (2011), jf. Fig. 13.11-13.15 s. 92 - 96. Signaturen procent infiltration (0-20, 20-40 osv.) er relateret til det grundvandsdannende opland og viser hvor stor en del af infiltrationen der udtrykt ved antal partikler i forhold til de 100 der initialt blev frigivet i hver kasse, der havner i kildepladsens borer (vist for tilladt indvinding, altså som et relativt mål for grundvandsdannelsen indenfor det afgrænsede grundvandsdannende opland).

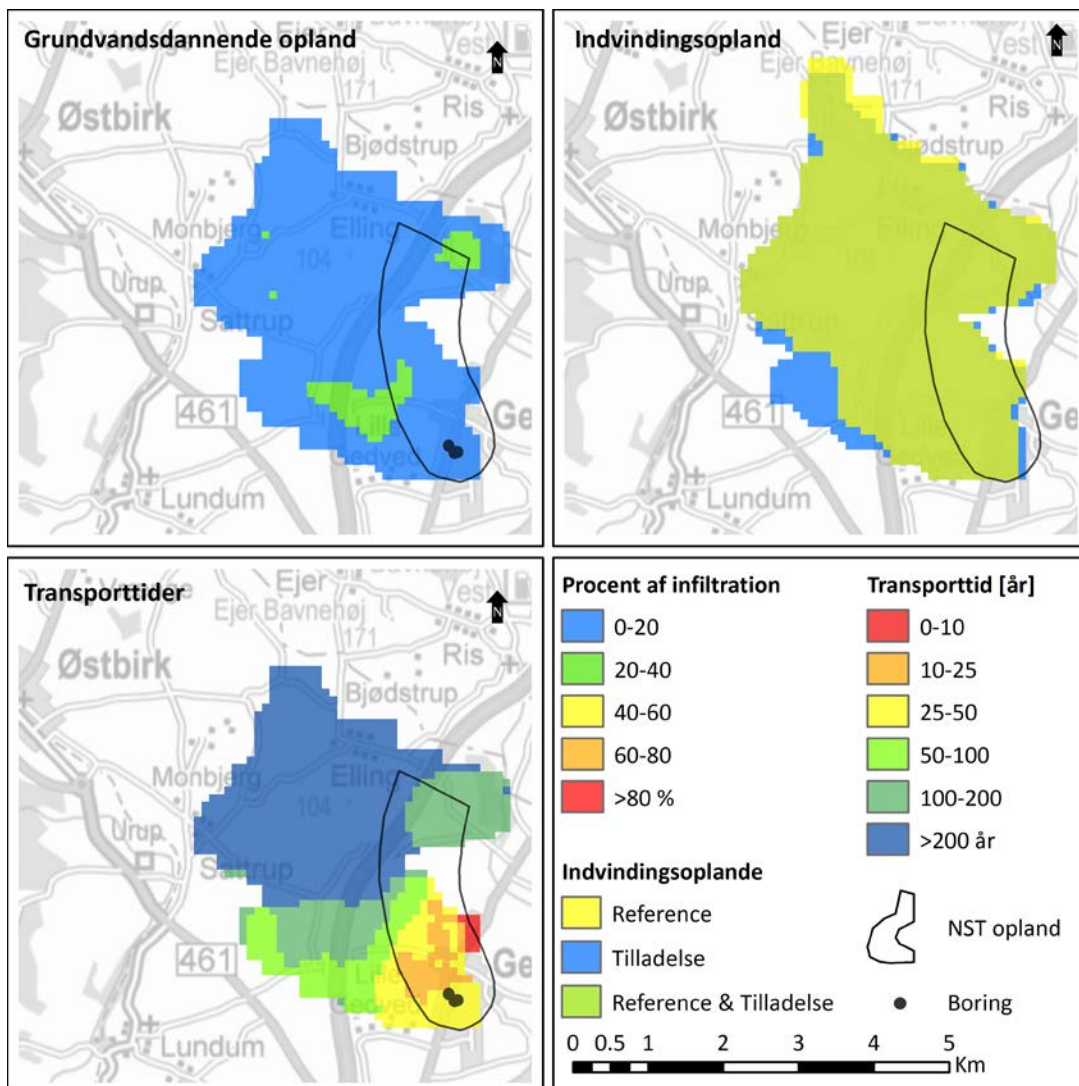
Endelig er på det sidste tema vist transporttider vurderet ud fra modellen (der er benyttet en effektiv porøsitet på 0,1). Transporttiden er vist i intervaller med hhv. 0-10, 10-25, 25-50, 50-100, 100-200 og > 200 år med en farveskala hvor rød-gule nuancer har kort transporttid, mens blå-grønne nuancer har lang transporttid på op til 500 år.

Desuden er vist NST oplande baseret på indvindingsoplande fra Regionplan 2005, se Sandersen et al. (2009), i legende betegnet "NST opland" (som sammenligningsgrundlag i forhold til indvindingsoplande).



Figur 7.1 Grundvandsdannende opland, indvindingsopland og transporttider for Højballegårdværket baseret på tilladt indvinding.

Resultatet for Højballegård (Fig. 7.1) viser at beregningerne med tilladt indvinding (i alt 2.8 mio. m<sup>3</sup>/år) i forhold til Reference (i alt 3.0 mio. m<sup>3</sup>/år) giver relativt små forskelle ved en ca. 7 % reduceret indvinding ved Højballegård, og en mindre forøgelse ved øvrige vandværker. Forskelle i indvindingsoplandet er mest markante ved den nordlige afgrænsning. Det er dog bemærkelsesværdigt at forskellene er ca. dobbelt så store, som de tilsvarende forskelle i indvindingsoplandet for A1B scenariet for et fremtidigt klima. En 7 %'s ændring i indvindingen ved Højballegårdværket giver altså ca. dobbelt så store forskelle som en ændring i nettonedbøren i et fremtidigt klima ved A1B scenariet. Følsomheden i forhold til indvindingsmængden (indirekte effekter af klimændringer) er dermed mere markant end de direkte klimaeffekter som følge af ændret nedbør, temperatur og fordampning ved A1B scenariet. Også for de grundvandsdannende oplande og transporttider ses nogen moderate forskelle (som fremkommer ved sammenligning med Fig. 13.11 i kortlægningssrapporten se Henriksen og Troldborg, 2011).

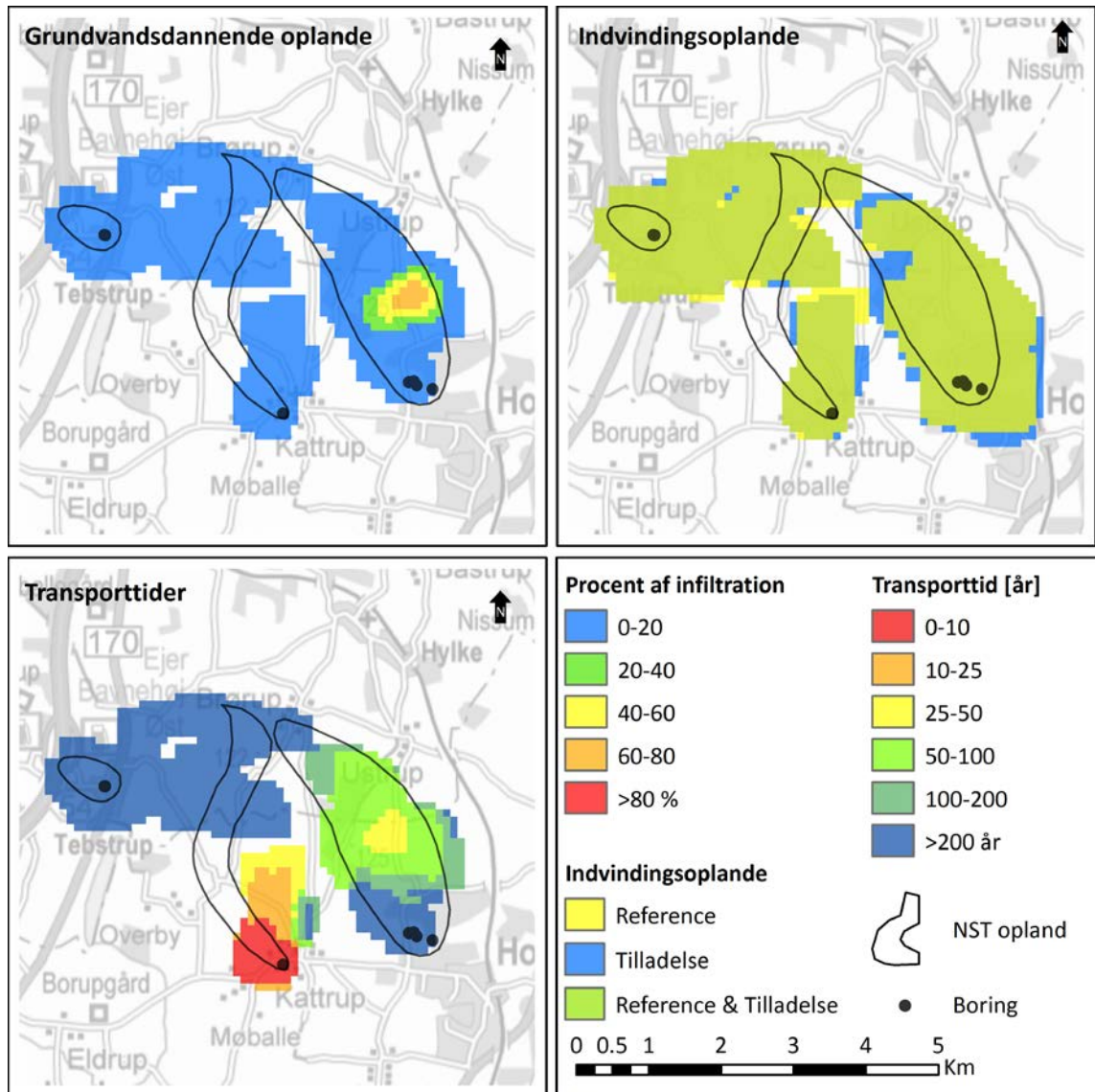


Figur 7.2 Grundvandsdannende opland, indvindingsopland og transporttider for Gedved VV basseret på tilladt indvinding.

For Gedved VV (240 t. m<sup>3</sup> pr. år jf. tilladelse mod 160 t m<sup>3</sup>/år for aktuel indvinding dvs. forøget 50 % i forhold til referencen, samtidig med det sydvest for beliggende Højballegårdværk i simuleringen har reduceret indvinding på ca. 7 %) er i Fig. 7.2 vist tilsvarende resultater. Disse forskelle betyder at indvindingsoplandet for Gedved VV ved tilladt indvinding forøges ganske markant mod vest (op til 1 km) og moderat i østlig retning (100-200 m). Mod nord reduceres indvindingsoplandet (op til 400 m).

Det grundvandsdannende opland får ændret såvel udstrækning som procent infiltration. I forhold til A1B som havde 3 sammenhængende områder hvor 20-40 % af infiltrationen havnede i kildepladsen, så er der på Fig. 7.2 ved tilladt indvinding kun 2 sammenhængende områder tilbage i den østlige og sydlige del af oplandet. Transporttiderne har også moderate ændringer specielt i den sydlige del hvor det grundvandsdannende opland ved tilladt indvinding er beliggende meget tættere på hovedvej 461, end for A1B jf. Fig. 13.12 (Hen-

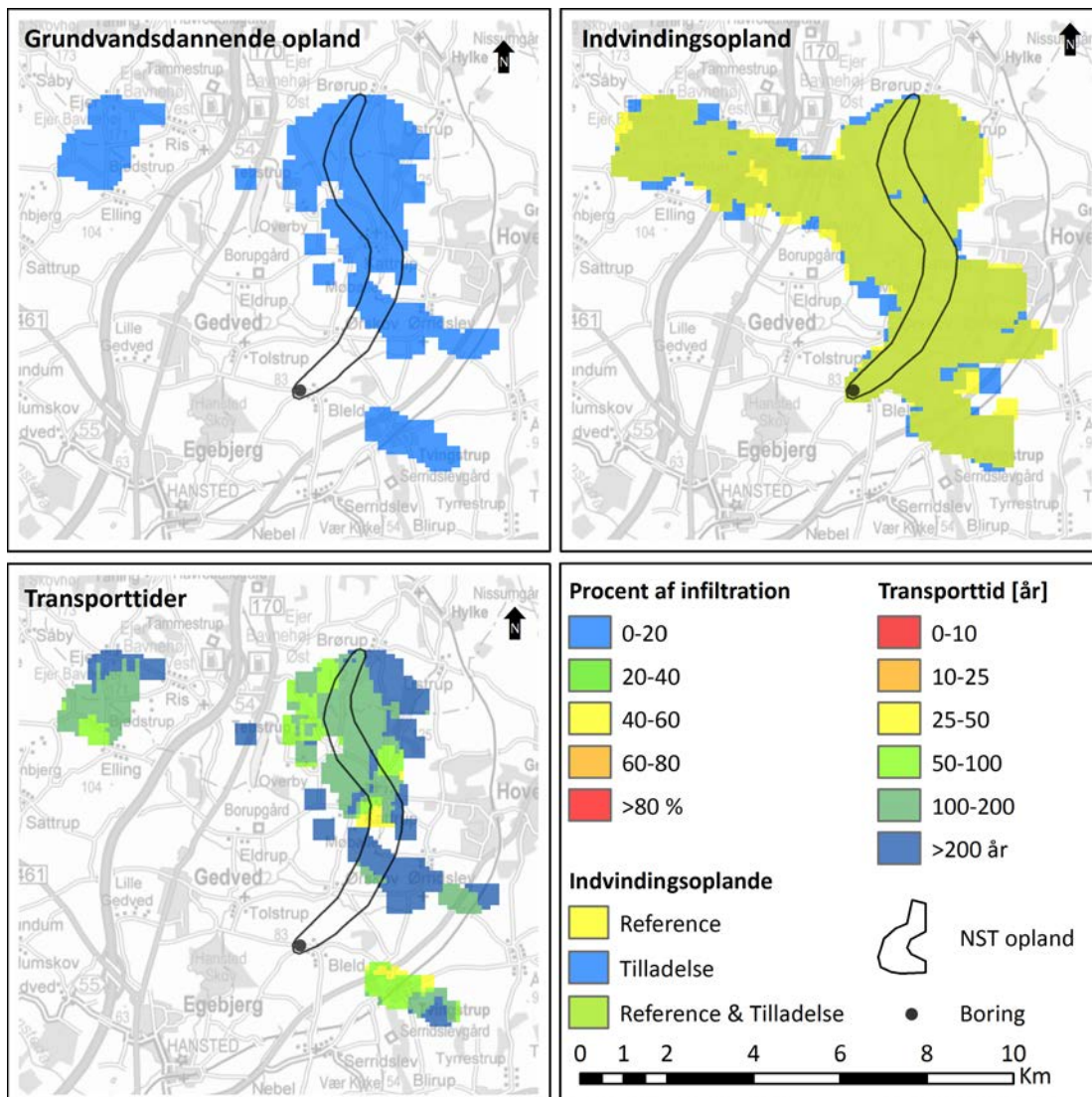
riksen og Trolborg, 2011). Den markante ændring for Gedved VV fra aktuell til tilladt indvinding har dermed stor effekt, men effekten kompliceres af de modsatrettede ændringer ved Højballegårdværket. Igen er det dog konklusionen af de indirekte effekter ser ud til at have langt større betydning end de direkte effekter af klimænderinger for placering af indvindingsoplande for et område som Egebjerg med dybe begravede dale i en afstand fra kysten hvor havniveau ændringer ikke spille nogen rolle.



Figur 7.3 Grundvandsdannende opland, indvindingsopland og transporttider for Tebstrup, Katstrup og Hovedgaard VV baseret på tilladt indvinding.

For de nordlige vandværker Tebstrup, Katstrup og Hovedgaard (samlet forøget ca. 11 % i forhold til referencen, samtidig med det syd for beliggende Højballegårdværk i simuleringen har reduceret indvinding ca. 7 %, mens det syd for Tebstrup beliggende Gedved har øget indvinding på 50 % ved tilladelsen) er i Fig. 7.3 vist tilsvarende resultater. Forventeligt større indvindingsoplande specielt omkring Hovedgaard VV (også større ændringer end for

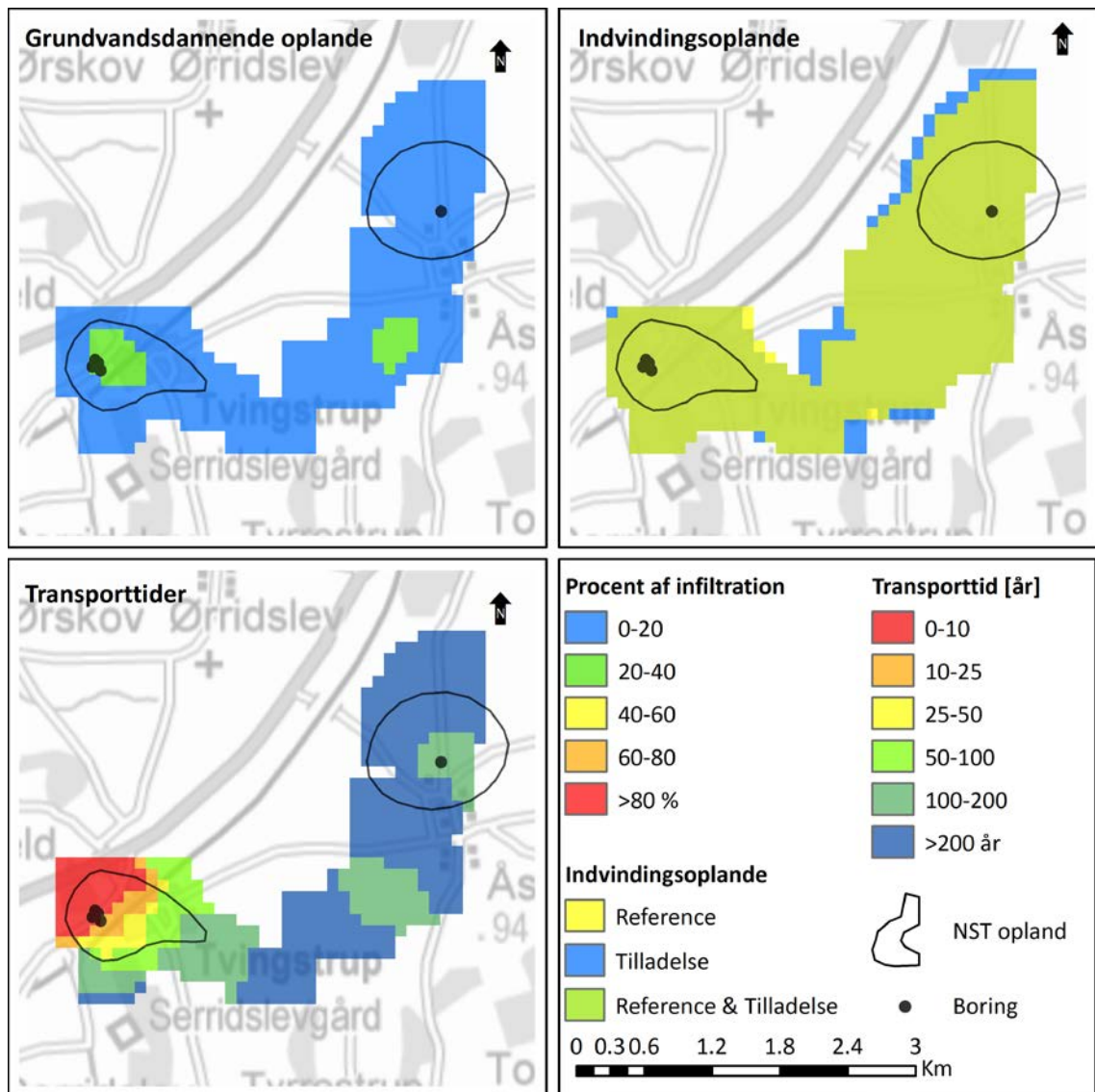
A1B), men kun moderate ændringer for de to øvrige oplande (i samme størrelsesorden som A1B), mens Tebstrup ikke kan udvide sig i sydlig retning på grund af Gedved VV.



Figur 7.4 Grundvandsdannende opland, indvindingsopland og transporttider for Bleid VV baseret på tilladt indvinding.

Bleid VV har øget indvinding på 20 % ved tilladelsen (25 t. m<sup>3</sup>/år) mod 22 t. m<sup>3</sup>/år ved aktuel indvinding. Det er et lille vandværk beliggende inde i indvindingsoplandet til Højballegård VV, som altså har reduceret indvinding på 7 %.

Igen er ændringerne i indvindingsoplandet ganske bemærkelsesværdige og dermed meget følsomme overfor selv en begrænset ændring i indvindingen såvel regionalt som lokalt, typisk et par hundrede meter for tilladelse i forhold til aktuel indvinding. Beliggenhed af grundvandsdannende oplande og transporttider er moderat ændret.

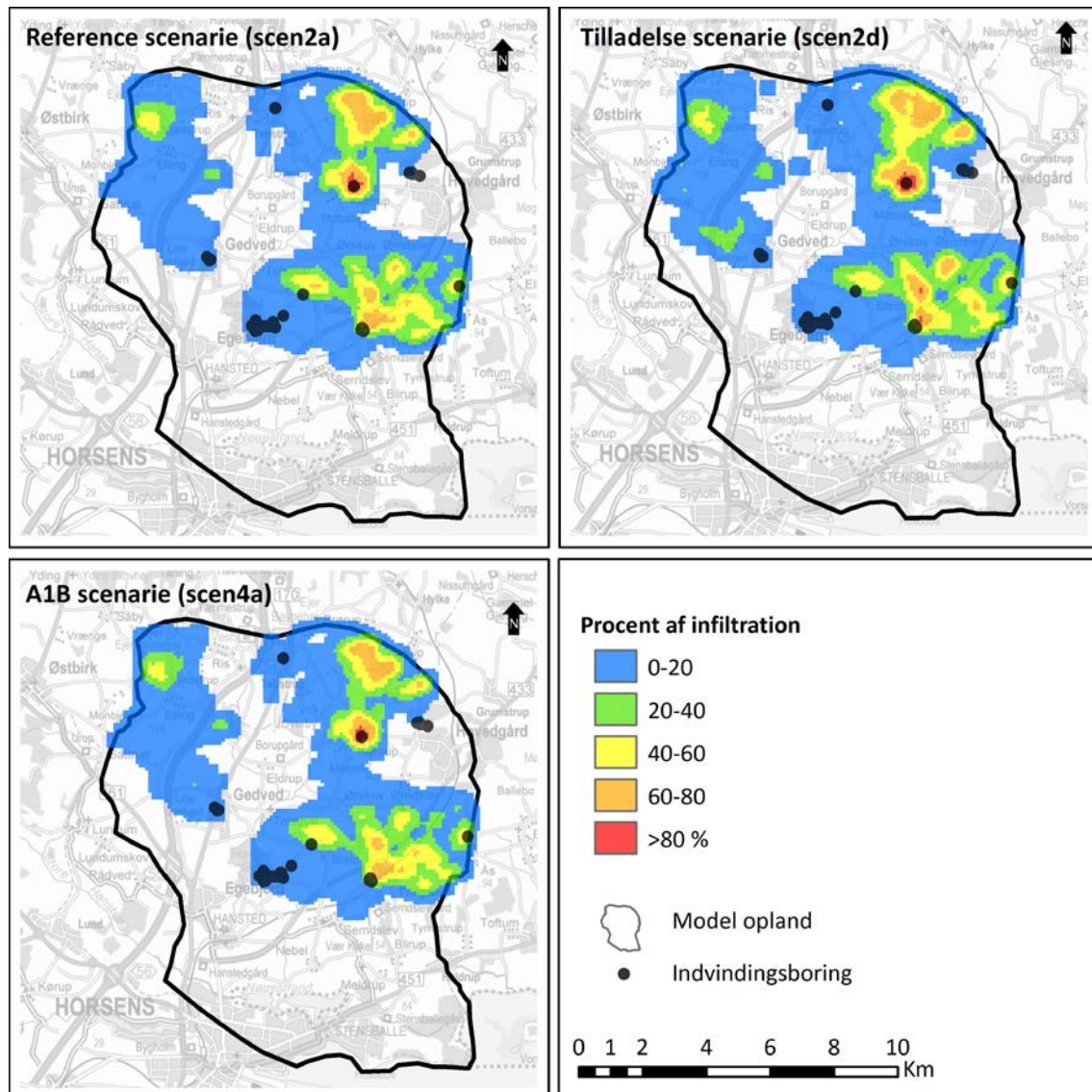


Figur 7.5 Grundvandsdannende opland, indvindingsopland og transporttider for Tvingstrup og Aes VV basseret på tilladt indvinding.

Resultater for Tvingstrup og Aes VV med en samlet øget indvinding på 16 % for tilladelse i forhold til aktuell indvinding og med en beliggenhed af kildepladserne øst for Højballegårdværket (hvor tilladelsen har 7 % reduceret indvinding) viser forøget indvindingsopland mod nordvest og syd (Aes). Ændringerne er større end resultater for ændret klima (A1B) jf. Fig. 13.15 (Henriksen og Troldborg, 2011). For Tvingstrup og Aes VV ses resultater som for øvrige kildepladser, dvs. de indirekte effekter af f.eks. ændret vandindvinding som følge af klimaændring eller ændring af kildepladser pga. nedlukning/flytning har mindst lige så stor, og formentlig meget større betydning end de direkte effekter (ændret nedbør, temperatur og fordampning) for et område som Egebjerg med dybe begravede dale. Konklusionen er, at indirekte effekter af klimaændringer og ikke kun ændret nedbør skal tages i regning, hvilket vil kræve scenarieudvikling med fokus på indirekte effekter, dvs. ændret indvinding, ændret arealanvendelse (og markvanding), ændrede afgrødeforhold og ændret dræning.

Disse forhold inddrages ikke eksplicit i den detailkortlægning og indsatsplanlægning der gennemføres i dag.

I Fig. 7.6 er vist en sammenstilling af resultaterne af tilladelser for referencescenariet (I – 2a), A1B scenariet (II – 4a) og Tilladelser (III – 2d) med hensyn til grundvandsdannende oplande.

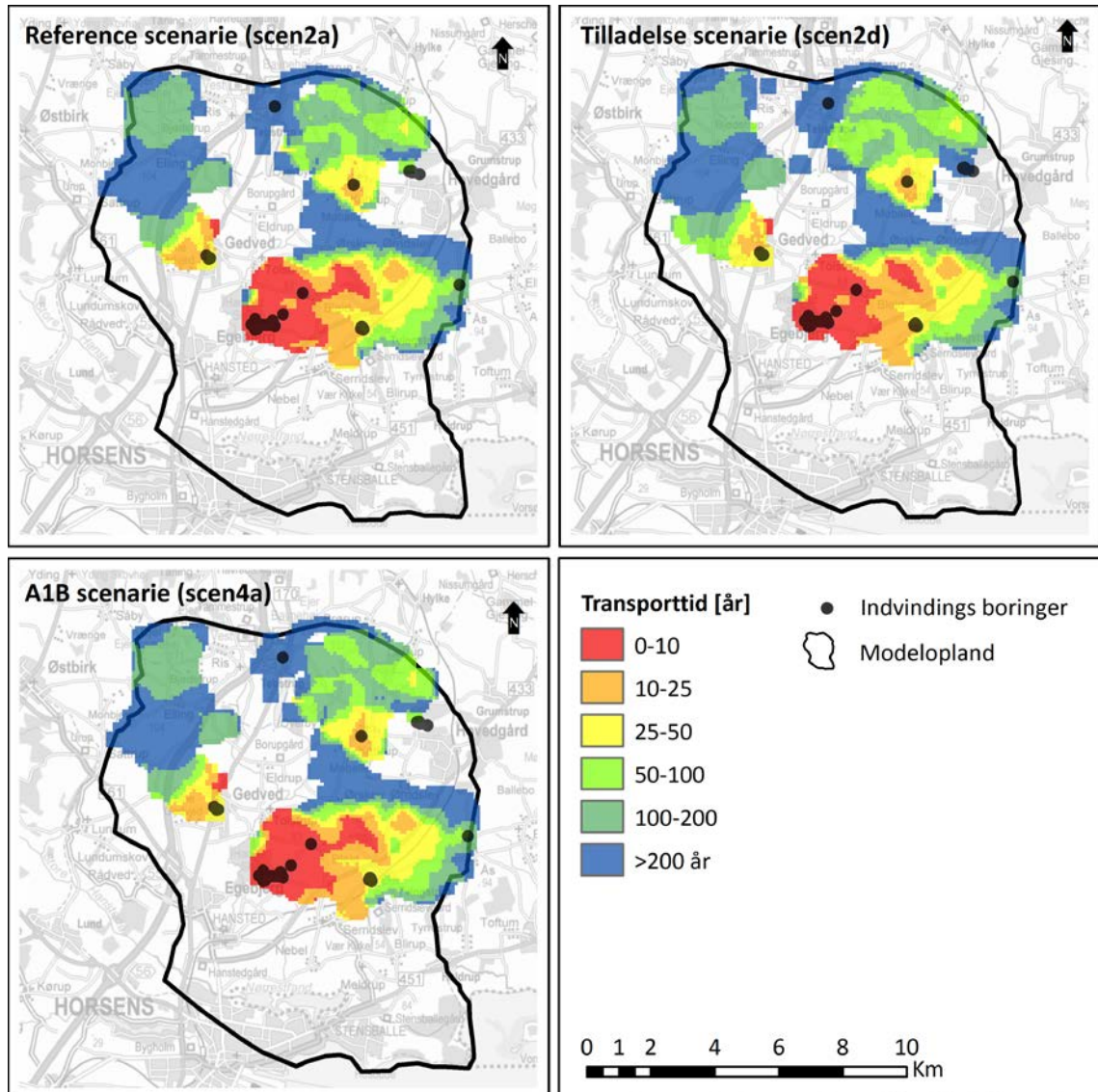


Figur 7.6 Grundvandsdannende oplande for Referencescenarie (I – 2a), A1B scenariet (II – 4a) og Tilladelser (III – 2d) for Egebjergoplandet som helhed.

Mest bemærkelsesværdigt er det nok at tilladelser har stor betydning i de tilfælde at der er tale om markante ændringer i vandindvindingen mellem aktuel indvinding (2006-2008) og tilladt indvinding, som det for eksempel er tilfældet for Gedved oplandet i et område med 20-40 % infiltration omkring motorvejen vest for Gedved, et område der ikke fremkommer i hverken reference scenariet eller ændret klima med de aktuelle indvindinger. Det indikerer,



at indirekte effekter af ændret klima for et område som Egebjerg med dybe begravede dale kan give større forskelle end de direkte effekter der traditionelt indgår i detailkortlægningen. Også omkring Hovedgaard og Tøbstrup og flere af de øvrige kildepladser giver sensitivitetssanalysen ud fra tilladelser mere markante ændringer sammenlignet med A1B scenariet. I Fig. 7.7 er tilsvarende resultater vist for transporttider.



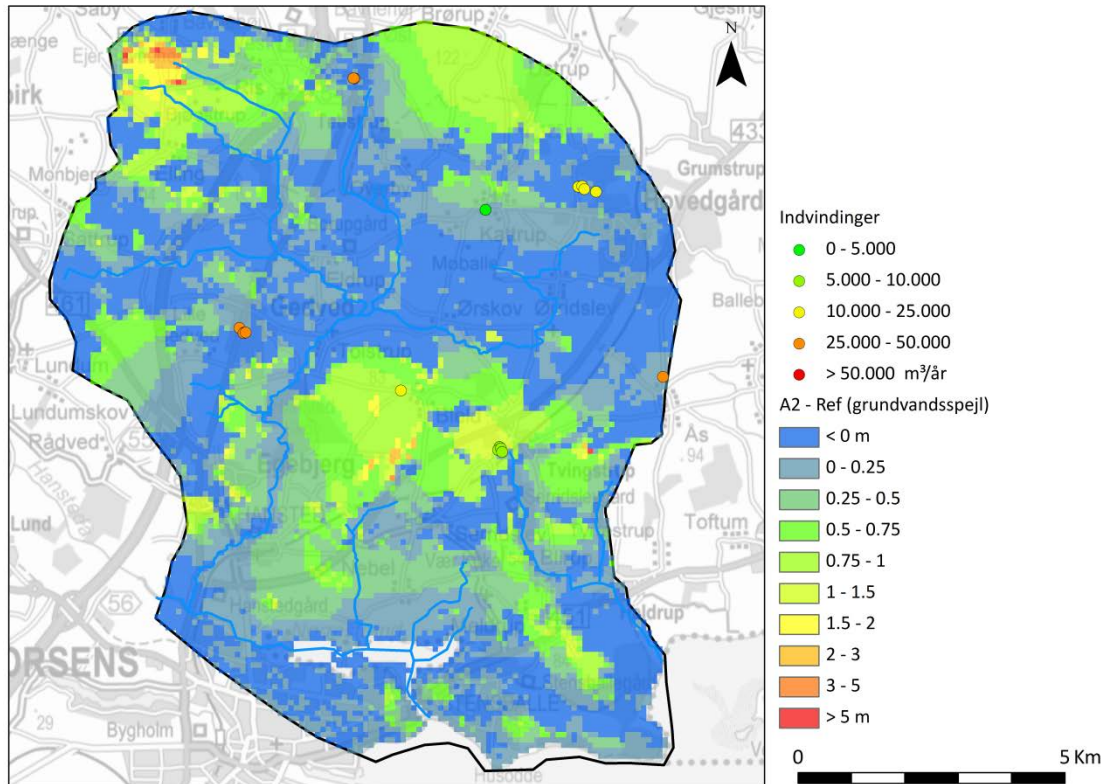
Figur 7.7 Transporttider for Referencescenarie (I – 2a), A1B scenariet (II – 4a) og Tilladelser (III – 2d) for Egebjergområdet som helhed.

Som det ses af Fig. 7.7 er der nogle områder med forskelle på transporttider specielt for Tilladelser, der er større end for A1B sammenlignet med referencen f.eks. tæt på Hovedgaard VV, opstrøms Højballegårdværet (2 – 4 km opstrøms i nordøstlig retning) samt moderate forskelle i øvrige områder.

I og med at der i beregningerne regnes på gennemsnitlige oppumpninger, og de ændringer der er indregnet for f.eks. den store indvinding ved Højballegaard (hvor forskellen i forhold til tilladelser på 7 % er lille i forhold til de tidlige variationer, der reelt er i oppumpningen og pejleserier i området) jf. Fig. 4.2/4.3 og Fig. 4.6 i kortlægningsrapporten (Henriksen og Troldborg, 2011). Forskelle der for Højballegaard (Fig. 4.2) har været meget markante i de historiske tidsserier. I forhold til fordelingen mellem overfladenære og dybe boringer, har der dermed været væsentligt større variationer end de forskelle på 7 % der indgår i sensitivitetsanalysen (indvindingen har samlet set svinget mellem 5 mio. m<sup>3</sup>/år og 2.5 mio. m<sup>3</sup>/år gennem de sidste 20-30 år). Når der hertil lægges, den udvikling der har været i indvindingen, hvor mange boringer på Højballegårdværket enten er lukket eller flyttet til større dybde, og hvor start/stop af boringer derudover giver anledning til sæsonmæssige variationer i grundvandsniveauet på adskillige meter, så vurderes det at de indirekte effekter af klimaændringer, altså variation og ændring i vandindvinding overskygger betydningen af de direkte effekter.

## 8. Resultater for A2 emissionsscenarioet 2071-2100

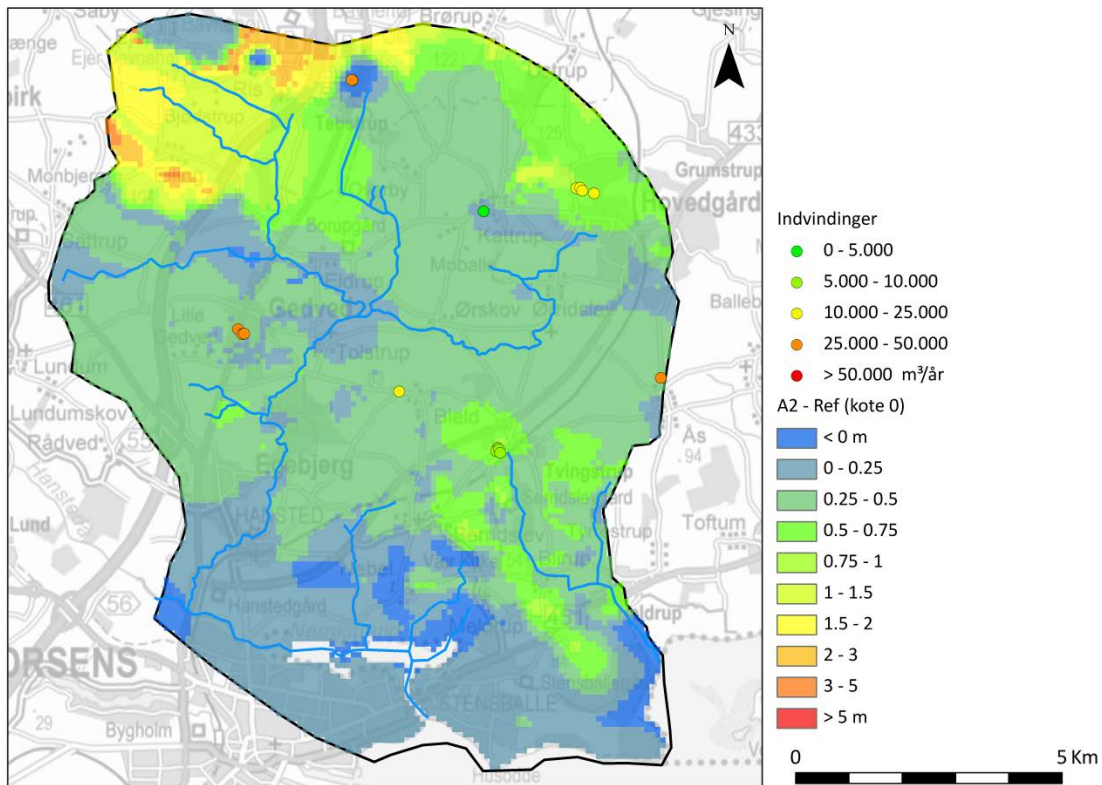
I nærværende afsnit beskrives resultater og vurderinger, inkl. usikkerhedsvurderinger, af modelberegningerne for A2 emissionsscenarioet 2071-2100 med "delta change faktorer" vurderet i forhold til referenceperioden 1961-1990.



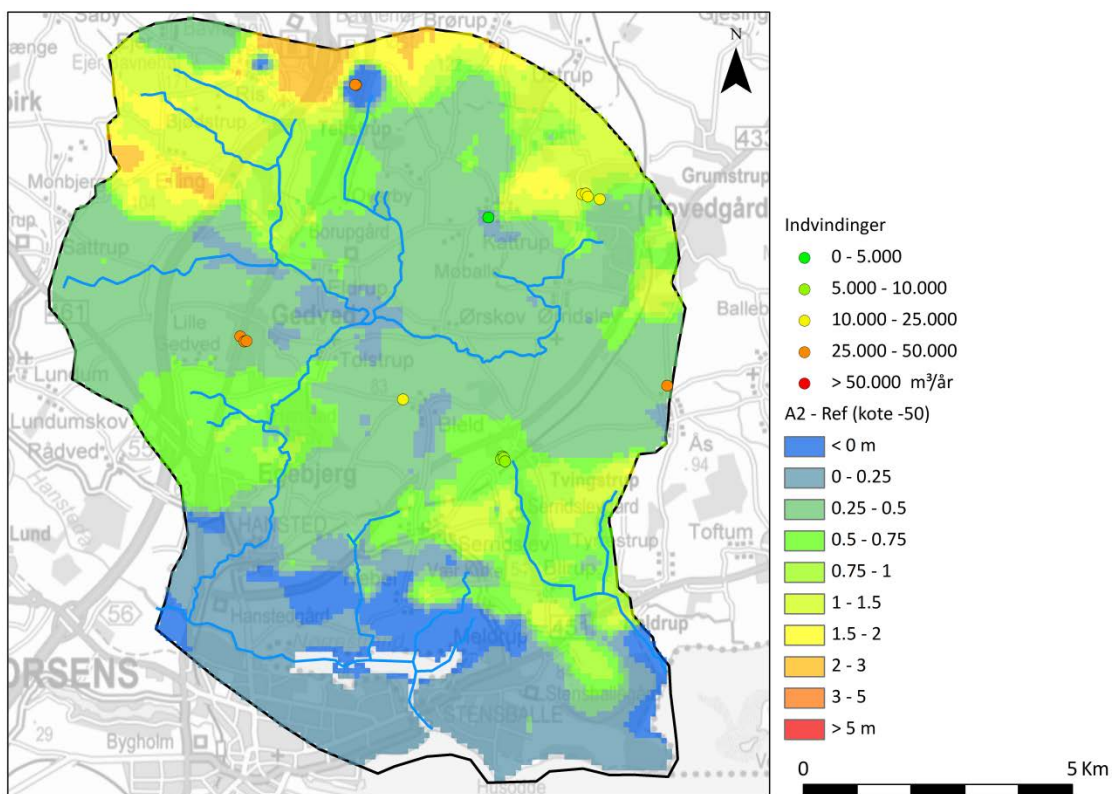
Figur 8.1 Ændret grundvandspejl for A2 klimascenariet sammenlignet med referencekørslen

Fig. 8.1 viser ændringen i det øvre grundvandspejl (svarende til kortlægningsrapportens figur 13.5 for A1B scenariet – Henriksen og Troldborg, 2011). Det fremgår, at der er ganske markante forskelle på klimascenarie A2 sammenlignet med A1B. Det er også forventet, idet der som nævnt i rapporten er en forøgelse i nedbøren på 30 % for A2 scenariet for vintermånederne, sammenlignet med 15 % for A1B scenariet. Hvor der i A1B scenariet kun blev noteret ændringer i grundvandspejlet i det nordlige område på 0-0.25 meter så viser A2 for dette område ændringer på 0.5-1 meter altså ca. dobbelt så stor en stigning i det øverste grundvandspejl. Omkring Højballegårdværkets kildeplads ses forøget grundvandstand på 0.5-1.5 meter, og lokalt 1.5-2 meter. I den nordvestlige del af modelområdet er der lokalt stigninger på godt 2 meter, enkelte steder > 5 meter.

I større dybde (Fig. 8.2) ses mere markante ændringer i grundvandspejlet for A2 klimascenariet sammenlignet med referencen, typisk på 0.25-0.5 meter men mange steder 0.5-2 meter og lokalt helt op til 3-5 meter visse steder. I stor dybde (Fig. 8.3) ses tilsvarende større ændringer i trykniveauet mange steder på 1-3 meter eller mere.

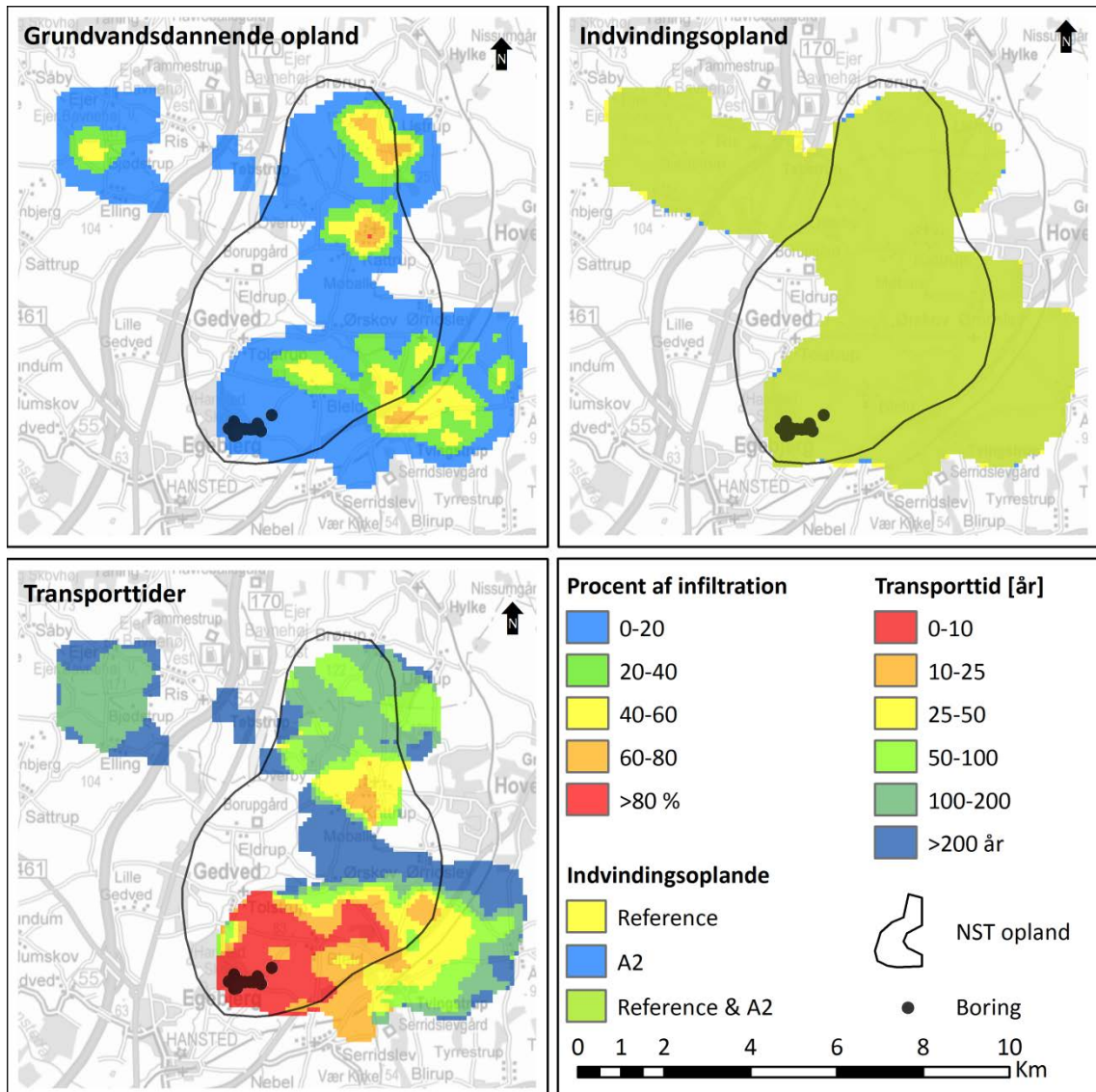


Figur 8.2 Ændret grundvandspejl ved A2 scenariet i forhold til referencen svarende til kote 0.



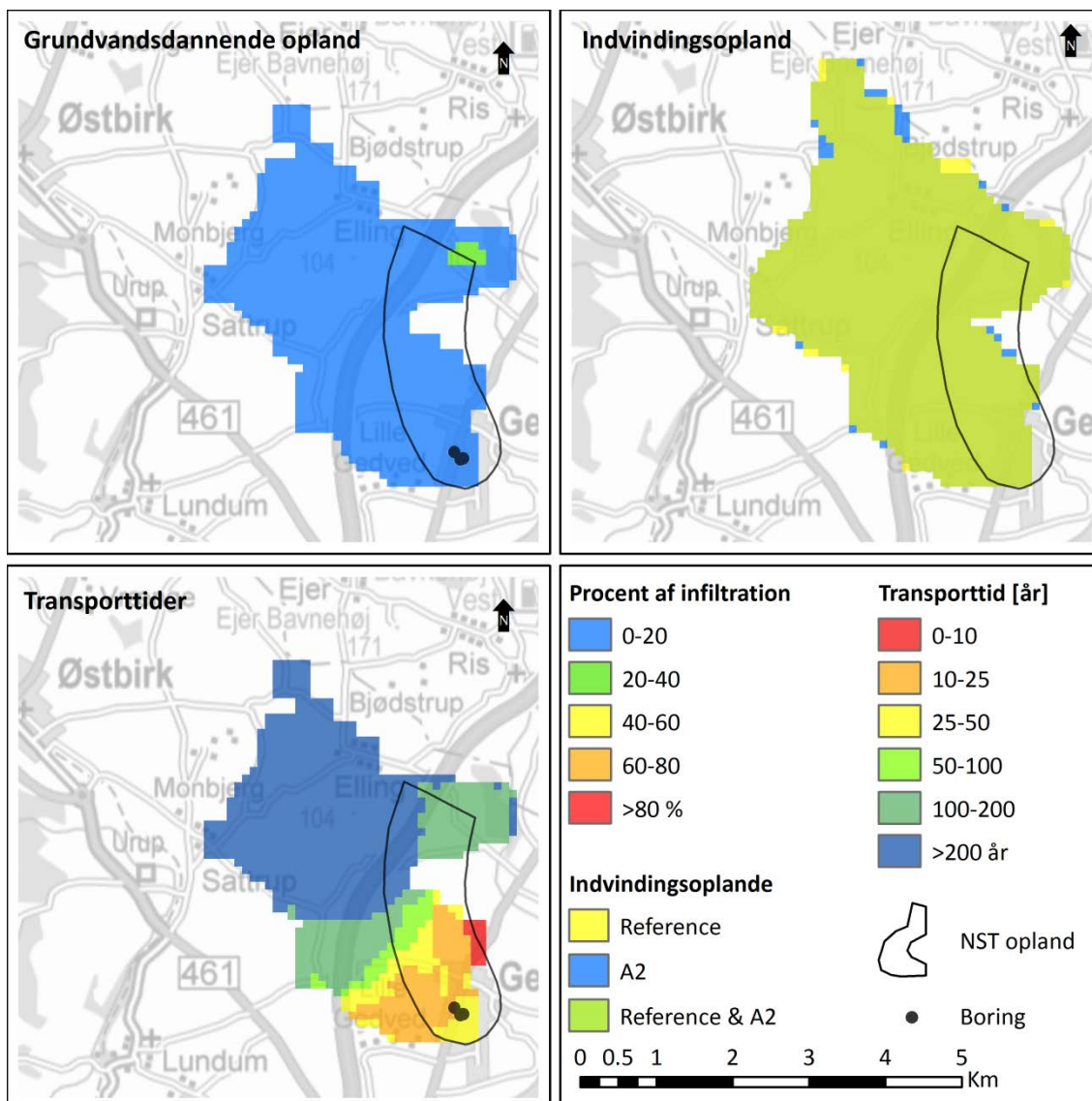
Figur 8.3 Ændret grundvandspejl ved A2 scenariet i forhold til referencen svarende til en dybde kote -50 meter.

I Fig. 8.4 er vist indvindingsoplande, grundvandsdannende oplande og transporttider for Højballegaardværket for A2 scenariet (Scenarie IV – 4c, ud fra aktuel indvinding 2006-2008). Der ses meget begrænset forskel på indvindingsoplandet til Højballegård for A2 klimascenariet sammenlignet med referencekørslen, en forskel der faktisk er mindre end for tilladelsen sammenlignet med aktuel indvinding (vist i Fig. 7.1).



Figur 8.4 Resultater for A2 scenariet for Højballegårdværket. Bemærk at resultater for grundvandsdannende opland og transporttider i denne og følgende figurer er baseret på A2 scenariet, og ikke er baseret på reference-scenariet

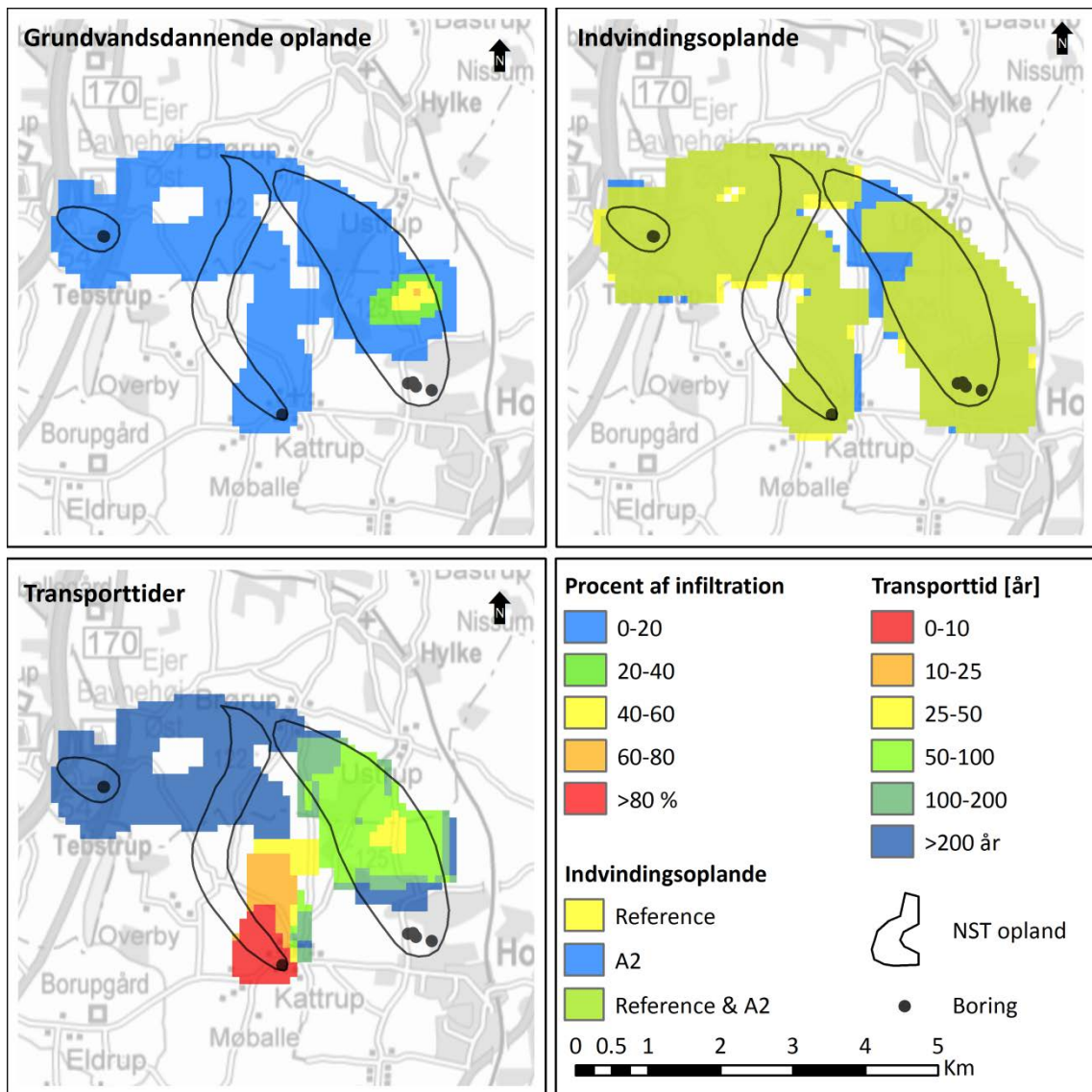
Det grundvandsdannende opland og transporttider for A2 scenariet er vist på Fig. 8.4 – 8.8. Der er flere lighedspunkter end forskelle, hvis man sammenligner med referencescenariet vist i kortlægningsrapporten (Henriksen og Troldborg, 2011, se kapitel 13, figur 13.11 til figur 13.15).



Figur 8.5 Resultater for A2 scenariet for Gedved VV.

Det fremgår af figur 8.5, at der er forskelle på indvindingsoplande på max 200 meter for oplandet til Gedved VV ved A2 scenariet.

I forhold til referencescenariet er der færre områder med indvindings-% større end 20 % ved A2 scenariet, hvor referencescenariet giver 3 lokale områder i denne kategori. Transporttider ligner i store træk referencescenariet.

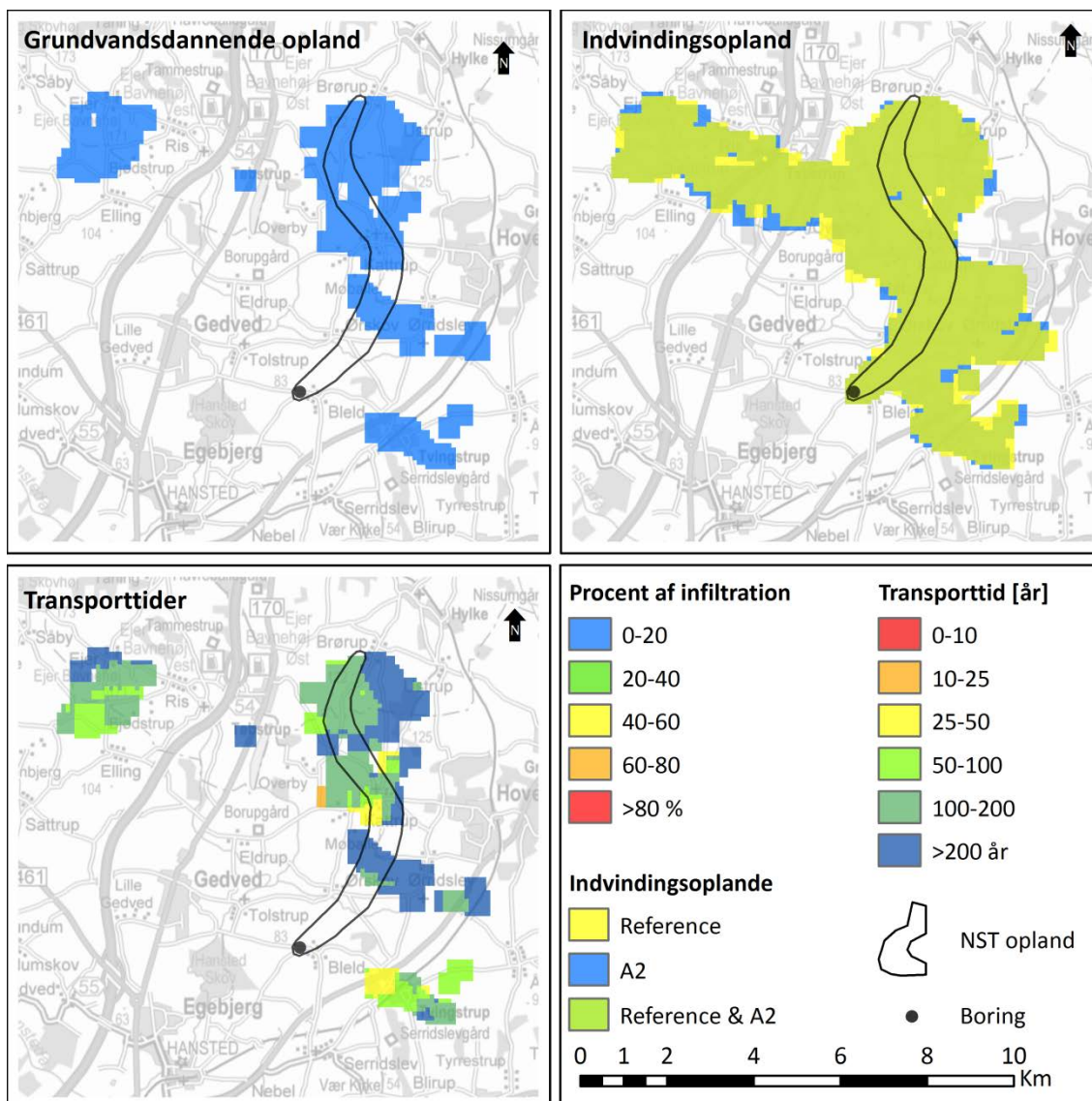


Figur 8.6 Resultater for A2 scenariet for Tebstrup, Kattrup og Hovedgård vandværker.

Resultaterne for A2 scenariet for indvindingsoplande til Tebstrup, Kattrup og Hovedgaard (Figur 8.6) viser for Hovedgaard at A2 scenariet i dette tilfælde giver større forskelle end A1B scenariet (de blå områder der hører til Hovedgård indvindingsoplandet har for A2 større udbredelse mod vest i det nordligste del af oplandet, sammenlignet med A1B) svarende til to gridkolonner eller ca. 200 meter).

På trods af at udstrækning af det grundvandsdannende opland for Tebstrup VV har små forskelle for Tebstrup for A2 sammenlignet med referencescenarioescenariet, så giver A2 infiltrations-%'er på 20-40 % for et område tæt på kildepladsen ved A1B, hvorimod reference scenariet overalt har max 0-20 % infiltration.

Der noteres også nogen forskelle i transporttider mellem A2 og referencen, igen dog af mere marginal karakter.



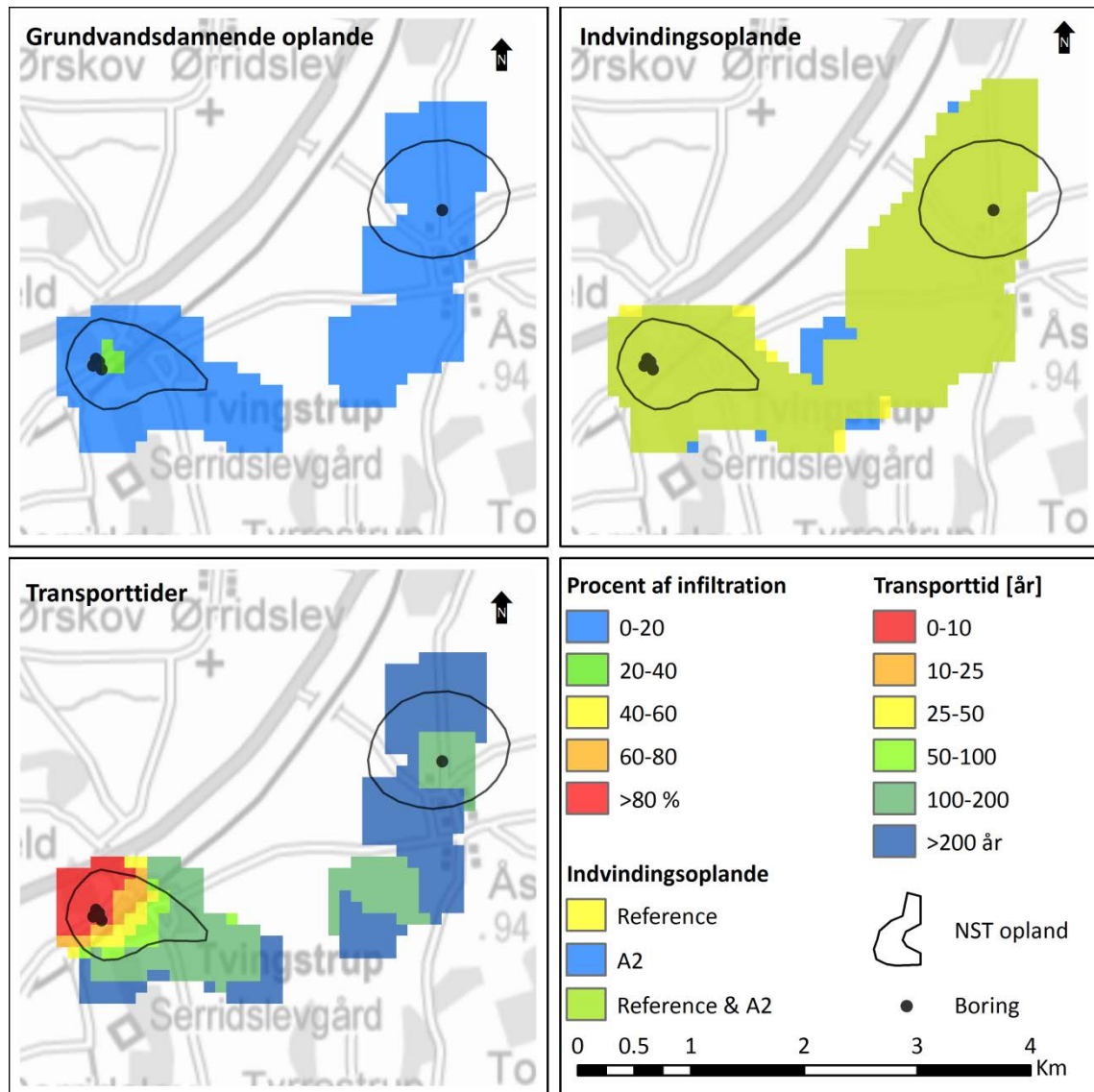
Figur 8.7 Resultater for A2 scenariet for Bleid vandværk. Bemærk at resultater for grundvandsdannende opland og transporttider i denne og følgende figurer er baseret på A2 scenariet, og ikke er baseret på referencescenariet

Af figur 8.7 ses at A2 scenariet sammenlignet med reference scenariet giver max. forskelle på afgrænsningen af indvindingsoplande svarende til lokalt ca. 3 grids (~ 300 meter). For Bleid VV ses ikke nogen systematiske forskelle på indvindingsoplande, hvis man sammenligner A2 og A1B (vist i Henriksen og Trolborg, 2011). Det er ikke helt de samme grids der giver 'blåt' hhv. 'gult' på den tilsvarende figur for A1B vist i rapporten, men der er nogle små forskelle i randzonen.

De samme små forskelle giver nogle marginale forskelle på det grundvandsdannende opland i forhold til referencen, dog uden at ændre på vurderingen af infiltrationsprocenten. Det overordnede billede vedr. transporttider er ligeledes ret ensartet for A2 og referencen, dog med små forskelle på grid niveau.



Figur 8.8 viser A2 scenariet, der sammenlignet med reference scenariet giver max. forskelle på afgrænsningen af indvindingsoplande svarende til 2 grid (~ 200 meter) langs en ca. 500 meter randzone i opstrøms ende af de to indvindingsoplande. Der er en tendens til at A2 giver lidt større forskelle end A1B i dette område langs den nordlige afgrænsning. A2 giver et mindre område med 20 – 40 % infiltration omkring Tvingstrup VVs kildeplads end referencekørslen, ligesom at transporttider bliver forøget fra 0-10 år til 10-25 år tæt på kildepladsen for A2 i forhold til referencekørslen.



Figur 8.8 Resultater for A2 scenariet for Tvingstrup og Åes vandværker. Bemærk at resultater for grundvandsdannende opland og transporttider i denne og følgende figurer er baseret på A2 scenariet, og ikke er baseret på referencescenariet

For at sammenfatte, A2 scenariet giver væsentligt mere markante ændringer i grundvandspejlet end A1B scenariet, men det har kun meget marginal betydning for afgrænsningen af indvindingsoplande, grundvandsdannende oplande og transporttider i forhold til en mere korrekt repræsentation af indvindingsdynamik og andre indirekte effekter af klimaændring.

## 9. Diskussion

### 9.1 Direkte effekter af klimaændringer (A2)

Med direkte effekter forstås de ændringer i grundvandsstand der skyldes ændret nedbør, fordamning og temperatur. Resultaterne af Egebjergmodellen for A2 scenariet kan sammenlignes med resultater af Horsens Fjord modellen som er baseret på DK modellens geologi ([www.vandmodel.dk](http://www.vandmodel.dk)). I Fig. 9.1 er vist simuleret ændret trykniveau med Horsens Fjord modellen for A2 scenariet for det øverste grundvand (jf. Fig. 8.1 i nærværende rapport).

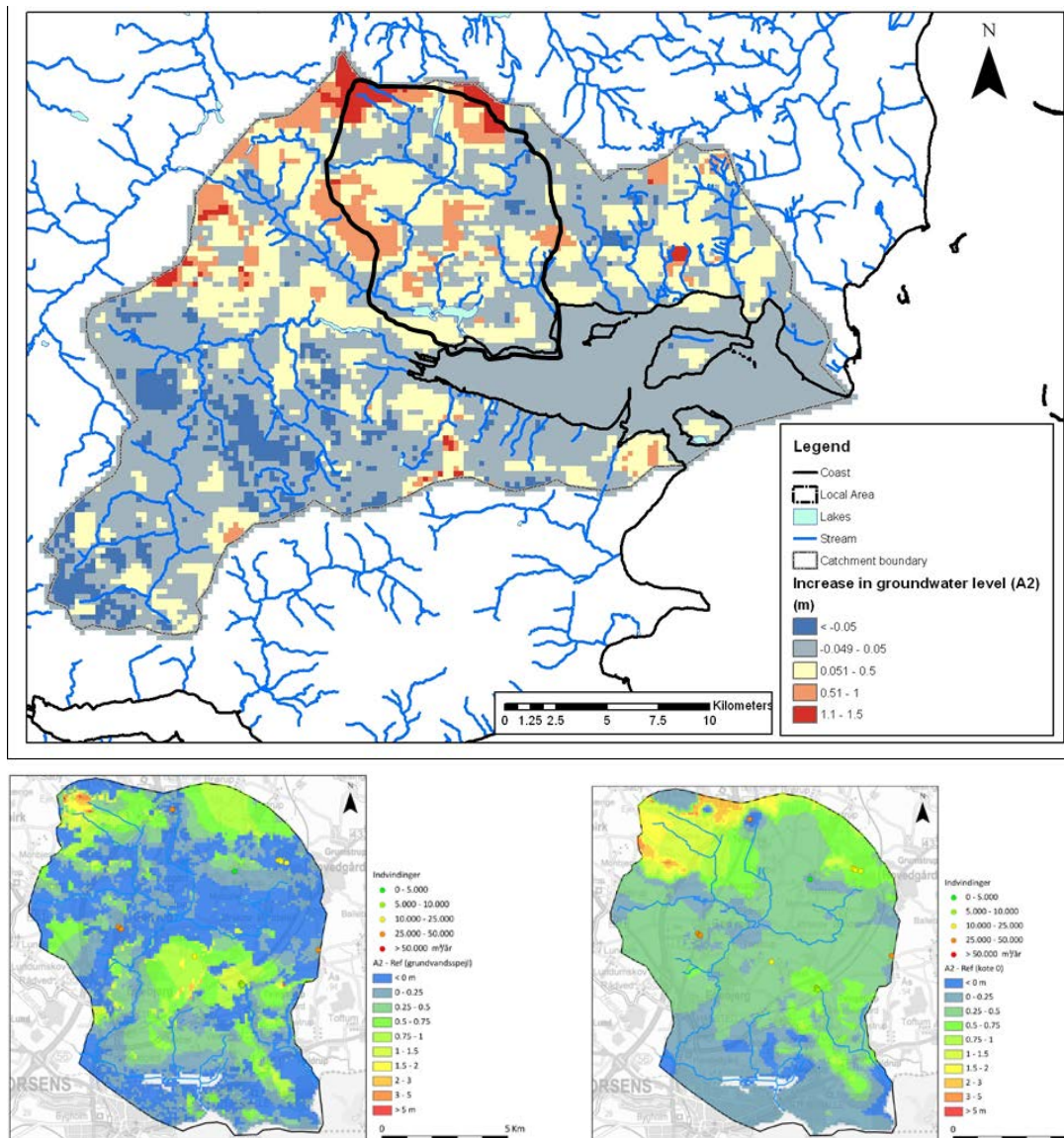
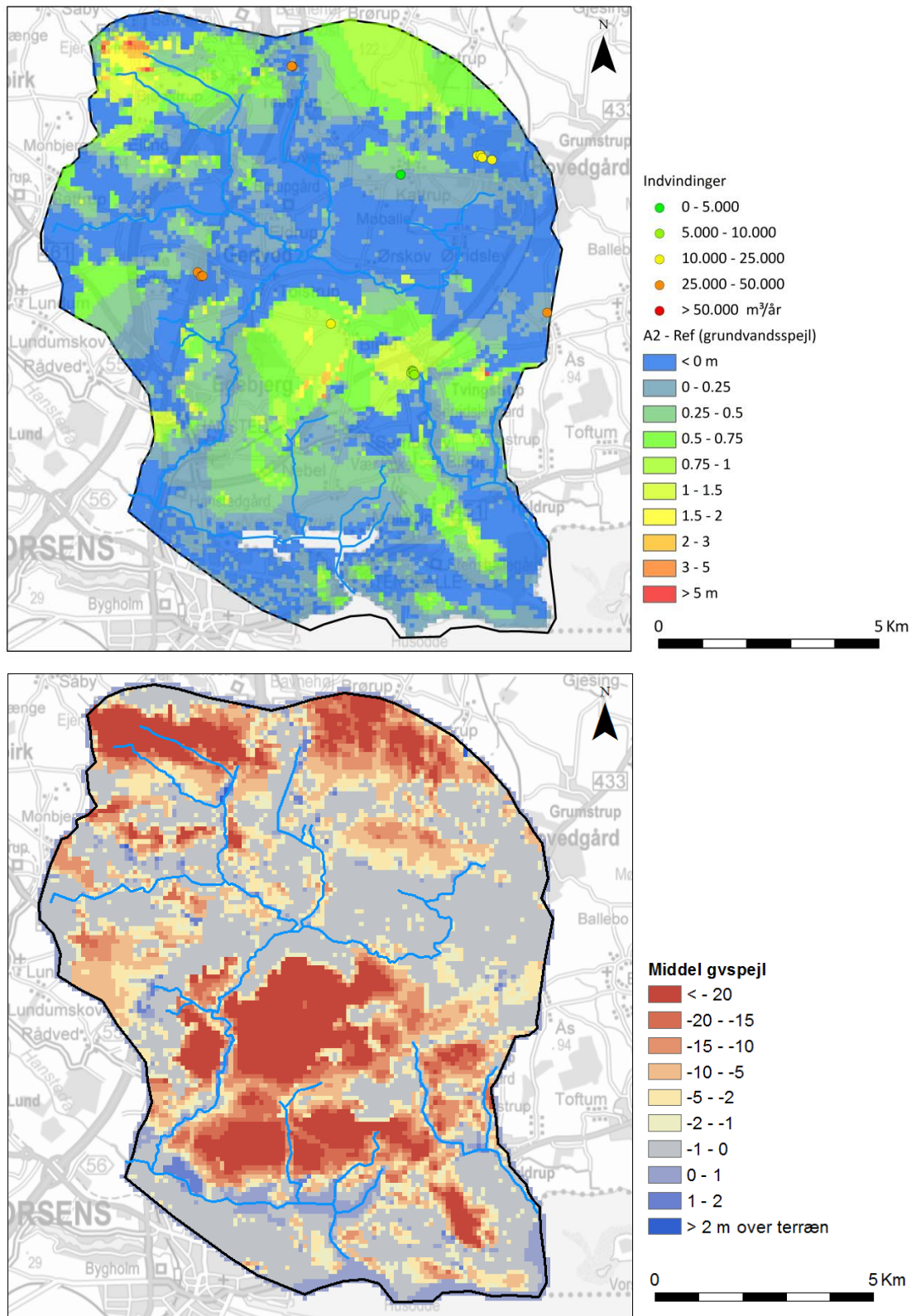


Fig. 9.1 Resultater af Horsens Fjord model (A2) sammenlignet med resultater af Egebjerg modellen (A2) nederst: venstre: øverste grundvandspejl, højre: grundvandspejl for beregningslag omkring kote 0



Figur 9.2 Dybde til grundvandspejl i det nuværende klima 1991-2010 (nederst) og ændring i øvre grundvandspejl ved A2 scenariet (øverst, 2071-2100 i forhold til 1961-1990)

Grundvandspejlet fra Horsens Fjord modellen viser at de største ændringer i grundvandstanden vil ske ved grundvandsskel. Selv om det er ret forskellige geologiske modeller der ligger til grund, så ser det ud til, at grundvandsskel omkring Egebjerg områdets modelrand, på trods af de markante stigninger i grundvandstanden lokalt ikke vil ændre sig nævneværdigt. Antagelsen om no-flow rand ser dermed ud til at kunne underbygges af Horsens Fjord modellen.

Kigger man nærmere på de simulerede ændringer i det øvre grundvandspejl for A2 scenariet (Fig. 9.2) så ses der generelt en overordnet tendens til at områder med højtliggende grundvand (dybde til grundvandspejl f.eks. 0-1 meter under terræn) ikke har nævneværdige ændringer i et fremtidigt klima. De større ændringer i grundvandstanden vil ifølge modellen forekomme, hvor der i dag er en vis dybde til det øvre grundvand (og dermed at grundvandspejlet ligger et stykke under drænniveau). I områder med højtliggende grundvand tæt på terræn vil den forøgede nedbør derfor primært afdrænes til vandløb. I områder med stor dybde til det øvre grundvand, vil der kunne ske en stigning i grundvandstanden med helt op til 2- 5 meter lokalt i den nordvestlige del af modelområdet omkring Ejer Baunehøj. I øvrige dele af modelområdet ses stigninger på typisk 1-2 meter.

Ændringer i grundvandstanden kan kræve mere effektiv dræning i områder der i dag ikke er drænet. Modellen antager at der er dræn overalt, og antager således at der bliver etableret dræn der hvor grundvandstanden vil stige. I lavtliggende områder hvor der ikke er dræn i dag vil der kunne ske en forøgelse af grundvandstanden. Modellen medtager i øvrigt ikke de grundvandstigninger der skyldes forøget opstuvning i vandløb som følge af ændret vedligholdelsestilstand (eller opstuvning fra havet tæt på kysten).

Som følge af ændringerne i grundvandstanden og den stigende vinternedbør i A2 scenariet vil det betyde, at maksimumvandføringen vil stige, samtidig med at den forøgede fordampning i områder hvor grundvandet står tæt på terræn kan give reduktion i sommer og efterårsafstrømningen.

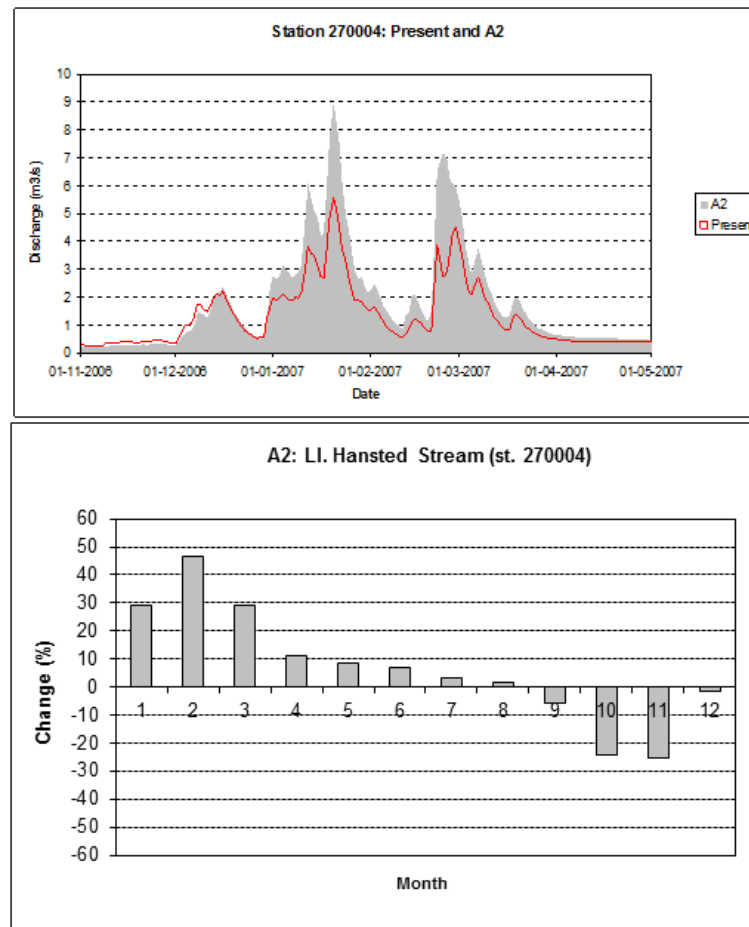
Ændringerne i hydrologi og grundvandsstand betyder at indvindingsoplande, grundvandsdannende oplande og transporttider ændres som beskrevet i kapitel 8. Hovedresultatet er her at ændringer i nedbør, temperatur og fordampning, altså direkte effekter af klimaændringer, har meget begrænset betydning for afgrænsningen af oplande, i forhold til f.eks. den geologiske model, parameterverdier herunder modellens antagelser omkring dræn.

Men klimascenarier og ændrede nettonedbørsmængder har dog betydning for både størrelsen og beliggenheden af indvindings- og grundvandsdannende oplande, og her udgør beregninger som foretaget for A2 scenariet med delta change metoden et godt grundlag for at inddrage de direkte klimaeffekter og deres betydning på hydrologi og grundvand. I rapporten er belyst gennemsnitlige ændringer.

Direkte effekter på afstrømning er ikke vurderet med A2 scenariet. Resultater for A1B scenariet for den faste målestation i LI. Hansted åen (27.01) gav en reduktion af minimumsvandføringen på 1 %, og ændringer på 0-4 % ved de øvrige stationer, altså væsentlig min-

dre end effekten af ændret vandindvinding (vandføringen er i dag reduceret med knap 30 % ved st. 27.01 i forhold til en kørsel med nulindvinding).

Ændringen i max afstrømning ved ændret klima i LI. Hansted å blev for A1B scenariet vurderet til 22 % forøgelse (99 % fraktil), 9 % forøgelse (95 % fraktil) og 7 % forøgelse (90 % fraktil). Horsens Fjord modellen for Lille Hansted å (st. 27.01) giver for A2 scenariet en forøgelse af maksimumsvandføringen (f.eks. januar 2007 max afstrømningen) på ca. 60 %, men det er så også for A2 scenariet, se Figur 9.3.



Figur 9.3 Ændringer i vandløbsafstrømning for Lille Hansted å (st. 270004/27.01) for A2 beregnet med Horsens Fjord modellen

Ingen af de to modeller, hverken Horsens Fjord modellen, eller Egebjerg modellen har kunnet dokumenteres gyldig på grund af mangelfulde hydrologiske observationer primært vandføringsobservationer. Modellernes evne til simulering af ekstremværdier er usikker.

## 9.2 Indirekte effekter af klimaændringer på hydrologi og grundvand

Er ikke belyst i nærværende rapport, men ud fra sensitivitetsanalysen i kapitel 7 vurderes det, at de indirekte effekter af klimaændringer har langt større betydning end de direkte effekter og formentlig udgør et overset problem.

Indirekte effekter af klimaændringer kan f.eks. være ændret arealanvendelse, ændret markvanding, oversvømmede borerer der må lukkes på grund af forurening, flytning af kildepladser, ændrede infrastrukturforhold og dræning mm.

Detailkortlægningen giver ikke nogen anvisninger på hvordan indirekte effekter skal indgå i vurderingen af indvindingsoplande. Henriksen et al. (2010) anbefaler, at man analyserer betydningen af indvindingsmængden, f.eks. ved opstilling af et eller flere scenarier, der belyser betydning af ændret fremtidig indvinding. Det kan give et godt overblik over, hvilke områder og arealer som vil blive berørt i forbindelse med udvidelse af en eksisterende kildeplads, eller omfordeling af indvindingen f.eks. fra terrænnære til dybere borerer, som det har været tilfældet f.eks. ved Højballegårdværket gennem de seneste 20-30 år.

Udover at belyse direkte effekter af ændret nedbør og fordampning, så det også vigtigt at analysere betydning af ændret arealanvendelse og dræning. Det er imidlertid ikke nogen nem opgave rent teknisk, da der ikke foreligger let tilgængelige data for drænforhold, der er derfor behov for vidensopbygning omkring modellering af drænforhold, scenarieudvikling osv. med effektive parametre.

Det er ikke muligt ud fra det foreliggende grundlag at give en entydig vurdering af bæredygtighed og klimaeffekter for grundvandsressourcen ud fra Egebjerg modellen. Vandløbspåvirkningen ved minimumssituationen ser ud til at være uændret i et fremtidigt klima, idet A1B (Henriksen og Trolborg, 2011) viste en begrænset reduktion på 0-4 % for de enkelte delstrækninger (med en reduktion på 1 % for St. 27.01 LI. Hansted å). Det vil sige at klima-effekter kun vil give en marginal reduktion i minimumsvandføringen. I forhold til den vandløbspåvirkning som den nuværende vandindvinding påfører det hydrologiske system, bestemt til 29 % f.eks. ved St. 27.01 LI. Hansted å, har klimaet kun sekundær betydning når man analyserer i forhold til minimumsvandføringen. Resultater med Horsens Fjord modellen underbygger denne vurdering. Horsens Fjord modellen giver for A2 kun en marginale påvirkning af minimumsvandføringen i august måned (se Fig. 9.3), hvor vandføringen typisk har sit årsminimum. I perioden september-november (Fig. 9.3) ses imidlertid noget mere markante reduktioner i minimumsvandføringen på 5 – 25 % reduktion i LI. Hansted å i et fremtidigt klima, og spørgsmålet er derfor hvordan den længerevarende reduktion henover efterårsperioden som følge af klimaeffekter vil kunne påvirke god økologisk tilstand i vandløb og tilhørende vådområder, når også ændringer i vandets temperatur regnes med.

Kortlægningsrapporten (Henriksen og Trolborg, 2011) viste at vandindvindingen i dag udgør 46 % af grundvandsdannelsen i de øvre beregningslag i modellen (lag 2) for oplandet til St. 27.01 LI. Hansted å, altså en relativ intensiv vandindvinding i oplandet. Når man

skal vurdere bæredygtighed på en skala som Egebjerg området, er det imidlertid nødvendigt at kigge på ændringer i afsænkningerne og ikke grundvandsdannelsen, idet det er grundvandstanden og relationer til grundvandskvalitet og evt. vådområder, der vil være bestemmende for kvalitetsmæssig bæredygtig ressource. Her viser Fig. 9.2 stigninger i grundvandsstanden i det øverste magasin f.eks. omkring Højballegaard værket på 0.5 – 1 meter for A2 scenariet, og stigninger i de dybe magasiner (Fig. 8.3) på mellem 0.25 og 0.5 meter f.eks. omkring Højballegårdværket. I andre områder ses endnu større stigninger i grundvandet trykniveau i de dybe lag (Fig. 8.3). Det kan evt. betyde, at den kvalitetsmæssige bæredygtige ressource som sådan vil forøges, idet der i princippet vil kunne indvindes en forøget vandmængde ved den samme afsænkning af grundvandspejlet.

Der kan imidlertid ikke siges noget konklusivt omkring ressourcens størrelse og klimaændringer, idet der her mangler en inddragelse af grundvandskvalitetsdata relateret til afsækningsforhold. Vandkvaliteten må på baggrund af fase 1 kortlægningen (Sandersen et al. 2009) antages at have stor betydning for vurderingen af kvalitetsmæssig bæredygtig ressource og dermed det fremtidige potentiale for vandindvinding i området. Sammenhænge mellem grundvandstand og vandkvalitet er her centrale problemstillinger for vurdering af bæredygtigheden i såvel grundvand som overfladevand. Jf. Sandersen et al. (2009) er dels vandkvalitetsproblemer i relation til arsen (med stigende indhold af arsen afhængigt af hvor reduceret vandet er) i Egebjerg området, og sekundært et stigende indhold af sulfat og chlorid, der indikerer at systemet ikke er i ligevægt, og dels kan skyldes meget landbrugsintensive områder eller intensiv vandindvinding, som følge af sænkning af grundvandspejlet, oxidation af magasinbjergarten (herunder oxidation af pyrit), med frigivelse af sulfat som resultat (der ses f.eks. højere indhold af sulfat syd for Hansted skov, hvor langt den største grundvandsindvinding i området finder sted), Sandersen et al. (2009).

## 10. Referencer

Hawkins, ED and Sutton, R (2009) The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. Bull. Amer. Meteor. Soc., 90, 1095-1107.

Henriksen, HJ, Iversen, CH og Wernberg, T (2010) Usikkerheder på indvindings- og grundvandsdannende oplande. Delprojekt 3 om oplande. GEUS December 2010.

Henriksen, HJ og Troldborg, L (2011) 3D hydrologisk strømningsmodel for Egebjerg området. GEUS rapport 2011/101. 148 pp.

Møller, RR og Jørgensen, F (2011) Geologisk model for Egebjerg. De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS. 85 pp.

Refsgaard, JC, Sonnenborg, TO og Henriksen, HJ (2009) Klimaændringer i Danmark – hydrologiske effekter og usikkerheder. Vand & Jord, Nr. 4, 16. årgang, November. 124-127.

Sandersen, P, Kirkeby, TS, Vejergang, C, Christensen, JQ, Nordahn, P, Pallensen og T, Jacobsen, UT (2009) Trin-1 kortlægning af Hovedgård kortlægningsområde. Grontmij | Carl Bro. 147 pp.

Sonnenborg, TO, Christensen, BSB, Roosmalen, Lv & Henriksen HJ (2006) Klimaændringers betydning for vandkredsløbet i Danmark, GEUS rapport 2006/22.