

3D hydrologisk strømningmodel for Egebjerg området

Kvantificering af grundvandsressourcen og
afgrænsning af indvindings-område ved
nuværende og fremtidigt klima

Hans Jørgen Henriksen & Lars Trolborg



3D hydrologisk strømningmodel for Egebjerg området

Kvantificering af grundvandsressourcen og
afgrænsning af indvindings-område ved
nuværende og fremtidigt klima

Hans Jørgen Henriksen & Lars Trolborg

Indholdsfortegnelse

1.	Resumé	6
2.	Introduktion	9
2.1	Problemstilling	9
2.2	Projektformål	10
2.3	Modelformål	10
2.4	Vurdering af væsentlige usikkerhedskilder og deres potentielle betydning	11
2.5	Introduktion til modelområdet og tidligere undersøgelser	12
2.6	Miljømål ifølge vandplan Horsens Fjord 2011	14
3.	Geologisk model	17
4.	Øvrige data	21
4.1	Rodzonemodul	21
4.2	Indvindinger	22
4.3	Grundvandspotentiale og pejledata	26
4.4	Hydrauliske parametre	29
4.5	Afstrømningsdata	30
5.	Konceptuel model	33
5.1	Konceptuel model	33
5.2	Strømningsligninger	33
5.3	Simplifikationer mht. geologisk model	34
5.4	Randbetingelser	34
5.5	Gruppering af parametre	35
6.	Numerisk modelværktøj og metodik	36
6.1	Modeltype og modelkode	36
6.2	Overordnet metodik	36
6.3	Kalibrering	36
6.4	Validering	37
6.5	Modelanvendelse	37
6.6	Usikkerhedsanalyse	38
7.	Modelopstilling	41
7.1	Modelområde	41
7.2	Diskretisering	42
8.	Kalibrerings og valideringsstrategi	48
8.1	Anvendte nøjagtighedskriterier	48

8.2	Valg af kriterier	48
8.3	Numeriske mål for nøjagtighed	49
8.4	Planlagte valideringstest og –data	51
9.	Kalibrering	52
9.1	Resultater af kalibreringsprocessen	52
9.2	Udvalgte kalibreringsparametre	54
9.3	Kalibreringsresultat	54
9.4	Opnåede parameterværdier og konfidensgrænser	56
9.5	Vurdering af kalibreringsresultatet	56
10.	Validering og usikkerhedsanalyse	63
10.1	Resultater af validering.....	63
10.2	Usikkerhedsanalyse	64
11.	Modellens dokumenterede anvendelsesområde	70
12.	Scenarieopstillinger	71
12.1	Opstilling af scenarier	71
12.2	Fremtidigt klima	75
13.	Simuleringsresultater	77
13.1	Ændringer i grundvandsstand som følge af vandindvinding og klima	77
13.2	Ændret afstrømning som følge af vandindvinding	81
13.3	Ændringer i vandbalance og grundvandsdannelse	85
13.4	Oplandsberegninger og transporttider	88
13.5	Stationær versus dynamisk simulering	98
13.6	Sensitivitetsanalyser.....	100
13.7	Syntese af stationære scenarier og klimaændringer	102
14.	Konklusioner og anbefalinger	105
14.1	Konklusioner.....	105
14.2	Anbefalinger	106
15.	Referencer	108
	APPENDIX A Resultater for A2 klimascenariet	110
	BILAG 1 Oversigt over lithologier i voxelmodellen	117
	BILAG 2 INDVINDINGSDATA	121
	BILAG 3 Gruppering af k-værdier for vandførende lag	122

BILAG 4 Pejledata og kalibreringsresultater for pejletidserier (Invers08)	123
BILAG 5 Kalibrerings parameter	131
BILAG 6 Analyse af korrelation mellem parametre (invers 08)	133
BILAG 7 Kalibreringsresultat	134
BILAG 8 Simulerede vandbalancer for grundvandsdelen	135
BILAG 9 Ændret dybde til grundvandsstand (max og min ændringer)	138
BILAG 10 Følsomhedsanalyser dræn	140
BILAG 11 Drænoplande	148

1. Resumé

Der er opstillet en innovativ og for danske forhold helt unik 'voxel baseret' geologisk model og etableret en metodik til oversættelse af den geologiske model til en 3D kalibreret numerisk grundvands-overfladevandsmodel for Egebjerg området. Den konceptuelle model for Egebjerg er tolket som en fuld 3D voxelmodel med 84 lithologiske enheder vertikalt afgrænset i 5 meter intervaller, der er oversat til en numerisk grundvandsmodel bestående af i alt 30 beregningslag som er horisontalt diskretiseret i et 100x100 meter grid. GEUS vurderer, at modellen for Egebjerg udgør det med foreliggende kortlægningsgrundlag bedst mulige grundlag for 1) afgrænsning af indvindings- og grundvandsdannende oplande, 2) detaljeret vurdering af vandbalanceforhold, grundvandsdannelse, udbredelse af sænkninger og vandløbspåvirkning og dermed bæredygtig udnyttelse samt 3) vurdering af klimaeffekter på grundvandsforhold i et område i nogen afstand fra kysten præget af forekomst af et komplekst system af begravede dale.

Sammenligningen af nuværende og fremtidigt klima (IPCC scenarie A1B ved slutningen af dette århundrede) viser, at der kun er få %'s afvigelse på afgrænsningen af oplande. Ændringer i trykniveauer ved et ændret klima er dog betydelige (typisk en halv meters stigning i mange områder og op til 2 meters stigning lokalt). Max afstrømning i et varmere klima øges, mens min afstrømning stort set er uændret men varigheden vil strække sig længere hen på efteråret. I Appendix A er forhold og ændringer er baseret på A2 scenariet til brug for CLIWAT projektet (se www.cliwat.eu) belyst.

En kvalitativ vurdering af simulerede trykniveau-residualværdier viser, at simulerede strømningsretninger er rimelige, omend modellen har en tendens til at simulere for høje trykniveauer i nærheden af modelranden specielt i den nordøstlige del af modelområdet. En forbedret indbygning af tidlige og rumlige variationer i inputdata for Højballegårdværket (fordeling på boringer/månedlige eller ugentlige værdier), og at der som nævnt ovenfor indsamles flere og bedre hydrologiske observationsdata (fx vandføring og synkronpejlinger), vil kunne forbedre grundlaget for yderligere dokumentation af modellens nøjagtighed i forhold til de kvantitative kriterier. Mange af de frasorterede pejleobservationer stammer i øvrigt fra dette nordøstlige område.

Den kvalitative vurdering af simulerede minimumsvandføringer og deres fordeling stemmer generelt fornuftigt med medianminimumsskøn fra området i forhold til de usikkerheder der er vurderet på disse. Det skal dog bemærkes, at medianminimumsskøn ifølge trin-1 kortlægningen er af ældre dato (1974) fra dengang sænkningstragten fra Højballegårdværkets indvindingen fortsat var i udbredelse, og hvor der blev indvundet mere vand fra terrænnære magasiner. Samtidig forelå der ikke daglige vandføringer ved stationen i Ll. Hansted å da medianminimumsmålingerne blev udført (denne station blev sat i drift i 1976). En ny synkronmåling og revurdering af grundvandsafstrømningen til delstrækninger i Ll. Hansted å vurderes derfor, at kunne forbedre datagrundlaget væsentligt. Et par nye vandføringsmålestationer er nødvendige såfremt monitoringsprogrammet senere skal give mulighed for at dokumentere modellens gyldighed ud fra kvantitative kriterier. En ny fast vandfø-

ringsstation i nedre del af Ørskov bæk vurderes at have høj prioritet i forhold til vandløbspåvirkning fra vandindvinding.

Efter GEUS's vurdering er det en styrke ved Egebjergmodellen, at den tvinger modellør såvel som vandforvalter til at prøve at forstå helheden, og blive skarpere på de væsentligste usikkerheder, og hvilke delelementer man kunne overveje at give et 'serviceeftersyn'. Hermed kan modellen bidrage til det videre arbejde med indsatsplanlægning og nye vandindvindingstilladelser, ved at den giver feedback til en bedre afbalancering af kortlægningsdata, og konkret feedback til hvor mere specifikke data vil kunne forbedre simuleringerne.

Egebjerg modellen viser, at en så detaljeret voxelmodel, som den der er opstillet, kræver fokus i detailkortlægningen på de hydrauliske parameterverdier, bedre observationsdata af afstrømning og trykniveau, mere detaljeret indbygning af tidslige og rumlige variationer i vandindvindingen, og bestemmelse af underjordisk afstrømning på tværs af modelranden. Det er dog lykkedes at nå frem til en slutmodel for Egebjerg, efter en række inverse modelkørsler, som på trods af benævnte data og model usikkerheder, har en god performance vurderet i forhold til kvantitative og kvalitative kriterier. Af de kvalitative kriterier er det kun krav om realistiske parameterverdier, som for en enkelt fri parameter – smeltevandsleren - ikke er opfyldt.

Den urealistiske høje værdi for smeltevandsleren kan evt. skyldes, at den geologiske model for udbredelsen af smeltevandsleren er upræcis, og geologerne vil ikke afvise, at dette lerlag kan være mindre sammenhængende end antaget i den geologiske tolkning. Evt. kan den geofysiske kortlægning og efterfølgende tolkning af vandførende og lavpermeable enheder have overset nogle "sandvinduer" eller tynde sandlag. Endelig kan det skyldes, at der foreligger for få observationsdata til en sikker indbyrdes optimering af de tre lavpermeable enheder moræneler, glimmerler og smeltevandsler. Undersøgelsen kan ikke drage nogen endegyldig konklusion på disse usikkerheder, men det vurderes på baggrund af samtlige optimeringskørsler (herunder initialkørslen) at fastsættelsen af parameteren for smeltevandsleren har marginal betydning i forhold til simulering af indvindingsoplande

Som en anbefaling til en evt. senere optimering af modellen, savnes i høj grad flere hydrologiske data (pejledata, vandføringsdata, indberettede oppumpninger pr. indvindingsboring) for området. Med flere hydrologiske data kan grundlaget for en estimering og fastlæggelse af parametre for de mange lithologiske enheder, inkl. lavpermeable enheder for glimmerler, smeltevandsler og moræneler, forbedres væsentligt, da problemet med kalibrering af ca. 400 parametre i forhold til ca. 100 observationer ikke er entydigt. For at tackle denne udfordring har GEUS valgt en "læringsorienteret" tilgang til kalibreringen, en iterativ-eksperimentel erkendelsesproces bestående af et antal inverse optimeringer (med valg af kalibreringsparametre og objektivfunktion), der videreudvikles, ud fra resultatet af foregående optimering).

Ved vurdering af modellens gyldighed, er der udover fokus på de rent kvantitative kriterier rettet fokus på de kvalitative kriterier såsom 1) realisme af estimerede parameterverdier, 2) geografisk fordeling af trykniveau residualverdier i området og 3) simulering af minimums-afstrømninger bedømt ud fra fraktilverdier og sammenlignet med medianminimumsskøn

for LI. Hansted å. Ud fra den konkrete vurdering er det muligt at forklare afvigelser og vurdere deres betydning og dermed slutte at modellen er brugbar til vurdering af de leverancer der skal simuleres.

Med det spinkle datagrundlag fx kun en vandføringsstation og med hensyn til gode referencpejleserier og synkronpejlinger og målinger af minimumsafstrømninger for Egebjerg området, har det imidlertid ikke været muligt at dokumentere og validere den opstillede model ud fra samtlige kvantitative nøjagtighedskriterier som Geovejledningen anbefaler (Refsgaard et al., 2010). Modellen opfylder dog geovejledningens kvantitative nøjagtighedskriterier til detailmodellering af vandbalancen (års og sommer vandbalancen). For de øvrige kriterier (residualværdier i trykniveau, RMS og middelfejl på trykniveau, ME) opfylder modellen ikke fuldt ud kravet til detailmodellering, selvom resultatet efter frasortering af pejleobservationer fra 15 boringer, der enten er gamle (fra 70'erne) eller vurderet fejlbehæftede i forhold til bl.a. kotefejl ud fra en konkret gennemgang for hver enkelt pejleboring, viser at middelfejlen kan opfylde kravet til detailmodellering, og RMS værdien er tæt på at kunne opfylde kravet . Modellen giver dog resultater for ME og RMS efter frasortering som vurderes fuldt ud acceptable i forhold til hvad der vil kunne opnås med det foreliggende peyledatagrundlag. Dynamik i total afstrømning kan ikke endeligt vurderes, da der kun foreligger en enkelt fast vandføringsmålestation. Det er specielt maksimumsafstrømningen at modellen afviger fra observationsdata fra målestationen i LI. Hansted å (27.01), hvorimod modellen giver pålidelige resultater i forhold til minimumsvandføringen for denne station, hvorfra der foreligger registreringer siden 1976.

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.

I nærværende afsnit beskrives problemstilling, projektformål, modelformål og krav til modelnøjagtighed i specifikke kvantificerbare størrelser. Vurderinger af de væsentligste usikkerhedskilder og deres potentielle betydning skitseres. Endelig giver afsnittet en introduktion til modelområdet, tidligere undersøgelser og vandressourceaspekter der rettes fokus på.

2.1 Problemstilling

Modelleringsopgaven for Egebjerg er iværksat med henblik på at udvikle og implementere innovative metoder til analyse af klimaændringers effekt på hydrologien og specielt grundvandet i områder med begravede dale.

Udgangspunktet, er den ved udgangen af 2010 opstillede geologiske model (Møller og Jørgensen, 2011) baseret på eksisterende og ny indsamlet datamateriale, hvor der vha. en nyudviklet metode er produceret en rumlig geologisk model, der er i stand til at beskrive geologiske variationer på et detaljeret niveau (baseret på en såkaldt "voxel" model i 100x100x5 m modelkasser):

1. Geologisk forståelsesmodel
2. Rumlig geologisk model
3. Lithologisk model

Den lithologiske model er baseret på den rumlige geologiske model, med den særlige forudsætning at hele modelrummet er udfyldt. Det betyder, at hele det tredimensionale grid er udfyldt, og at der er tildelt lithologi til alle voxler i griddet indenfor modelområdet. Derudover er de enkelte grids tildelt en kvalitativ usikkerhedsmarkør, som giver mulighed for at lokalisere de mest usikre områder og dybde-lag i modellen. Der er ikke opstillet en hydrostratigrafisk model i traditionel forstand, baseret på en overordnet hydrostratigrafisk lagstruktur'. I stedet er der i forbindelse med den hydrologiske modellering foretaget en indledende vurdering af hydrauliske egenskaber for alle lithologiske enheder på baggrund af prøvepumpningsdata (T-værdier).

I kalibreringsprocessen (invers optimering) skal de hydrauliske parametre (ledningsevner og magasin egenskaber) derfor fastlægges iterativt, og det kræver omhyggelige overvejelser af hvilke parametre der er de mest følsomme, samt hvordan forskellige parametre kan linkes så opgaven bliver håndterbar, da der maksimalt i hver optimering kan arbejdes med en håndfuld 'frie' parametre (typisk 5-10 parametre).

2.2 Projektformål

Formålet med projektet er at udvikle og implementere innovative metoder til analyse af klimaændringers effekt på hydrologien og specielt grundvandet i områder med begravede dale, det vil sige udvikling og dokumentation i forhold til grundvandskortlægningen af den nye 3D voxel baserede geologiske modellering der oversættes til en detaljeret 3D numerisk grundvands-overfladevandsmodel som er anvendelig til:

1. at beregne indvindings- og grundvandsdannende oplande til kildepladser i Egebjerg området,
2. at vurdere den tilgængelige ressource for vandindvinding og dermed vandbalancens elementer såsom nedbør, fordampning, grundvandsdannelse, grundvandstilskud og drænafstrømning til vandløb,
3. at vurdere grundvandet transporttider fra grundvandsdannelse til kildepladser og strømningsretninger, og
4. at vurdere klimaændringers effekter på vandressourcen.

2.3 Modelformål

I nærværende rapport beskrives i detaljer simuleringer af indvindingsoplande, grundvandsdannende oplande, vandbalancer, trykniveau og vandløbspåvirkninger for nutids og fremtidsklima, nuværende indvinding og nul indvinding, med henblik på kortlægning af grundvandsressourcen i området, og analyse af ressourceudnyttelsens bæredygtighed, herunder mulige effekter af klimaændringer på vandkredsløb og behov for grundvandsbeskyttelse.

Det specifikke formål med nærværende opgave og modelrapport er:

- *At kvantificere grundvandsressorens størrelse, udbredelse af indvindingsoplande til udvalgte kildepladser, grundvandsdannende oplande samt alder (transporttider) af indvundet vand for både nuværende og fremtidigt klima, hvor der benyttes de seneste resultater og metoder til opgørelse af klimaændringernes effekt på det hydrologiske system*

Den anvendte metodik omfatter innovative metoder til analyse af klimaændringers effekt på hydrologien og grundvandet. Rapporten søger at evaluere den nye metodik baseret på 3D voxelmodellens 84 lithologiske enheder, der i modelleringsprocessen er reduceret til 77 forskellige hydrogeologiske enheder, med en indbyrdes gruppering af forskellige sandmagasiner til de parametre der indgår i den inverse optimering, og estimering af eller en fastholdelse af resterende enheders parametre.

Rapporten adskiller sig fra tidligere østjyske indsatsområder fx Århus Nord, Århus Syd osv. (DHI, 2004/2005) derved, at den skal formidle resultaterne med opstillingen af en detaljeret 3D geologisk voxelmodel og oversættelsen af denne model til en ret kompleks 3D numerisk model bestående af 30 beregningslag og 100x100 m grid med henblik på anvendelse i grundvandskortlægningen. Rapporten skal dermed dels formidle resultater i form af grundvandskortlægning af vandbalanceforhold af indvindingsoplande, samtidig med at den skal dokumentere og analysere erfaringer af udviklingsopgaven med den innovative voxelmodel

og tilpassede numeriske 3D strømnings-model. Rapporten struktureres derfor som en modelrapport jf. Geovejledning 7 (Refsgaard et al., 2010).

2.4 Vurdering af væsentlige usikkerhedskilder og deres potentielle betydning

Inddata til modellen er dels data fra den Nationale boringsdatabase JUPITER (geologiske beskrivelser fra boringer, grundvandstand/pejlinger, prøvepumpningsresultater/T-værdier, årlige vandindvindinger og tilladelser), dels data fra den Nationale geofysik database GERDA med PACES og TEM sonderinger. Derudover indgår vandføringssdata, synkronpejledata og medianminimumsskøn (Sandersen, 2009). En væsentlig potentiel usikkerhedskilde er derfor *datausikkerheden*, der i lyset af den relativt komplekse voxel model og oversættelsen til 3D grundvandsmodel med ca. 80 enheder, stiller et stort krav til specielt hydrauliske data (ledningsevne, magasinforhold, porøsitet mv.) for de mange vandførende og lavpermeable enheder. Hertil kommer at observationsdata er begrænset til en fast vandføringsstation i Lille Hansted å, og vandførings-synkronmålingsdata af ældre årgang (1974). Endelig er der usikkerheder i forhold til tidlige variationer i vandindvinding og pejletidsserier.

Datausikkerheden er relativ stor både vedr. hydrauliske parametre til de mange vandførende (smeltevandssand, miocænt sand osv.) og lavpermeable enheder (glimmerler, smeltevandssand, moræneler), det samme er potentiale og afstrømningsforhold jf. det relativt spinkle datagrundlag med max 100 pejlepunkter, hvor mange er påvirket af kraftige tidlige variationer, og forekomsten af blot en enkelt fast vandføringsmålestation. Det gør det naturligvis udfordrende at konfirmere den geologiske model og dokumentere modelles nøjagtighed i forhold til anvendelsen i grundvandskortlægningen (indvindingsoplande, bæredygtig indvinding, transporttider og klimaændring effekter).

Ved opstilling af den konceptuelle model (Hydrogeologiske tolkningsmodel) vil de usikkerheder, der indgår i datagrundlaget og vedr. geologisk tolkningsusikkerhed, blive overført til den hydrogeologiske tolkningsmodel. Data i den geologiske model er for Egebjerg modellens vedkommende markeret med en subjektiv markør på voxelniveau. Herved er der mulighed for at gå tilbage til den geologiske model og datagrundlaget, såfremt der skal foretages ændringer i den konceptuelle model og voxelmodellen (Henriksen et al, 2010). *Modelusikkerheden* er derfor den anden væsentlige potentielle usikkerhedskilde. Modelusikkerheden omfatter såvel inputdata (nettonedbør/nedbørskorrektion mv.), geologi-processer-randbetingelser og usikkerheden på modelkoden (MIKE SHE/MIKE 11).

Endelig er der 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.

2.5 Introduktion til modelområdet og tidligere undersøgelser

Der har siden 1968 i et samarbejde mellem Horsens kommunale værker og Danmarks Geologiske Undersøgelse, været foretaget hydrogeologiske undersøgelser i Egebjergområdet i forbindelse med vandindvinding fra Højballegårdværket (DGU, 1976). Det vurderes her at: *"Den hidtil oppumpede vandmængde (ved Højballegårdværket) stammer hovedsagelig fra grundvandsreservoirets magasin, hvilket også må forventes at være tilfældet for fremtiden. Reservoirets langtidsegenskaber er bestemt til $T_L = 3,75 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ og $S_L = 8 \%$, og det vil principielt under forudsætning af mindre ændringer i oppumpningsfordelingen være muligt fortsat at pumpe ca. 5 mill. $\text{m}^3/\text{år}$ vand årligt i endnu 100 år (marginale betragtninger giver ca. 25 år og ca. 200 år), forudsat at boringernes sænkninger ikke forøges af andre årsager end sænkninger i reservoiret. Følgevirkningerne for vandløbsafstrømningen i området har ikke været registreret og kan ikke forudsiges, men vil antagelig være moderate. Endelig kan det fastslås, at en nedsættelse af oppumpningen fra reservoiret naturligvis vil ændre sænkingsforholdene en del i gunstig retning. Dog må der under alle omstændigheder regnes med væsentlige blivende afsænkninger i store dele af området, så længe indvindingen fortsætter"* (signeret Lars Jørgen Andersen og Henrik Kærgaard).

Rapporten (DGU, 1976) som er forfattet da indvindingen toppede fra Højballegård på den anden side af 5 mio. $\text{m}^3/\text{år}$ i 1975-76 indeholder en interessant vurdering af den dybe begravede dal ved Højballegård: *"Den centrale del af dalen er beliggende under kote ca. -100 og dalens bredde under kote +-0 kan anslås til ca. 4 km eller mere. Dalens bund består, undtagen i den sydlige del, af oligocæne og eocæne aflejringer i form af meget fedt ler, der må antages at være næsten impermeabelt, mens den øvrige del af dalens bund og sider består af yngre tertiære (miocæne) aflejringer, indeholdende sandforekomster, der i væsentlig grad benyttes til vandindvinding i områderne udenfor dalen. Dalen er opfyldt af kvartære aflejringer: glaciale sedimenter bestående af moræne- og smeltevandsaflejringer og interglaciale sedimenter (konstateret i bl.a. Egebjergboringerne) bestående af sand, ler og diatoméjord. Meget taler for, at de større kvartære sandforekomster er mere eller mindre sammenhængende i hele dalområdet, både i lodret og vandretning til trods for, at de i de enkelte boringer optræder adskilt af lerlag af varierende art og mægtighed"*.

En række artikler i Nordic Hydrology beskriver resultater af længerevarende prøvepumpninger i Højballegård området (Andersen & Haman, 1970, Kærgaard, 1978; Mucha og Kærgaard, 1982). Andersen & Haman (1970) vurderer at de interglaciale aflejringer, opdeler magasinssystemet i flere adskilte magasiner. Magasinet under de interglaciale aflejringer af bl.a. ler er 'artesiske', mens at magasinerne over er 'perched' (hængende) med grundvandspejl over det piezometriske trykniveau for det dybere grundvandsmagasin.

Det vurderes (Andersen & Haman, 1970), at det er muligt, i forhold til afsænkninger, at op-pumpe 5 mill. $\text{m}^3/\text{år}$ i hvert fald i 10 år uden kritisk afsænkning i indvindingsboringerne (bortset fra 3 boringer der udviser pessimistiske data). En oppumpning på 6,5 mill. $\text{m}^3/\text{år}$ anbefales derimod ikke (Andersen & Haman, 1970). Der peges samtidig på at magasinet / den begravede dal, antageligt udbreder sig i nordøstlig retning.

Kærgaard (1978) vurderer at det for det semi-artesiske/artesiske flerlags magasinsystem ved Egebjerg gælder, at systemet har en total transmissivitet på $4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sek}$. Det totale magasintal for området er omkring 0.10. Effekten af negative grænser vurderes mindre betydende, hvilket altså understøtter ovenstående antagelse om at den dybe begravede dal udbreder sig i bl.a. nordøstlig retning og dermed ikke udgør en mærkbar negativ grænse i forhold til tolkningen af prøvepumpningsresultaterne ved Højballegårdværket. Det vurderes samtidigt at vandløbspåvirkningen indtil videre er lille i forhold til oppumpningen, der primært hentes i form af ændret "magasineringen i grundvandet".

Mucha og Kærgaard (1982) præsenterer resultaterne af en radiær-symetrisk numerisk model for tolkning af den længerevarende prøvepumpning ved Højballegård værket (Andersen & Haman, 1970). Prøvepumpningen fandt sted fra det øverste at de to smeltevandssand magasiner adskilt af diluvialt ler (drift clay). Bunden af systemet beskrives som tertiært ler med meget lav permeabilitet. Modellen kan imidlertid ikke helt beskrive forholdene, da magasinet i vestlig retning mod Lille Hansted å skifter fra artesiske til frit magasin, hvilket der imidlertid tages højde for i tolkningen.

I en rapport af Ambo (2005) ud fra historiske pejledata vurderer KANmiljø magasinforholdene omkring Højballegårdværkets indvindingsboringer som bestående af 3 grundvandsmagasiner:

- Et øvre magasin som blev udnyttet i de første drifts år. På grund af for store sænkninger anvendes dette lag ikke mere
- Et mellemliggende magasin, som er opbygget af smeltevandssand og interglacialt sand. Dette magasin anvendes i dag. En del boringer er dog erstattet af nye boringer på grund af udfældninger i filtrene.
- Et dybtliggende magasin fra forrige istid, som udnyttes i dag.

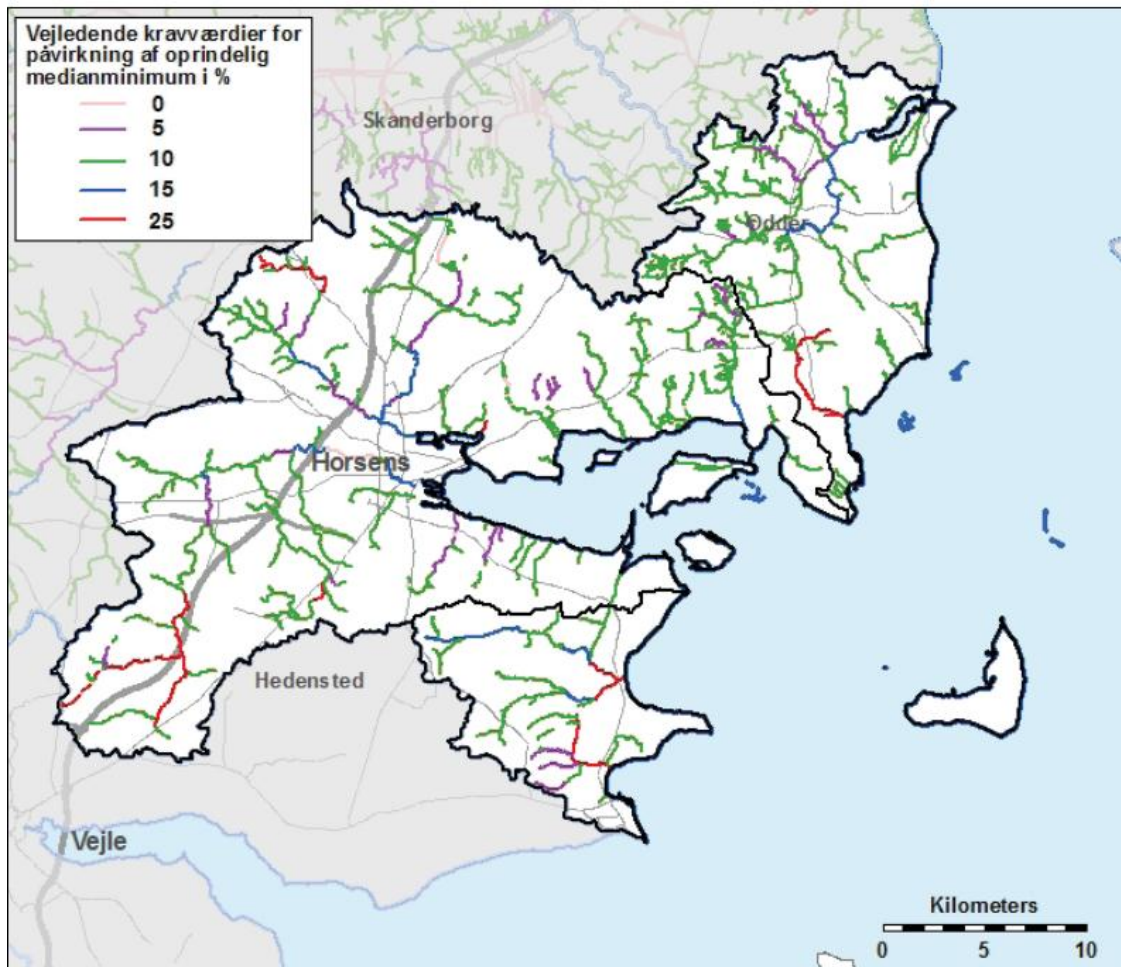
Ambo (2005) vurderer, at trykket i det dybe magasin under indvinding afsænkes til under trykket i det mellemste magasin, således at der foregår en vandtransport fra det mellemste til det dybe magasin, som følge af lækage mellem magasinerne. Det vurderes (Ambo, 2005), at ydeevnen i det dybe magasin er 2-5 gange mindre end i det mellemste magasin. Det øverste og mellemste magasin afdrænes mod vest til Lille Hansted å, mens den uforstyrrede strømningsretning i det dybe magasin er mod øst. På selve kildepladsen ses sænkninger i det dybe magasin på op til 50 m, da indvindingen var maksimal (i midten af 1970'erne, hvor indvindingen var på godt 5 mio. $\text{m}^3/\text{år}$). Sænkningerne i oplandet kan spores adskillige kilometre væk. I 2 km afstand er sænkningen i pejleboringer målt til 5 m. Det vurderes i rapporten, "at det ikke på det nuværende grundlag kan afgøres hvorledes påvirkningen af åen fordeler sig på det mellemste og det nedre magasin, men af geologiske grunde må det formodes, at påvirkningen fra det mellemste magasin har størst relativ indflydelse".

Det vurderes i DGU (1976) rapporten at årstidsvariationerne af vandstanden i indvindingsreservoirerne er begrænsede, og at responsen på ændringer i nedbørsforhold er små, specielt i forhold til responsen på oppumpningen.

2.6 Miljømål ifølge vandplan Horsens Fjord 2011

Udkastet til Vandplan for Horsens Fjord (NST, 2011) opererer med krav til vandløbspåvirkning ud fra vejledende værdier (se Fig. 2.1) for de enkelte delstrækninger. For tilløb til Nørrestrand er en reduktion på 10 % acceptabel i forhold til oprindelig medianminimum. Dels-trækninger af LL. Hansted å ved målestationen har krav helt ned på 5 %, visse steder dog 15 %. Tilløb, bl.a. Ørskov bæk, har max påvirkningskrav på 10 %. Større % -vise påvirkning kan dog accepteres, hvis det konkret vurderes at miljømålene kan opnås i forhold til hydromorfologiske og fysisk kemiske forhold.

Vandplanen operer med vejledende kravværdier til påvirkning af oprindelig medianminimum som vist i Fig. 2.1. på basis af en sådan konkret vurdering. Vandplanen siger om Egebjerg oplandet (NST, 2011): "Højballegårdværket med en indvindingstilladelse på 2,8 mio. m³/år ligger tæt på Lille Hansted Å, der har en vejledende kravværdi på 15 %. Der er udpeget indvindingsopland i Vejle Amts Regionplan 2005. Oplandet til vandværket kortlægges endeligt i forbindelse med Hovedgård-kortlægningen. Der mangler viden om grundvandvandløb-interaktionen. Dette betyder, at den beregnede påvirkning af en oprindelig medianminimumsvandføring, som følge af grundvandsindvinding, umiddelbart skønnes at være for usikker". Det er derfor et vigtigt formål med Egebjerg modellen at give et bud på påvirkningen af oprindeligt medianminimum, da der i vandplanen (med gode argumenter) ikke er givet noget bud på påvirkningen af oprindelig medianminimum.



Figur 2.1 Vejledende krav til påvirkningen af oprindelige medianminimsvandføringer (hhv. 5 og 10-25 % max. påvirkninger). Kilde: NST (2011)

Udover vurdering af vandløbspåvirkningen opererer NST i Vandplanen med en vurdering af den samlede indvindings andel af nettonedbøren (bestemt ud fra DK model 1). Her vurderes indvindingen for oplandet til Horsens fjord at udgøre ca. 12 % af nettonedbøren. Man kan ikke foretage et skøn på grundvandsmagasin niveau, da magasinerne ikke er kendte. Vurdering for Horsens fjord som helhed er problematisk, da en indvinding på 35 % af nettonedbøren må vurderes at give et for optimistisk skøn af bæredygtig ressource. Det er indvindings- % i forhold til grundvandsdannelsen til de primære magasiner der bør udgøre grundlaget for vurderingen.

I et område med så kompleks geologi som Egebjerg, bør man tage udgangspunkt i grundvandsdannelsen til beregningslag 2 (Fig. 7.4 og 7.5), da en meget stor del af nettonedbøren afstrømmer via dræn og vandløb fra lag 1. En vurdering på oplandsniveau er formentlig den mest fremkommelige. Spørgsmålet er hvilken indvindings- % der er bæredygtig vurderet i forhold til lag 2, og hvordan vandkvalitetsaspekter og afsækning er med til at definere bæredygtig ressource.

Sandersen et al. (2009) beskriver nogen af de problemer der er i oplandet med bl.a. afsenkning og vandkvalitet, hvor der er konstateret indvindingsbetingede problemer med en række stoffer, ikke mindst arsen. Med de markante afsænkninger i midten af 70'erne på op til 50 meter for det dybeste magasin, forøges risikoen for vandkvalitetsproblemer, og det kan have været en del af årsagen til arsen problemerne, at man først har sænket grundvandsspejlet ret markant i midten af 1970'erne som følge af meget intensiv indvinding, og efterfølgende hævet det igen i forbindelse med en neddrogning af indvindningen, hvorved der er sket ændringer i iltningsforhold (oxiderede lag som reduceres i takt med vandspejlsstigningen).

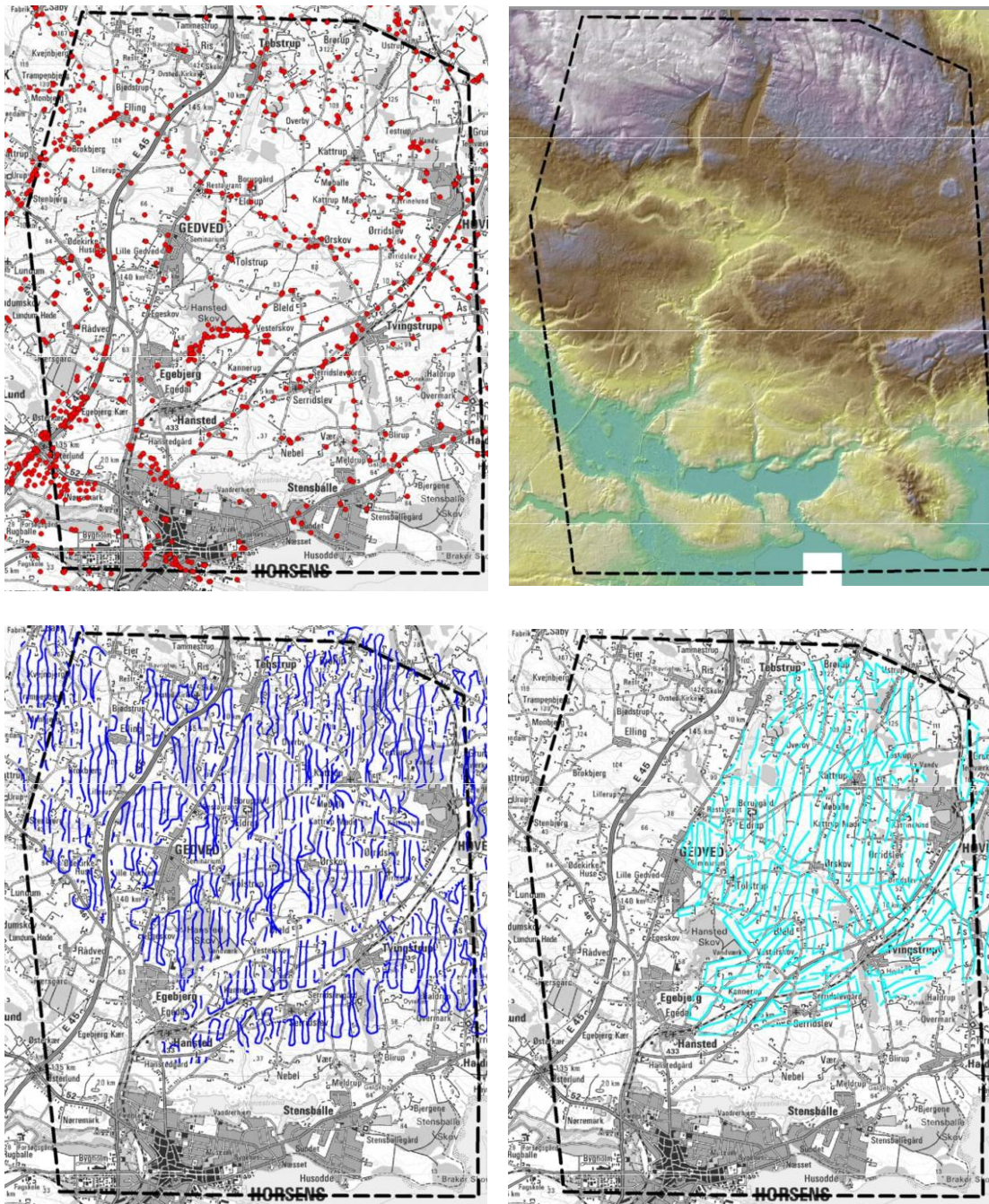
3. Geologisk model

I nærværende afsnit gives en kort opsummering af den opstillede 3D voxel model som er tolket for et ca. 200 km² område der dækker Egebjerg OSD og Tebstrup området indenfor Hovedgård kortlægningsområdet. Beskrivelsen sammenfatter og giver et resume af den geologiske model (Møller og Jørgensen, 2011).

Forud for den geofysiske kortlægning i området forelå der udelukkende lithologiske beskrivelser for 50-75 % af de boringsoplysninger der foreligger for området (Jørgensen et al., 2010). De geofysiske kortlægninger er baseret på SkyTEM (airborne transient electromagnetic method) og PACES (pulled array continuous electrical sounding method). Herved er det muligt at foretage en detaljeret kortlægning af de dybere lag ned til dybder på 200 m (SkyTEM), samtidig med at PACES muliggør en nærmere kortlægning af de terrænnære lag ned til 25 m's dybde. For begge kortlægningstyper er der anvendt en afstand mellem kortlægningslinier på 250 m. Ved en kombination af PACES, SkyTEM og borehulsdata (Fig. 3.1 og 3.2) har det været muligt at opnå et solidt grundlag for tolkningen af den opstillede 3D voxel model. Voxel diskretiseringen er 100 x 100 m i horisontal retning og 5 meter i vertikal retning, og består dermed af i alt 1.5 mill. voxels organiseret i 84 'voxel-enheder'. Den nærmere tolkningsmetodik er beskrevet i (Jørgensen et al., 2010; Møller og Jørgensen, 2011).

Den geologiske model består af en rumlig geologisk model og af en hydrostratigrafisk model. Den rumlige geologiske model er udarbejdet som en kombineret voxel- og lagmodel, der består af sværme af fladetolkningspunkter, der beskriver forskellige lagflader. Desuden er de begravede dale modelleret, men for at kunne indarbejde deres kompleksitet rumligt, er de modelleret i et voxelgrid. Dale og lagflader er kun modelleret i de områder, hvor geologien er rimeligt kendt og tolkbar. Generelt er geologien forholdsvis godt kendt på trods af, at kompleksiteten er stor. Det skyldes først og fremmest indsamlingen af SkyTEM i en stor del af området. Hvor SkyTEM ikke er indsamlet, i den sydlige del af området – er usikkerheden generelt stor.

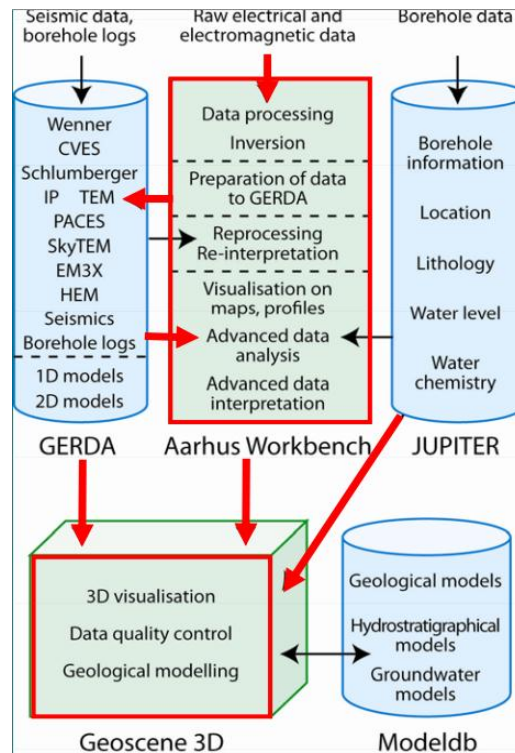
Der er tolket på lagflader fra Palæogen, Miocæn, Kvartær, samt et stort antal kvartære begravede dale fordelt i 7 forskellige generationer. Den kvartærgeologiske lagserie er inddelt i to sekvenser, hvoraf den ældste sekvens indeholder langt de fleste begravede dale. De to sekvenser er adskilt af en formodet erosionshorisont. Over denne horisont findes søaflejringer fra Holstein Interglacial. Området gennemskæres af en kraftigt deformeret forkastningszone og en relativt stor del af aflejringerne er glacialtektonisk forstyrret. Sidstnævnte forstyrrelser er sket meget sent i områdets dannelseshistorie, og hele lagserien ned til palæogenet er dermed forstyrret i dette område.



Figur 3.1 Oversigt over datagrundlag for 3D voxel modellen (top/vestre: boringsgrundlag, top/højre: topografi, bund/venstre: SkyTEM linier og bund/højre: PACES linier) (kilde: Jørgensen et al., 2010)

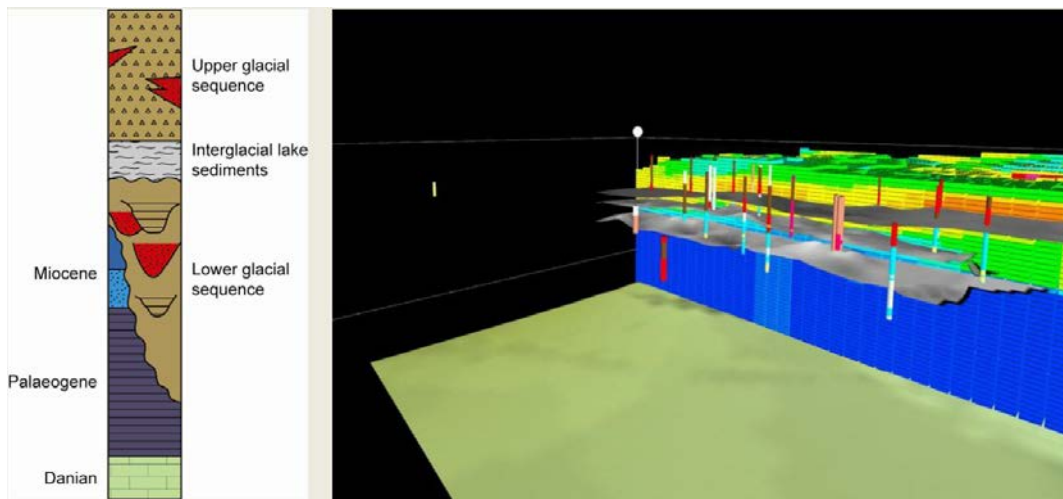
Den hydrostratigrafiske model udgøres i dette projekt af en såkaldt lithostratigrafisk model. Denne model er udelukkende opstillet som voxelmodel, hvor voxelerne definerer hele områdets lithologi. Alle grovkornede lag med vandindvindingsinteresse befinder sig i miocæne eller kvartære lag. De miocæne lag forekommer kun i et par mindre dele af området, og udgøres primært af glimmerler. Der forekommer dog lag med kvartæssand. Størstedelen af de kvartære lag består af glacialt ler, især moræneler, men også af smeltevandsler. Indlejret i dette ler findes hovedparten af områdets grundvandsmagasiner, som består af smelte-

vandssand og –grus. Disse sandlag findes i adskilte, usammenhængende enheder, typisk i de nedre dele af de ældre dale, men der ses også mere terrænnære enheder af smeltvandssand. Til brug ved voxelmodelleringen er både SkyTEM- og PACES-datasættet konverteret til 3D- resisitvitiitsgrid. Disse grids har identisk diskretisering med de modellerede voxelgrids og har været et nyttigt element i den benyttede tolkningsmetode. Voxeltolkningen er gennemført i dynamiske tolkningsprofiler, der hele tiden flyttes stepvist gennem modelrummet samt på horisontale snit, der flyttes op og ned gennem lagserien.



Figur 3.2 Tolkning i Geoscene 3D med input fra fra bl.a. GERDA og JUPITER og output til den hydrologiske model i MIKE SHE (Modeldb) (kilde: Jørgensen et al., 2010)

Den rumlige geologiske model er opbygget sådan at der nederst i lagserien findes Danien kalk som antages ikke at have væsentlig betydning for ferskvandskredsløbet. Herovenpå følger palæogene lag af Søvindmergel og Lillebæltssler. I mindre områder findes erosionsrester af miocæne lag af glimmerler og kvartssand/glimmersand. De tertiære lag er kraftigt eroderede og overlejret af primært glaciale sedimenter. Overfladen af det palæogene ler har et markant relief med højdeforskelle på mere end 400 m. Erosion af tunneldale tilhørende mindst 7 forskellige generationer, som nu er begravede, er ansvarlige for denne del af erosionen. Øverst i lagserien ses en 20-40 m tyk sekvens af glaciale, primært lerede lag fra Saale og Weichel. Hele lagserien er stedvist markant forstyrret af galcialtektonisk deformation. Dette ses såvel i nutidens terræn som i data (Fig. 3.3).



Figur 3.3 Illustration af tolkning af voxelgrid i 100x100x5 meter

Import af den geologiske model til den numeriske grundvandsmodel (MIKE SHE) er herefter udført ved at opsplitte det lithologiske 3D-grid til 84 stk. 2D-grids af 5 meters tykkelse (Møller og Jørgensen, 2011).

Efterfølgende er disse konverteret fra 2D-Surfer grids til ArcAscii format, som er blevet indlæst til MIKE SHE. Importen af de 84 ArcAscii grids til MIKE SHE er udført vha. et script, der indlæser alle de dannede ArcAscii grids til MIKE SHE på én gang. Det geologiske grid kommer på denne måde over i MIKE SHE med helt identisk afgrænsning og diskretisering.

Der er herefter defineret 30 beregningslag i MIKE SHE tilpasset laggrænser for voxelerne fra den geologiske model (100x100x5 m).

Efterfølgende er der udarbejdet en tabel, der oversætter symbolværdien for en lithologisk enhed til en startværdi for hydrauliske parametre (i Bilag 1 er listet initialparametre for testkørsel hhv. horisontal ledningsevne-kh, vertikal ledningsevne-kv, magasinantal-sy, specifik magasinkoefficient-ss og porøsitet-Por). Værdierne fra det lithologiske voxelgrid anvendes til at beregne et volumenvægtet gennemsnit for de hydrauliske parametre bl.a. ledningsevner for hver beregningscelle via en rutine i MIKE SHE. Beregningsnettet i den hydrauliske model er dermed horisontal sammenfaldende med voxelgriddet (100x100 m), men aggregeret vertikalt, i form af et øvre lag der går 2 meter under grundvandspejlet, 5 meter lag til ca. kote -100 m, og herfra gradueret fra 10 meter lag til 20 meter lag i størst dybde.

For øverste beregningslag er jordartskort indlagt som en linse i MIKE SHE. For dette lag beregnes startværdien som et vægtet gennemsnit af fordelingen af sand og ler i jordartskortet og for geologien i det lithologiske grid (Møller og Jørgensen, 2011).

I bilag 1 er vist en oversigt over de 84 lithologier der indgår i voxelmodellen, med startværdi parametre skønnet ud fra den geologiske model. Senere er der foretaget en gruppering af ledningsevner for vandførende lithologier (sand- og grusmagasiner) i 6 klasser (se kapitel 4).

4. Øvrige data

Den hydrologiske model tager med hensyn til inputdata udgangspunkt i den opdaterede version af DK-modellen (Område 5 – Midtjylland, version 2010). I nærværende afsnit beskrives kort antagelser om inputdata til rodzonemodulet, indvindingsdata, samt analyse af hydrauliske parametre til modellen.

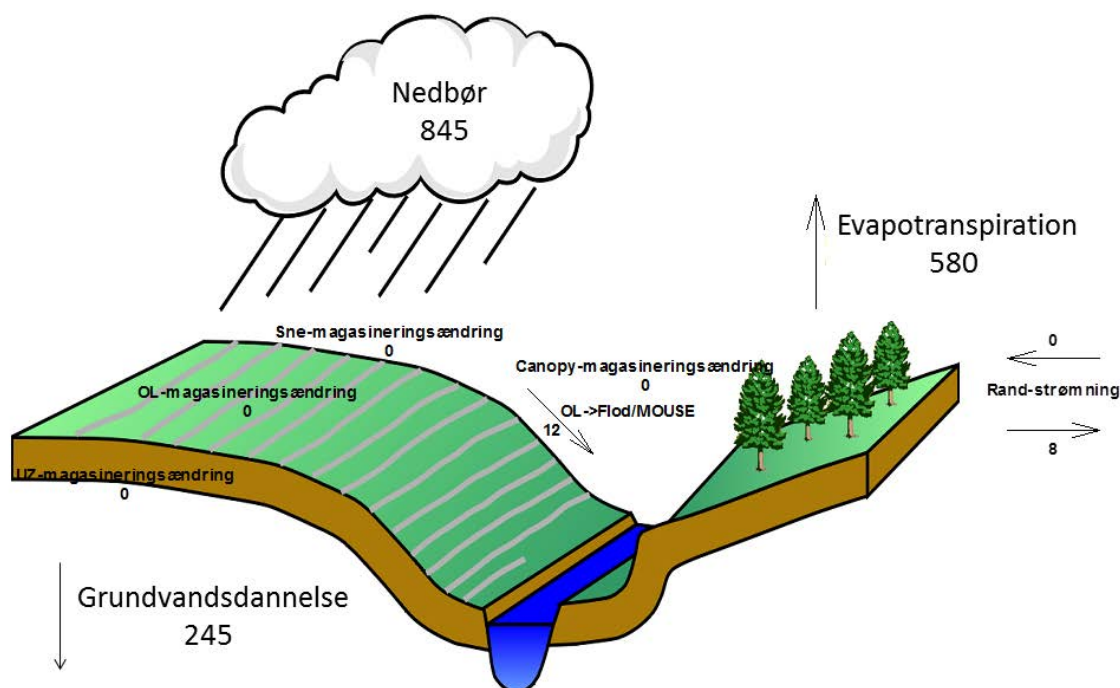
4.1 Rodzonemodul

Nettonedbøren beregnes med det umættede zone-modul "Two-Layer", der er en integreret del af løsningen i MIKE SHE. Som klimainput er der anvendt døgnværdier for nedbør, reference fordampning samt temperatur baseret på DMIs klimagrid. Datagrundlaget er klimadata indkøbt under overvågningsprogrammets fællesaftale om indkøb af klimadata, der er downloaded fra DMI's NOVANA klima-web site (NOVANA.dmi.dk).

Der er anvendt de mest detaljerede data, der var uploadet til hjemmesiden på det tidspunkt modellen blev opstillet. For nedbørsdata er der anvendt 10x10 km klimagrid for hele beregningsperioden (1990-2009). For temperatur og potentiel fordampning er der frem til 1. januar 2000 anvendt 40x40 km klimagrid, mens der i den resterende periode er anvendt en opløsning på 20x20 km. Nedbørsdata er korrigeret på månedsniveau ud fra faste korrektioner, mens fordampningen er beregnet på basis af Makkink. Der er dermed ikke benyttet de nyeste anbefalinger vedr. brug af bl.a. 'dynamisk korrigeret nedbør', idet vandbalanceprojektet (Refsgaard et al. 2011), først er afrapporteret efter at modelarbejdet blev påbegyndt i efteråret 2010.

I Fig. 4.1 er vist resultatet af en testkørsel for 2000-2004 af nedbørsinputtet med two-layer modellen, der er en integreret del af MIKE SHE modellen. Størrelserne i vandbalancen afhænger derfor af modelparametre, idet den aktuelle fordampning afhænger af det simulerede grundvandsspejl, og dermed hvor meget vand der hentes op fra terrænnært grundvand i fordampningsrutinen i two-layer. Denne størrelse er derfor 'dynamisk' og parameterafhængigt. Figuren viser at vandbalancen for Egebjerg området har følgende overordnede størrelser:

- Nedbør (N) = ca. 850 mm/år
- Aktuell fordampning (EA) = ca. 580 mm/år
- Grundvandsdannelse = ca. 245 mm/år
- Vandindvinding = ca. 20 mm/år

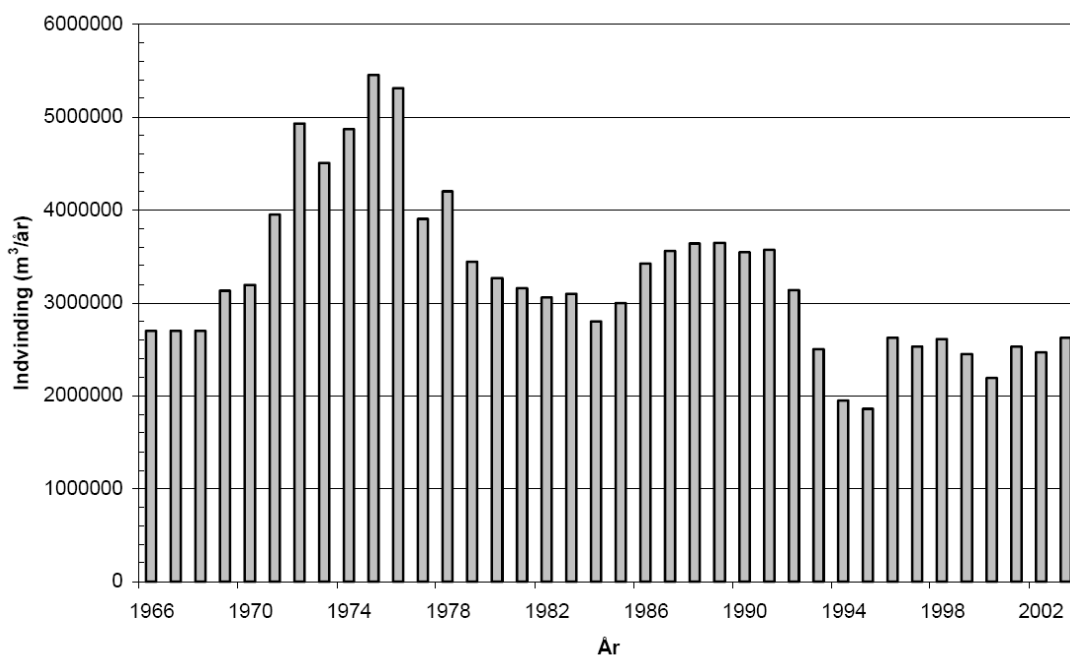


Figur 4.1 Vurdering af vandbalancen ved hjælp af two-layer modellen som input til grundvands- overfladevandsmodellen (MIKE SHE) på baggrund af testkørsel for (gennemsnit for 2000-2004)

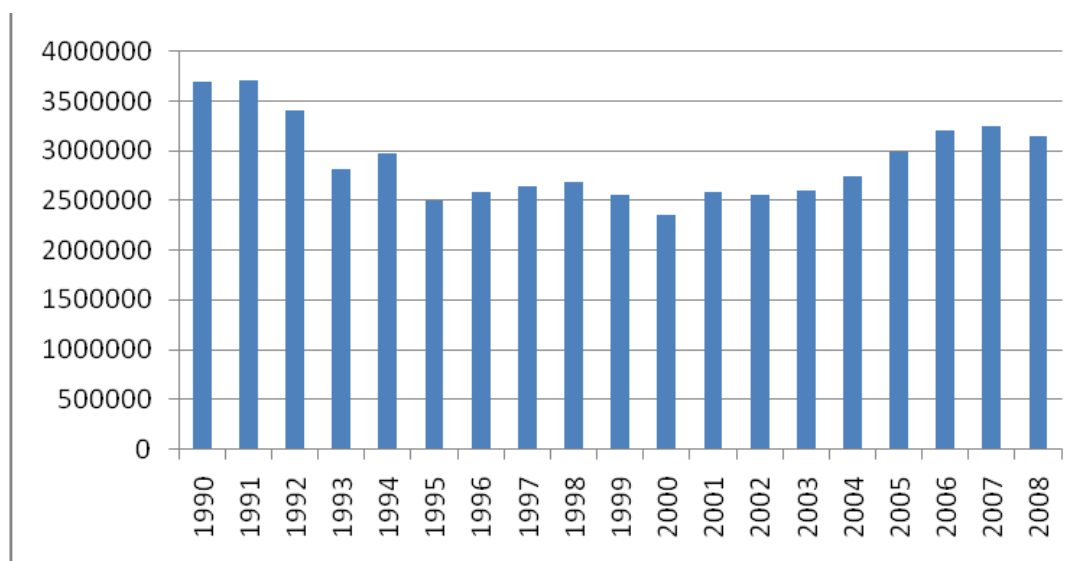
4.2 Indvindinger

Indvindinger er indlagt i modellen fra JUPITER, hvor de er lagret på anlægsniveau. Samtlige anlæg er medtaget i modellen, og indvindingen er fordelt ud på indtagsniveau. For anlæg med mere end ét indtag er det antaget, at indvindingen er ligelig fordelt mellem anlæggets aktive indtag. Alle indvindinger er indlagt med årlige værdier. Der er set bort fra indvinding til markvandning. Modelleringen omfatter perioden 1990-2009, hvor indvindingen fra Højballegårdværket, der udgør knap 90 % af den samlede indvinding i modelområdet, udgjorde mellem 2 og 3.5 mio. m³/år. Det skal bemærkes at indvindingen ved Højballegårdværket har været endnu større i halvfjerdsere, hvor den toppede midt i 70erne med ca. 5.5 mio. m³/år (Fig. 4.2) Fig. 4.3 viser der viser den samlede indvinding indenfor modelområdet for 1990-2008).

Figur 4.4 viser fordeling af indvinding jf. tilladelser i modelområdet.

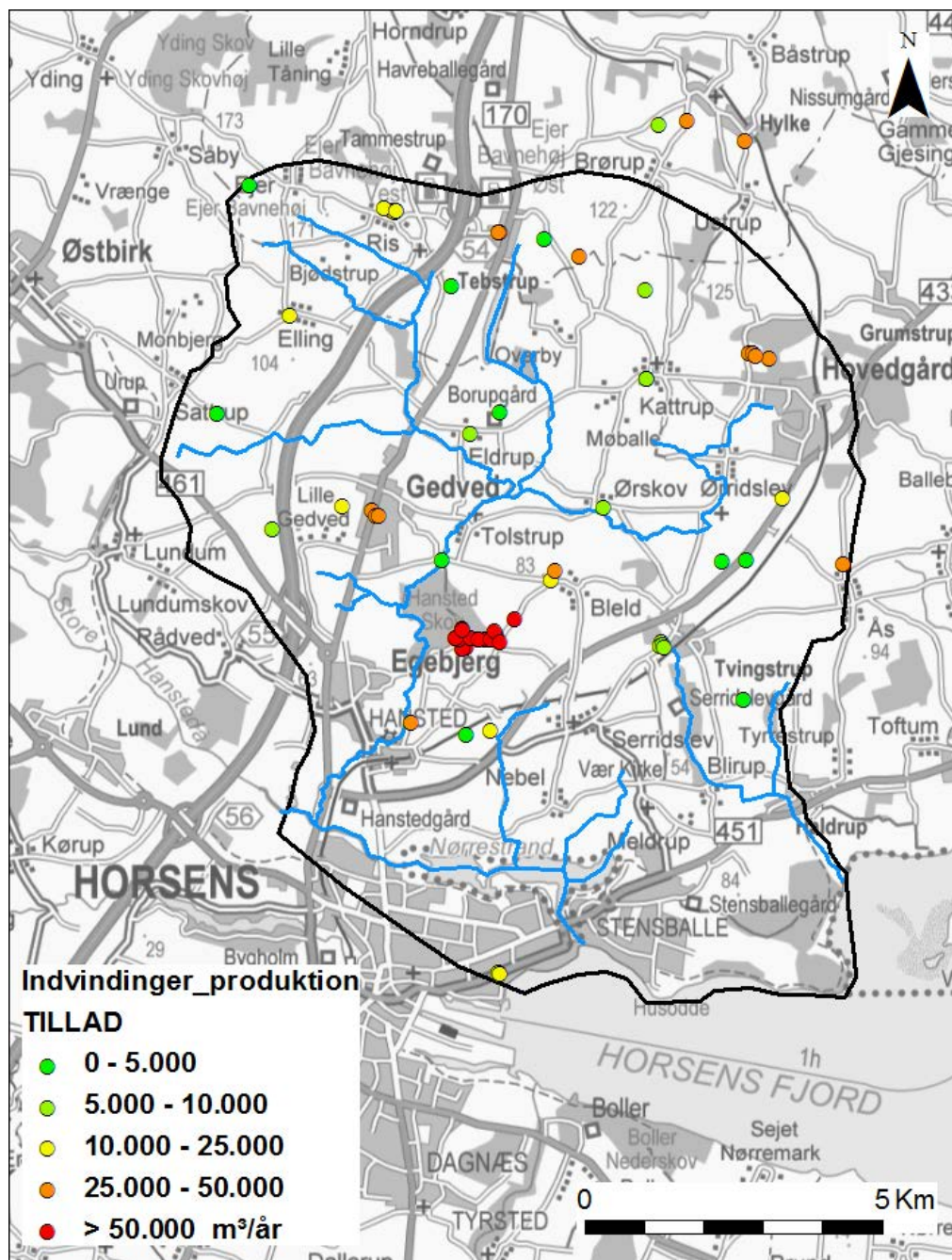


Figur 4.2 Indvinding fra Højballegårdværket (1966-2002), kilde: Ambo (2005)



Figur 4.3 Indvundne vandmængder i modelområdet 1990-2008 (m³/år)

De to figurer (Fig. 4.2 og 4.3) viser at indvindingen fra sin start i 60'erne toppede i midten af 70'erne hvor alene Højballegårdværket oversteg 5 mill. m³/år. Derefter faldt indvindingen frem til 1983 hvorefter den igen steg til godt 3,5 mill. m³/år i slutningen af 80'erne og starten af 90'erne. Fra 1995 til 2003 var indvindingen ca. 2.5 mill. m³/år. I de senere år er indvindingen steget til godt 3 mill. m³/år.



Figur 4.4 Vandindvindingsstilladelser indenfor modelområdet, hvor den anførte vandindvindingsstilladelse er fordelt ud pr. aktiv boring.

Trin-1 kortlægningen angiver tidsvariationen for den årlige indvindingsmængde 2001-2007 men gør ikke rede for den nærmere fordeling af indvindingen på borer og nævner heller ikke evt. tidlige sæsonvariationer i indvindingsmængden (Sandersen et al., 2009). Det er

problematisk, da evt. tidlige variationer i indvinding f.eks. ved Højballegårdværkets boringer, vil kunne give problemer, ikke så meget i forhold til indvindingsoplande, men i forhold til ønsket om en veldokumenteret og velkalibreret hydrologisk model.

Ambo (2005) vurderer at det "for Højballegårdværkets boringer gælder, at tolkningen af de udførte prøvepumpninger har givet langtidsparmetre for en del boringer... Effekten af det manglende kendskab til ydelser og driftsperiode er demonstreret ved simuleringen af sænkningerne i Bor. 202... Simuleringen er baseret på de samlede årlige oppumpninger, og afstanden til Bor. 202 fra indvindingsboringerne er så tilpas stor (1500 m), at kildepladsen kan opfattes som en enkelt boring... Det ses, at op til ca. 250 måneder svarende til år 1986 opnås en god simulering, men herefter bliver de simulerede sænkninger for store. Årsagen hertil er følgende: Bor. 202 er filtersat i det mellemste magasin, hvorfra størsteparten af indvindingen foregik ved værkets opstart. Med tiden blev indvindingsboringer i det mellemste magasin, hvorfra størsteparten af indvindingen foregik ved værkets opstart lukket og erstattet af boringer i det nederste magasin". Dette betyder, at den oppumpning, som er anvendt i Ambo (2005)'s simulering, reelt er for stor i forhold i forhold til det mellemste magasin og derfor bliver sænkningerne også simuleret for store i det mellemste magasin. En mere præcis simulering efter ca. 250 mdr. kræver derfor en korrekt fordeling af oppumpningen som funktion af tiden på det mellemste og det dybe magasin, som Ambo (2005) også klart giver udtryk for.

Vurderingerne i Ambo (2005) giver systematiske forskelle på simuleret vandspejl i 1500 meters afstand fra indvindingen i det mellemste magasin på ca. 2 meter, mens målte variationer indenfor året er af størrelsesordenen 1-2 meter.

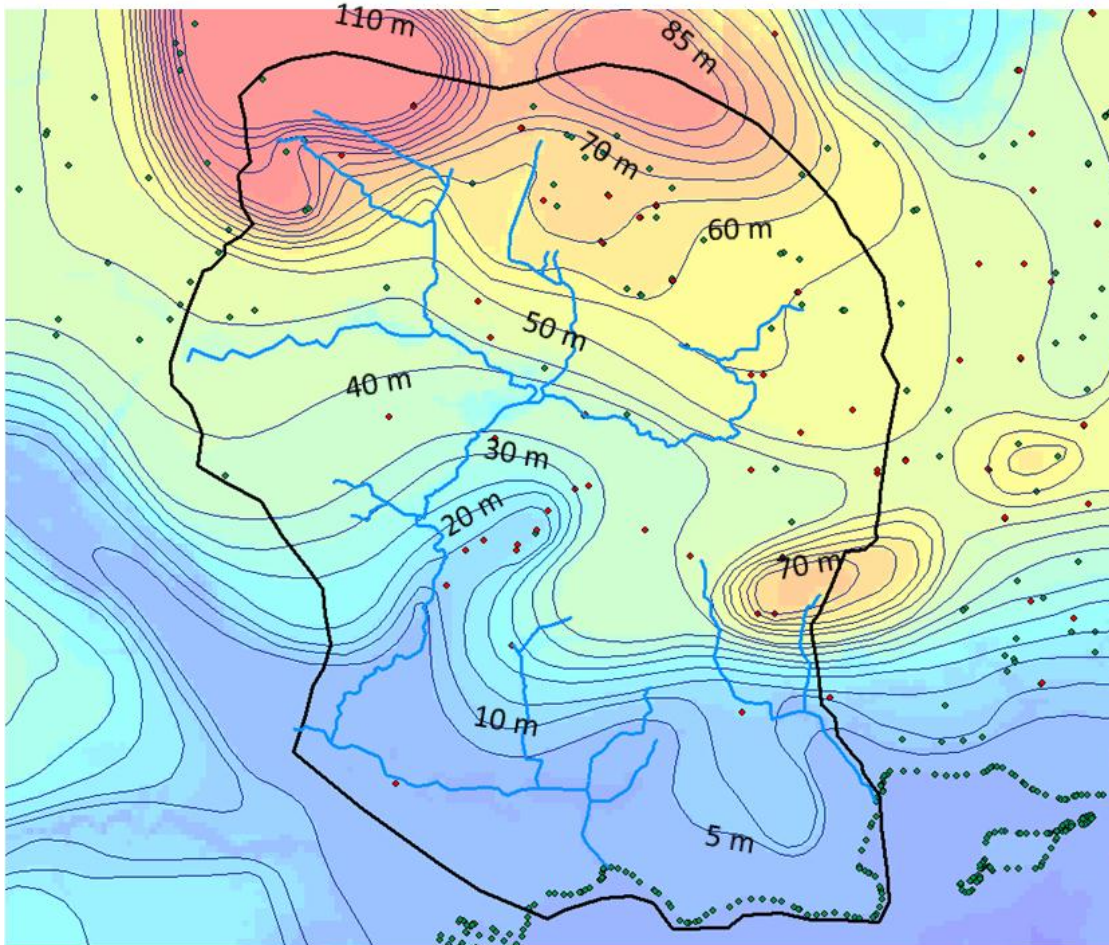
Jf. Ambo (2005) anbefales det, da sænkningerne i indvindingsboringer er relativt store, at sænkningen minimeres ved at ændre på boringernes drift i forhold til boringernes ydeevne. Analysen viser, at der anbefales en fordeling af ydelser på mellem 10 og 33 % for boringer i det mellemste magasin, og mellem 12 og 29 % for boringer i det dybere magasin. Der foreligger imidlertid ikke nogen vurdering af anbefalet fordeling mellem mellemste og dybere magasin i rapporten. Yderligere anbefaler Ambo (2005) sænkningerne reduceret ved at øge driftstiden, som vurderes at kunne have en positiv effekt på arsen indholdet der er problemstoffet. Det foreslås at værket kører i 20 timers drift, hvis dette er muligt.

Det vurderes, at den jævne fordeling af indvindingen på boringerne ved Højballegårdværket og årlige indvindinger er den bedst mulige antagelse på foreliggende kortlægningsgrundlag (Bilag 2 lister den fordeling der er antaget for samtlige kildepladser i området).

Det konstateres, at det kan blive vanskeligt at opnå god kvantitativ performance på modellen, specielt i forhold til simulering af residualværdier på trykniveau, da de tidlige variationer i indvindingen, og det manglende kendskab til variationer fra dag til dag, ja time til time, på de forskellige indvindingsboringer, og fordelt mellem mellemste og dybe magasin, ikke kan indbygges detaljeret i modellen, da der ikke foreligger data herfor indrapporeret til JUPITER fordelt på boringer og i form af dags, uge eller månedsværdier.

4.3 Grundvandspotentiale og pejledata

Grundvandspotentialet er interpoleret ud fra eksisterende potentialebilleder samt synkronpejlinger og en analyse af den geologiske model i Geoscene (Figur 4.5).



Figur 4.5 Potentiale billede for undersøgelsesområdet omkring Egebjerg og den numeriske modelafgrænsning på basis af GIS tema fra Vejle amt (Sandersen et al., 2009)

Potentialebilledet i Fig. 4.5 er baseret på et ældre potentialebillede fra fase 1 kortlægningen. Der er enkelte dybe dale der skærer gennem modelranden, dels i den nordøstlige del af modellen i området lige syd for Ejer Baunehøj, dels gennem den østlige rand. Langs den østlige modelrand, kan det ikke helt udelukkes, at der sker en udstrømning af grundvand fra modelområdet og mod øst gennem de dybe dalsystemer der skærer modelranden.

Et forhold der er med til at gøre det vanskeligt at vurdere grundvandsskellets præcise placering, er den 'storskala' anisotropi som systemet af gennemskærende dybe dale skaber i modelområdet. Man kan derfor ikke entydigt antage at grundvandsskel går vinkelret på potentialelinier, når man arbejder med et anisotropt system. Hvis der udstrømmer vand fra Egebjergområdet og mod sydøst gennem den dybe dal, vil det betyde at det simulerede grundvandsniveau i den nordøstlige del af modelområdet kan simuleres for højt i forhold til de observerede trykniveauer, ligesom at grundvandsafstrømningen til vandløb i de øverste vandløb i dette område evt. vil blive overvurderet. En oversigt af pejledata (incl. synkron-

pejlinger) fremgår af Bilag 4. Udvalgte tidsserier er vist nedenfor i Fig. 4.6 er hentet fra (Ambo, 2005). I Fig. 4.7 er placering vist. Tabel 4.1 lister afsænkingsdata for 1977/2004.

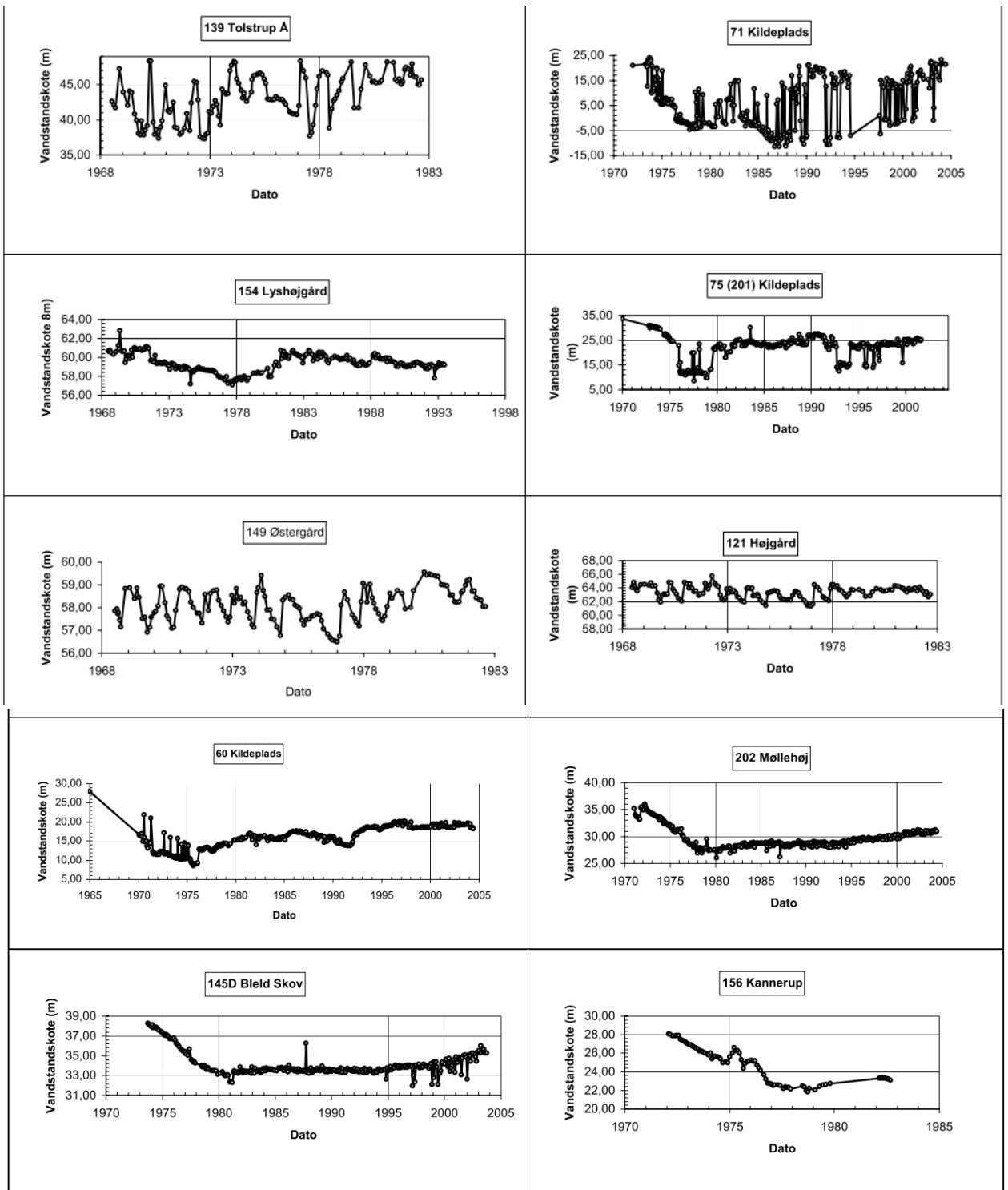
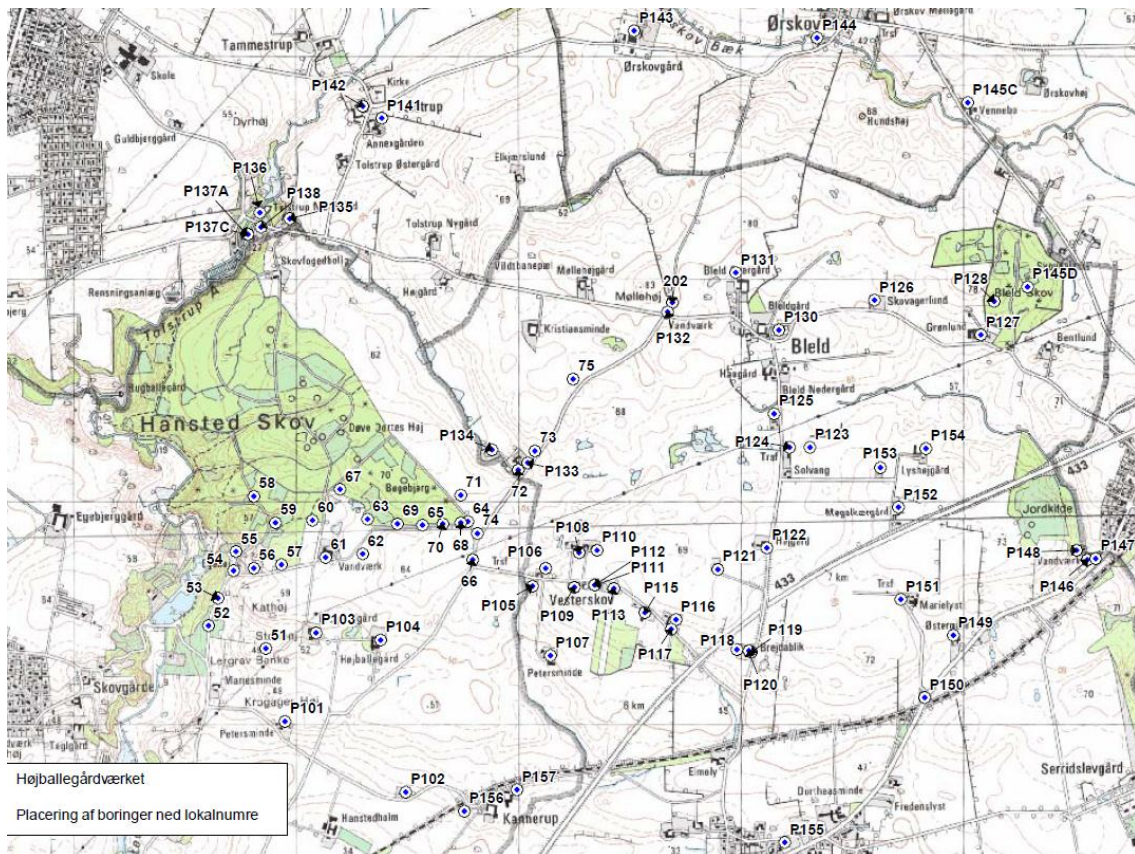


Fig. 4.6 Udvalgte tidsserier fra Egebjerg området. Boring 71 ligger centralt i sænkningstragten fra Højballegård-værkets (max sænkning knap 40 m), boring 75 ligger i nordøstlig retning (max sænkning godt 20 m). Boring 202 ligger 1.5 km i nordøstlig retning (max sænkning godt 10 m). Boring 45D ligger godt 2 km i øst-nordøstlig retning (max sænkning godt 5 meter). Placeringer af samtlige borer er vist i figur 4.6 (Kilde: Ambo, 2005).



Figur 4.7 Lokalisering af boringer i Højballegård området (Ambo, 2005)

Tabel 4.1 Vurderede afsænkning for 1977 og 2004 (Ambo, 2005) i meter. Kun boringer hvor der foreligger vurdering for 2004 er medtaget i nærværende tabel, se rapport.

Boring / rovandstand kote m	DGU nr	1977 sænkning, m	2004 sænkning, m
56 / 23,5	DGU 107.586	12,2	4,5
57 / 28,0	DGU 107.587	25,6	8,0
59 / 26,6	DGU 107.589	17,5	5,4
60 / 28,0	DGU 107.590	14,7	9,6
61A / 27,0 pumpeboring 2004	DGU 107.517	23,8	16,0
62A / 30,0 pumpeboring 2004	DGU 107.553	25,0	20,8
63A / 30,0 pumpeboring 2004	DGU 107.691	20,8	16,3
64 / 34,0 pumpeboring 2004	DGU 107.654	34,0	18,0
65 / 35,0	DGU 107.655	36,6	12,2
66 / 34,0	DGU 107.667	31,5	13,5
67 / 30,0	DGU 107.588	17,6	8,3
68 / 34,0 pumpeboring 2004	DGU 107.704	22,4	18,0
69 / 29,0 pumpeboring 2004	DGU 107.719	21,1	12,6
70 / 27,0 pumpeboring 2004	DGU 107.733	16,4	9,5
71 / 36,9 pumpeboring 2004	DGU 107.738	39,7	29,9
72 / 34,0 pumpeboring 2004	DGU 107.799	49,0	22,0
73 / 30,0 pumpeboring 2004	DGU 107.800	31,0	17,0
74 / 30,0 pumpeboring 2004	DGU 107.873	28,7	20,5
75(201) / 36,0 pumpeboring 2004	DGU 202.674	24,2	17,0
202 / 38,0	DGU 107.701	10,5	7,2
104 / 49,7	DGU 107.596	1,8	0,2
143 / 41,5	DGU 107.118	8,5	6,0
144 / 40,5	DGU 107.632	0,0	0,0

De vurderede sænkninger i tabel 4.1 (Ambo, 2005) udgør et grundlag for en nærmere kvalitativ vurdering af modellens evne til at simulere afsænkningen ved kildepladsen og i afstande herfra, ud fra dels referencekørslen og dels kørslen med nul-indvinding. Det forbliver dog en kvalitativ vurdering, idet en kvantitativ vurdering ville kræve bedre styr på fordelingen af indvindingen, og tidlige variationer i indvindinger der som nævnt ikke foreligger i JUPITER. Ambo (2005) vurderer afsænkninger i forhold til såvel 1977 som 2004.

4.4 Hydrauliske parametre

Udover den omtalte litteratur hvor der er vurderet bl.a. T-værdier for borerer ved Højballerådværket (DGU, 1976; Kærgaard, 1978 og Mucha og Kærgaard, 1982) foreligger der gentolkede hydrauliske parametre i en prøvepumpningsrapport udarbejdet af KANmiljø (Ambo, 2005). I tabel 4.2 er vist en oversigt over T-værdi data (m^2/s) relateret til lithologi ud fra en analyse med Geoscene. Placering af borerer (Lokal ID) fremgår af figur 4.7.

Tabel 4.2 Oversigt over T-værdi data relateret til enheder i den lithologiske model ud fra den samlede vurdering af prøvepumpningsdata i Ambo (2005).

DGU NR	XUTM	YUTM	T-værdi m^2/s	Intake_center Dybde (m)	Lokal ID	lithologi ID
107. 517	554046	6196538	0.005	91,5	61	33
107. 553	554213	6196557	0.007	87	62	8
107. 581	553506	6196132		75	51	8
107. 582	553519	6196235		25,5	52	8
107. 583	553560	6196359	0.0105	38,5	53	7
107. 585	553640	6196568		35	55	32
107. 586	553722	6196489	0.00736	49	56	8
107. 587	553847	6196507	0.006	65	57	8
107. 589	553819	6196695	0.03	54	59	32
107. 590	553984	6196704	0.0051	58	60	32
107. 591	554234	6196709	0.008	76	63	8
107. 632	556256	6198871		10		8
107. 642	556110	6195262		18,5		8
107. 654	554686	6196699	0.00485	130	64	8
107. 655	554480	6196687	0.00733	79	65	8
107. 667	554706	6196530	0.0053	75	66	7
107. 668	553149	6189526	0.015	16	67	
107. 674	555157	6197339	(0.0023)*	128,5	75	8
107. 701	555605	6197683	0.00655	81,5	202	8
107. 704	554651	6196693	0.00742	71	68	33
107. 719	554367	6196688	0.0124	79,25	69	8
107. 733	554571	6196689	0.0201	79,5	70	33
107. 738	554654	6196818		126,1	71	8
107. 800	554984	6197018	(0.002)*	139	73	8
107. 873	554730	6196647	0.00423	137,5	74	8

*Bestemt ud fra specifik kapacitet (Ambo, 2005)

Det fremgår af tabel 4.2 at en del af T-værdierne umiddelbart ud fra filtermidtpunktet relaterer sig til lithologi 7 eller 8 som er smeltevandsler og moræneler, og derudover at det primært er lithologisk enhed 32 og 33 der er data for.

Resultatet af en radiær symmetrisk tolkning (Mucha og Kærgaard, 1982) ved boringen med Lokal ID = 61 (DGU 107.517) viste at begge dybere magasiner ved Højballegårdværket har en transmissivitet på $6.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ og en magasinkoefficient på 3.4×10^{-4} , altså i rimelig god overensstemmelse med Ambo (2005) vurdering for boring 61. Den hydrauliske ledningsevne for den lavpermeable ler der dækker/ og adskiller magasinerne blev af Mucha og Kærgaard (1982) bestemt til $5,4 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ (det var antaget, at der ikke var nogen anisotropi vertikalt/horisontalt for leren dvs. $k_x = k_z$).

Den ældre litteratur (Andersen og Kærgaard, 1970; Kærgaard, 1978) baseret på længerevarende prøvepumpningsanalyser ved boring 61 bekræfter resultater på transmissivitetsværdier i størrelsesordenen $3 - 7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, magasin tal på 0.08 – 0.10 og artiske magasinkoefficienter for sandlag på ca. 0.0003. Litteraturen er dog ikke helt enig mht. til vurderingen af om det dybeste lag har højere T-værdi end det mellemste lag. Mucha og Kærgaard (1982) når ud fra radiærsymmetrisk tolkning frem til at de to lagserier har ca. samme T-værdi, mens Kærgaard (1982) slutter at det dybeste lag har en T-værdi der er ca. 3 gange så høj som det mellemste lag.

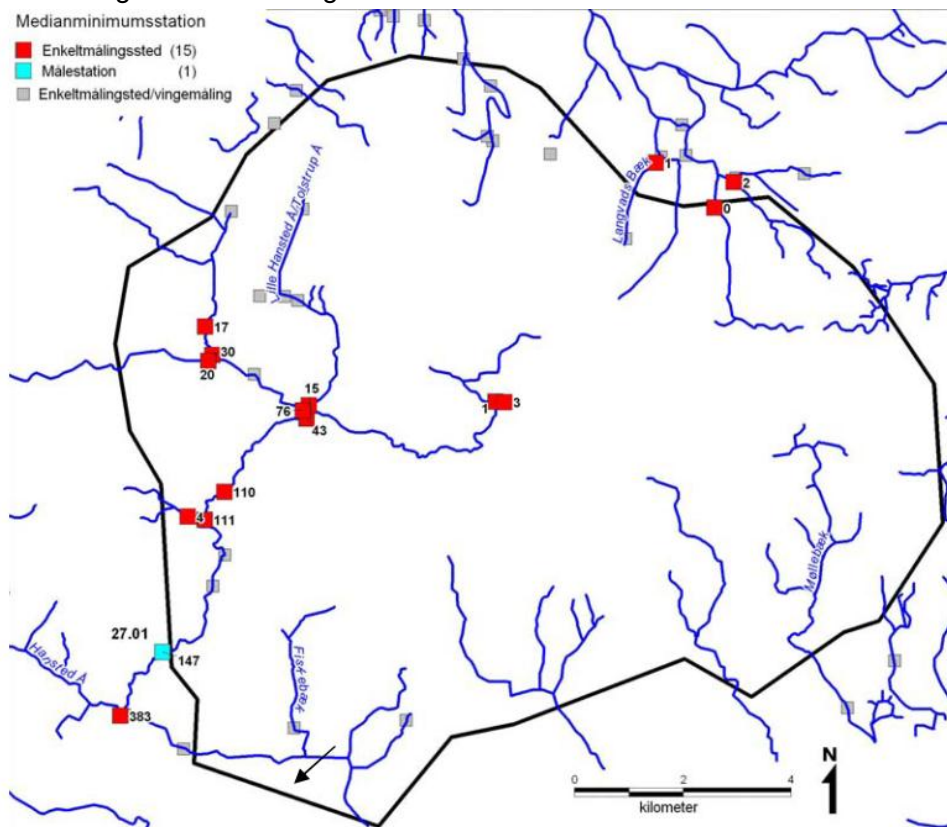
4.5 Afstrømningsdata

Der foreligger data fra synkronmålinger samt tidsserier for st. 27.01 LI. Hansted å for juni 1976-2010. I figur 4.7 er medianminimumsskøn vist (l/s) fra Sandersen et al. (2009).

Medianminimumsskøn bygger på synkronmålinger af vandføringen i Hansted å i 1974, så kvaliteten af data er derfor langt fra optimal, da enkeltmålingsstederne er bearbejdede ud fra en anden reference station end den der foreligger ved station Q27.01 (270004), som først er oprettet i slutningen af 1970'erne (data fra juni 1976 og frem). Man kan derfor heller ikke være sikker på, at der er konsistens i data, mellem på den ene side medianminimumsskøn ud fra 1974 synkronmålingen, og på den anden side skøn vurderet ud fra daglige vandføringer ved station Q27.01.

Datagrundlaget i form af daglig afstrømning fra oplandet er baseret på denne ene faste vandføringsmålestation. Middelvandføringen er i trin-1 kortlægningen beregnet til 678 l/s, med en variation mellem 56 l/s og 8691 l/s. Der er foretaget vandløbsrestaurering opstrøms ved kildepladsen, i form af omløb omkring et stemmeværk. Dele af LL. Hansted å er vedligeholdelsesfrit. Daglig vandføring ved st. Q27.01 vil indgå i kalibreringen af modellen, men datagrundlaget vurderes samlet set spinkelt, da der kun foreligger en fast målestation, og da synkronmålinger er af ældre dato, fra en tid hvor indvindingen var 5 mio. $\text{m}^3/\text{år}$, og med en fordeling på indvindingsboringer der evt. gav en større reduktion i vandføringen i åen, i forhold til nyere indvindingsdata, der foregår fra dybere magasiner.

Disse forhold betyder at medianminimumsskøn i Fig. 4.6 vil blive anvendt til en kvalitativ vurdering og validering af modellen, mens daglig vandføring ved Q27.01 vil blive anvendt til kalibrering og validering ud fra split sample test (kalibreringsperiode 2000-2004, valideringsperiode 2005-2009). Observeret max. afstrømninger ved Q27.01 vurderes relativt usikre da der er skiftet bearbejdningsmetode til omregning fra registreret vandstand til beregnet vandføring i løbet af modelleringsperioden 1990-2009 (fra den såkaldte brændpunktmetode til proportionalmetode). Proportionalmetoden kan i værste fald give højere max afstrømninger end brændpunktmetoden, hvis Q-målinger overvejende repræsenterer vandføringer ved middel og i det lave område.



Figur 4.7 Medianminimumsskøn i området (Sandersen et al., 2009)

En analyse af tidserien for station Q27.01 ud fra registrerede vandføringer fra juni 1976 og frem til december 2010 har givet resultater (l/s) som vist i tabel 4.3:

Tabel 4.3 Vurdering af medianminimum ud fra daglige vandføringer ved Q27.01 1976-2010

Q27.01 Juni 1976- Dec. 2010	Min l/s	Median min l/s	1 % Fraktil l/s	5 % Fraktil l/s	Middel 1 og 5 % fraktil l/s	10 % fraktil	90 % Fraktil l/s	95 % Fraktil l/s	Max l/s
Perioden 1976/2010	56*)	148	122	152	137	178	1507	2098	8448
1976-1990	56	162	111	145	128	170	1513	2128	8021
1991- 2010	76*)	148	131	160	146	183	1502	2075	8448

*) Q observation fra 27.10.2009, 28,5 l/s ser mistænkelig ud (andre observationer fra 2009: 26.10.2009: 66 l/s;). I samråd med Benny Andersen, NST vurderes det at disse vandføringer er fejlbehæftede. Mindste værdi for perioden 1991-2010 er derfor 76 l/s fra 1996.

I det følgende anvendes gennemsnittet af 1 % og 5 % - fraktilværdierne til vurdering af minimumsvandføringer, da det er denne fraktilværdi der ligger tættest på den bestemte medianminimum. Der foreligger få enkeltmålinger fra bl.a. Fiskebæk og Værbæk, begge tilløb til Nørrestrand, samt ganske få målinger i oplandet fra noget dambrugstilsyn (Andersen, 2011). Disse er vist i Tabel 4.4 med et estimat af medianminimum ud fra korrelation til Q27.01 serien.

Tabel 4.4 Enkeltmålinger i nedbørsområde 27 (Kilde: Schlüsen, 2011)

Lokalitet (dato)	Målt Q_{lok} / Q27.01 l/s	Estimeret median min ved lokalitet - l/s
270101 Holtvad bæk, os Gedved Mølleå (26.05.1994)	25.0 / 362	10
270073 Værbæk, os Bredmade (25.08.1983) – tilløb til Nørrestrand	5.0 / 241	3
270072 Fiskebæk, bro os. Udløb i Nørrestrand (25.08.1983)	15 / 241	9

Estimatet for Holtvad bæk på 10 l/s er dermed væsentligt lavere end medianminimumsskønnet for denne station som jf. Fig. 4.7 er fastlagt til 20 l/s, hvilket fortæller noget om usikkerheden på brugen af de meget gamle medianminimumsskøn fra 1974.

Tilstrømningen til Nørrestrand er ret begrænset. Det viser de to målinger i Fiskebæk og Værbæk med estimeret medianminimum på 3-9 l/s. Det konkluderes at der er meget stor usikkerhed på de foreliggende afstrømningsdata, og et stort behov for et bedre datagrundlag hvis modellens gyldighed mht. beskrivelse af minimumsvandføring og vandløbspåvirkning skal dokumenteres.

5. Konceptuel model

I nærværende afsnit beskrives den opstillede konceptuelle model, simplifikationer mht. geologisk model, strømningss ligninger, randbetingelser, gruppering af parametre mm.

5.1 Konceptuel model

Arbejdsbeskrivelsen af karakteristika og dynamik for grundvandssystemet, dvs. beskrivelsen af, hvilke strukturelle elementer og hvilke processer, der indgår i den numeriske strømningssmodel til brug for afgrænsningen af indvindingsoplande / grundvandsdannende oplande og ressourcens udnyttelsesgrad (bæredygtighed), altså oversættelsen af natur til numerisk system skal forholde sig til følgende elementer:

1. geologisk model (baseret på den lithologiske model samt jordartskort), (se kapitel 3)
2. anvendte procesligninger (rodzonen baseret på 'two layer', 2D overfladisk afstrømning, 3D mættet strømning jf. porøst medie incl. drænstrømning, samt endelig vandstrømning i vandløb baseret på "simpel routing")
3. specifikation af underinddeling af modelområdet i strukturelle elementer er baseret direkte på lithologisk model beskrevet ved 84 lag og 100x100 m grid, hvor samtlige enheder har konstante parameterværdier (se Bilag 1)
4. specifikation af randbetingelser, hvor det er antaget, at der er noflow randbetingelse langs hovedparten af modelområdet, og fastholdt tryk ved kysten
5. specifikation af inputdata der driver modellen er baseret på standardkorrigeret nedbør og DMIs klimagrid, samt oppumpede vandmængder fra JUPITER på årsbasis (se kapitel 4)
6. overordnet forståelse af strømningssforhold og vandbalancer i lysninger om indvindingsoplande, synkronmålinger, prøvepumpninger, vandbalanceforhold osv. (se kapitel 4)

5.2 Strømningss ligninger

Der er anvendt en procesbeskrivelse for rodzonen (MIKE SHE two-layer) hvorved dynamikken i ændret grundvandstand og ændret fordampning i "våde områder" kan beskrives.

Der ses bort fra ændringer i arealanvendelse i et fremtidigt klima, og ændringer i vandindvinding som følge af evt. ændrede vandbehov. Det har ikke ligget inden for rammerne af projektet at fortage scenarieudvikling på disse forhold, idet hensigten primært har været at beskrive de direkte effekter af klimaændring, altså hvordan ændret nedbør, fordampning og temperatur påvirker vandbalancen, grundvandsspejlet og indvindingsoplande.

Betydningen af havstigning er heller ikke undersøgt, idet det i undersøgelsen primært er ændringen i grundvandsspejl i nogen afstand fra kysten der har interesse, idet de undersøgte indvindingsoplande ligger oppe i oplandet (over kote 10 m), og det derfor kan antages at ændringer som følge af havniveaustigning vil have relativt minimal effekt på indvindingsoplande. Vandstanden i Nørrestrand er i øvrigt reguleret af en højvandssluse. Vandspejls-

forhold i Nørrestand i et fremtidigt klima belyses i detaljer med Horsens lokalmodellen der opstilles i forbindelse med Koncept for integreret vurdering af risikoen for klimagenererede grundvandsoversvømmelser af punktkildeforureninger i kystzonen (KIMONO projektet) og CLIWAT projektet (www.cliwat.eu).

Der er anvendt en integreret hydrologisk model baseret på MIKE SHE/MIKE 11 der beskriver processerne i det hydrologiske kredsløb incl. 2D overfladisk afstrømning, med speciel fokus på fuld 3D mættet strømning jf. porøst medie da et hovedformål netop er at afgrænse indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande, dræn- og vandløbsafstrømning. Vandløb er beskrevet med det formål at beskrive variationerne i daglig vandføring, hvorimod der ikke er speciel fokus på beskrivelsen af vandspejl i vandløb.

5.3 Simplifikationer mht. geologisk model

Tolkningen af den geologiske model med fastlæggelse af rumlig udbredelse for de enkelte lithologiske enheder og usikkerheder er udført i Geoscene 3D (punkt 1 og 3, se kapitel 3). Arbejdet med den konceptuelle model er derfor i et stort omfang sket med brug af dette værktøj.

5.4 Randbetingelser

Modelområdets udbredelse og modelranden (punkt 4) er fastlagt ved hjælp af Geoscene 3D på basis af analyser af forskellige potentialekort og magasinudbredelser i den geologiske model (se Figur 4.5). Herved er der fastlagt overordnede grundvandskel hvor der antages noflow randbetingelser, som med rimelig antagelse gælder for såvel nuværende som fremtidigt klima.

Analyser af T-værdier med henblik på indbyrdes linkning af de forskellige sandenheder i den lithologiske model og med henblik på beregning af hydrauliske ledningsevner; det er her i den endelige model valgt at linke T-værdier i seks klasser på baggrund af en hydrogeologisk vurdering; herved har det været muligt at kalibrere en af disse klasser, og efterfølgende på baggrund af estimeret parameterværdi for denne enhed, at beregne de øvrige ud fra linkningen (punkt 6).

Det har ikke været indenfor undersøgelsens rammer at indsamle dynamiske inputdata (fx på dag-, uge- eller månedsbasis) med fordeling på indvindingsboringer fx for Højballegårdværket. Grundlaget for de hydrauliske data, oppumpningsdata har været de data der forelå i JUPITER (årlige oppumpninger på kildepladsniveau, tidserier af pejlinger mv.), samt de synkronpejledata der blev leveret af NST Århus. I forbindelse med simulering af indvindings- og grundvandsdannende oplande er aktuelle oppumpning til brug for simuleringer afstemt med NST Århus.

5.5 Gruppering af parametre

Der er foretaget en bestemmelse af initialværdier for de enkelte parametre, som er vist i Bilag 1. Det er for de fleste enheder antaget at den vertikale ledningsevne er 1/10 af horisontal ledningsevne. I tabel 5.2 er initiale hydrauliske ledningsevner sammenfattet:

Tabel 5.1 Gruppering af initiale parametre (Ikke alle numre er anvendt, da nogen enheder er slået sammen i løbet af tolkningen)

Enhed	Kommentar	kx-initial værdi m/s
2, 22 til 51, 59 til 69, 75 til 78, 82 til 90, 99, 111, 999	Smeltevandssand, j25 sand	$1,0 \cdot 10^{-3}$
10, 21	Interglacialt ferskvandssand, kalk	$1,0 \cdot 10^{-4}$
5, 11, 53 til 57, 71, 73, 74, 79 til 81, 112, 113	Smeltevandssand vekslende små lag, interglacial ferskvandsdiatom, miocænt glimmersand, sand glacialteknisk, forkastningszone, postglaciale saltvands og ferskvandsaflejringer, j25 ler, j25 tørv	$1,0 \cdot 10^{-5}$
15	Glimmersand	$8,0 \cdot 10^{-5}$
8,	Moræneler	$1,0 \cdot 10^{-7}$
17	Glimmerler	$5,0 \cdot 10^{-8}$
7, 20	Smeltevandsler og Tertiært ler	$1,0 \cdot 10^{-8}$

De vertikale ledningsevner er for majoriteten af lithologier antaget 1/10 af de horisontale (1:10). For smeltevandssand vekslende små lag og j25 ler er dog antaget 1:100. For sand og ler med glacialteknisk variabilitet er antaget 1:1, det samme gælder forkastningszonen. Senere i kalibreringen er der arbejdet med en gruppering af parametre som vist i Tabel 5.2 (se Bilag 3), som er benyttet i den afsluttende inverse kalibreringskørsel (inv08).

Tabel 5.2 Gruppering af vandførende enheder (lithologier)

Enheder som vurderes at kunne slås sammen mht. invers kalibrering	Vurderet strømning	Kx-initial værdi m/s
74, 78 til 81, 83, 86 til 90	Lav	$1,0 \cdot 10^{-4}$
22, 25, 26, 28, 29, 31, 36, 37, 38, 47 til 51, 53, 55, 56, 57	Lav til middel	$3,0 \cdot 10^{-4}$
27, 35, 39 til 46, 59 til 69, 71, 72, 75, 78 til 90	Middel	$6,0 \cdot 10^{-4}$
23, 24, 77	Middel til høj	$9,0 \cdot 10^{-4}$
33, 82, 84, 85	Høj	$1,2 \cdot 10^{-3}$
32, 34, 76	Meget høj	$1,5 \cdot 10^{-3}$

Parametre for lavpermeable lag er grupperet i forhold til 3 hoved-enheder hhv. moræneler, smeltevandsler og glimmerler, håndteret som frie parametre der optimeres hver for sig.

6. Numerisk modelværktøj og metodik

I dette kapitel beskrives anvendt modeltype, modelkoder, overordnet metodik ved parametrisering, kalibrering, validering, modelanvendelse og usikkerhedsanalyse.

6.1 Modeltype og modelkode

Modellen er opstillet i modelsystemet MIKE SHE / MIKE 11, der udgør et deterministisk fuldt distribueret og fysisk baseret modelkompleks til simulering af ferskvandskredsløbet. Modellen inkluderer en beskrivelse af den overfladiske afstrømning (OL), den umættede zone (UZ), den mættede grundvandszone (SZ), herunder drænastrømning, samt vandstrømning i vandløbene (MIKE 11).

6.2 Overordnet metodik

Modellen er en integreret grundvands-/overfladevandmodel med en direkte kobling mellem de to systemer. MIKE11 opsætningen tager udgangspunkt i DK model 2009 for Midtjylland, der er opdateret ved tilføjelse af flere vandløbsstrækninger. Til beskrivelse af vandstrømningen i overfladevandssystemet, er det valgt at anvende en simpel løsning, hvor vandet routes (flyttes) gennem vandløbet, i lighed med DK model Midtjylland.

Denne løsning er begrundet i modeltekniske årsager, hvor en detaljeret beskrivelse vil medføre signifikant længere simuleringstider. Modellen vil derfor ikke være egnet til en detaljeret beskrivelse af dynamikken i og tæt ved fx søer eller omkring Nørrestrand (der henvises her til Horsens by modellen der opstilles i KIMONO/CLIWAT).

Der er opstillet en MIKE SHE/MIKE 11 model for Egebjerg området og gennemført testkørsler med henblik på vurdering af modelopstillingen (massebalance, stabilitet, robusthed og visualisering). Det er særligt vigtigt, at modellen ikke har stabilitets eller robusthedsproblemer, da modellen kalibreres ved inverse rutiner (PEST), og da der er tale om endog meget tunge kørsler med samlede kørselstider på i størrelsesordenen flere uger pr. inverse kørsel.

6.3 Kalibrering

Der er afviklet et antal inverse kørsler i projektet (i alt 8) i en læringsproces hvor kvantitative og kvalitative performance kriterier er inspiceret og vurderet efter hver inverse optimering. Herefter er kalibreringsparametre og objektivfunktion videreudviklet ud fra resultatet af foregående optimeringskørsel. Opstillingen og kalibreringen af Egebjerg modellen har ikke kun været innovativ med henblik på opstillingen af den 3D voxelsmodel med de mange lithologiske enheder og den kvalitative usikkerhedsvurdering på pixelniveau, men der har også i modelprocessen været anvendt en innovativ tilgang omkring de inverse optimeringer, og tilpasningen af beregningslag til den geologiske model (med 30 lag der har sammenfaldene vertikale laggrænser med laggrænserne i den geologiske voxelsmodel).

6.4 Validering

Modellen er valideret ved kvalitative vurderinger i forhold til:

- Er de optimerede parametre realistiske?
- Er sænkningstragten realistisk i forhold til 2004 indvinding?
- Er fordelingen af minimumsafstrømning realistisk i forhold til medianminimums-skøn?
- Split sample test på daglig vandføring 2005-2009 for st. 27.01
 - R2 værdier
 - Vandbalancer (F_{BAL} for gennemsnitsvandføring)
 - Sommer vandbalancer (F_{BAL} for gennemsnitsvandføring)

6.5 Modelanvendelse

Spørgsmålet om forskel på indvindingsoplande jf. stationær eller dynamisk model belyses konkret i leverancerne for Egebjerg, idet der gennemføres 'quasi stationære' simuleringer, med en 'konstant' nettonedbør, af samme størrelse som gennemsnittet af den dynamisk simulerede nettonedbør. Herved kan variationen over tid i nettonedbør og grundvandsdannelse og betydning heraf for afgrænsningen af indvindingsoplande, grundvandsdannende oplande og transporttider belyses.

Der benyttes 'delta-change' korrektionsfaktorer på månedsbasis jf. Tabel 6.1 for A1B scenariet baseret på ENSEMBLE og ECHAM/KNMI modellen. Til brug for grundvandskortlægningen som rapporteres i nærværende rapport er gennemført beregninger med dette A1B scenarie, som vurderes at være det mest tidssvarende datainput til kortlægningsdelen. Der er ud fra ENSEMBLE regimet som består af mere end 10 forskellige GCM/RCM modeller, udvalgt en regional og global klimamodel som ligger centralt i ENSEMBLE datasættet baseret på ECHAM/KNMI (det er i øvrigt det samme A1B input som der er valgt i PRECIOUS projektet (Keur et al., 2011) på baggrund af en nærmere analyse til vurdering af klimaeffekter og pesticidudvaskning). Der foreligger i øjeblikket ikke data for A2 scenariet i ENSEMBLE datasættet. Det anvendte mere moderate A1B scenarie forventes at give lidt mindre markante effekter af ændret klima sammenlignet med det kraftigere A2 klimascenarie (se tabel 6.1 hvor delta change faktorer er sammenlignet).

I CLIWAT er det valgt at benytte A2 scenariet 2071-2100 i forhold til 1961-90 (jf. beslutninger i CLIWAT projektet) til analysen af betydningen af ændret klimainput for indvindings- og grundvandsdannende oplande. Appendix A indeholder analyser med A2 scenariet ud fra PRUDENCE datasættet til brug for CLIWAT projektet.

Tabel 6.1 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 6.1 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.

Modelkode og partikelbanemodul for Egebjerg er baseret på MIKE SHE og tilhørende partikelbanemodul. Antallet af partikler er vigtigt, og her er i de første testkørsler anvendt 10 partikler i øverste modellag og 4 partikler i hvert af de følgende beregningslag (dimensioneret ud fra max memory-krav der begrænser hvor mange partikler der totalt set kan modelleres). Der er imidlertid konstateret relativ stor usikkerhed på de grundvandsdannende oplande med kun 10 partikler i øverste lag. I de senere produktionskørsler blev derfor anvendt 100 partikler i det øverste lagt tilfældigt fordelt i den mættede del af beregningskasserne i beregningslag 1 til vurdering af grundvandsdannende oplande og transporttider til kildepladser.

6.6 Usikkerhedsanalyse

I nærværende rapport foretages der ikke kvantitative usikkerhedsanalyser baseret på Monte Carlo eller alternative konceptuelle modeller. I stedet anvendes usikkerhedsmatricen beskrevet i Henriksen et al. (2010) i hvilken data, model og scenarie usikkerhed belyses

kvalitativt (se Kapitel 10). En usikkerhedsmatrice består af en vurdering som vandressourceforsvarer og modellør i fællesskab udarbejder af data, model og scenarie usikkerheder. Det er tænkt som et værktøj der opstilles i starten af et modelprojekt og benyttes til at håndtere de væsentligste usikkerhedskilder i løbet af projektførelsen. I nærværende undersøgelse har det primært været et arbejdsredskab anvendt af modelløren (GEUS) internt (se Tabel 6.2)

Tabel 6.2 Eksempel på usikkerhedsmatrice

Kilde		Usik.grad/ dækning	Vægt	Effekt	Redu- cerbar	Kvantifi- cerbar	Tiltag	Bemærkninger
D A T A	Potentiale	<i>lille</i>	<i>middel</i>	<i>middel</i>				
	Afstrømning	<i>middel</i>	<i>middel</i>	<i>middel</i>				
	Geologi	<i>stor</i>	<i>stor</i>	<i>stor</i>				
M O D E L	input data							
	Grundvandsdannelse	<i>middel</i>	<i>stor</i>	<i>stor</i>				
	Konceptuel model							
	Geologi	<i>stor</i>	<i>stor</i>	<i>stor</i>				
	Processer	<i>middel</i>	<i>stor</i>	<i>middel</i>				
	Rand	<i>middel</i>	<i>lille</i>	<i>lille</i>				
MANAG EMENT SCENA RIER	Kode	<i>lille</i>	<i>lille</i>	<i>lille</i>				
	Politiske forhold	<i>middel</i>	<i>lille</i>	<i>lille</i>				
	Fremtidige forhold							
	Indvindingsbehov	<i>middel</i>	<i>stor</i>	<i>stor</i>				
RIER	Klima	<i>stor</i>	<i>middel</i>	<i>middel</i>				
	Forureningsbelastning	<i>middel</i>	<i>middel</i>	<i>middel</i>				

Usikkerhedsgrad/dækning: (Usik.grad) er graden af usikkerhed knyttet til usikkerhedskilden, dvs. er der stor eller lille usikkerhed omkring variabelen. Dækning er primært relevant at vurdere i forhold til tilgængeligheden af data, hvor kvalitet og datamængder er betydende for, hvor godt modelresultat, der kan forventes.

Vægt: Angiver hvor betydende faktoren er for modelresultatet. Her skal der både tages hensyn til, hvor stor effekt usikkerhedskilden har på modelresultatet (fx ved udførelse af en følsomhedsanalyse), samt hvor kritisk denne usikkerhed er i forhold den efterfølgende beslutningsproces.

Effekt: Er usikkerhedsgrad multipliceret med vægt, altså en risikovurdering.

Reducerbar: Henfører til, om det er muligt at reducere usikkerheden, fx gennem litteraturstudier eller supplerende undersøgelser.

Kvantificerbar: Refererer til, om det er muligt at anvende en metode til at kvantificere usikkerheden, herunder om der er tilstrækkelig information omkring variabelen (fx observationer) til, at metoden kan anvendes.

Tiltag: Her vurderes, om der skal foretages yderligere tiltag i forbindelse med usikkerhedskilden og i givet fald hvilke. Dette indebærer eksempelvis forslag om ekstra undersøgelser, metode til kvantificering af usikkerhed, eller om det kun er muligt at give en kvalitativ beskrivelse af usikkerheden.

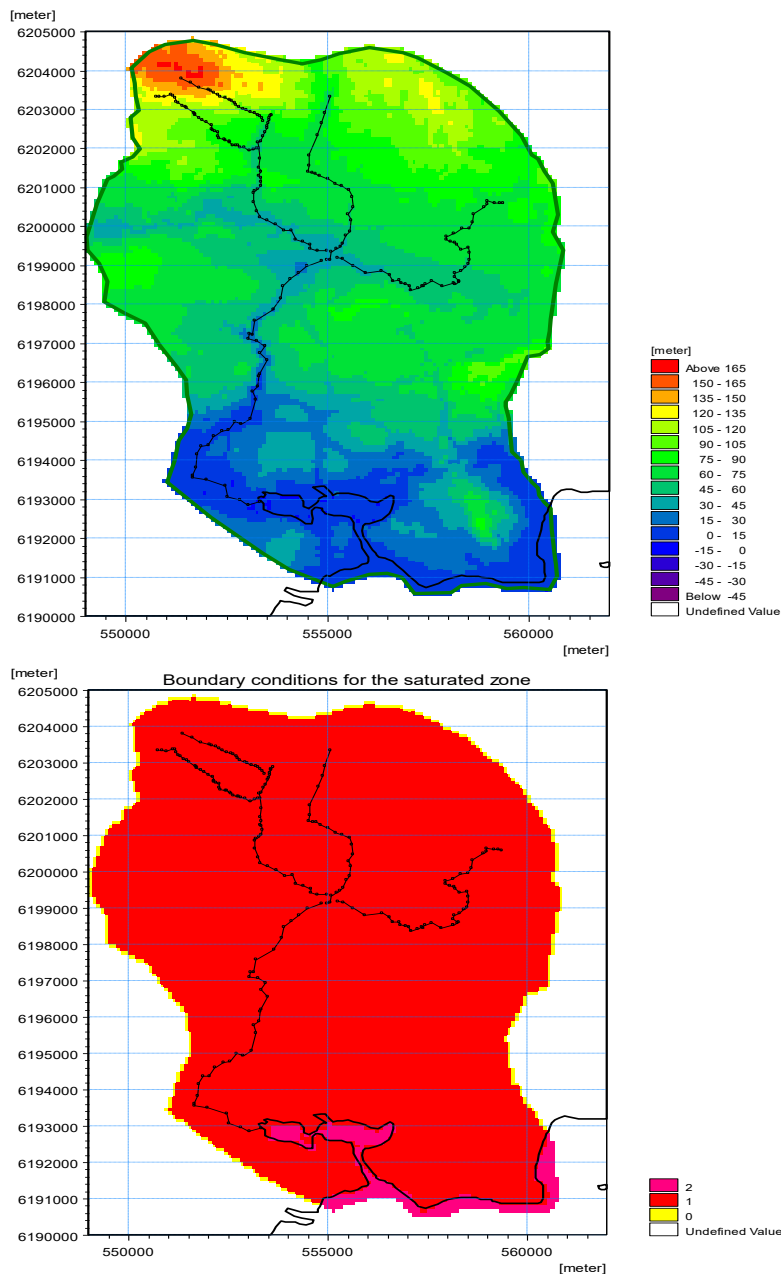
Bemærkninger: Her kan angives korte bemærkninger/kommentarer, der giver en præcisering af usikkerhedskilden. Specielt nyttig hvis usikkerhedsmatricen anvendes som en dialogplatform. Her kan evt. også refereres til en rapport, hvor usikkerheden er beskrevet mere detaljeret.

7. Modelopstilling

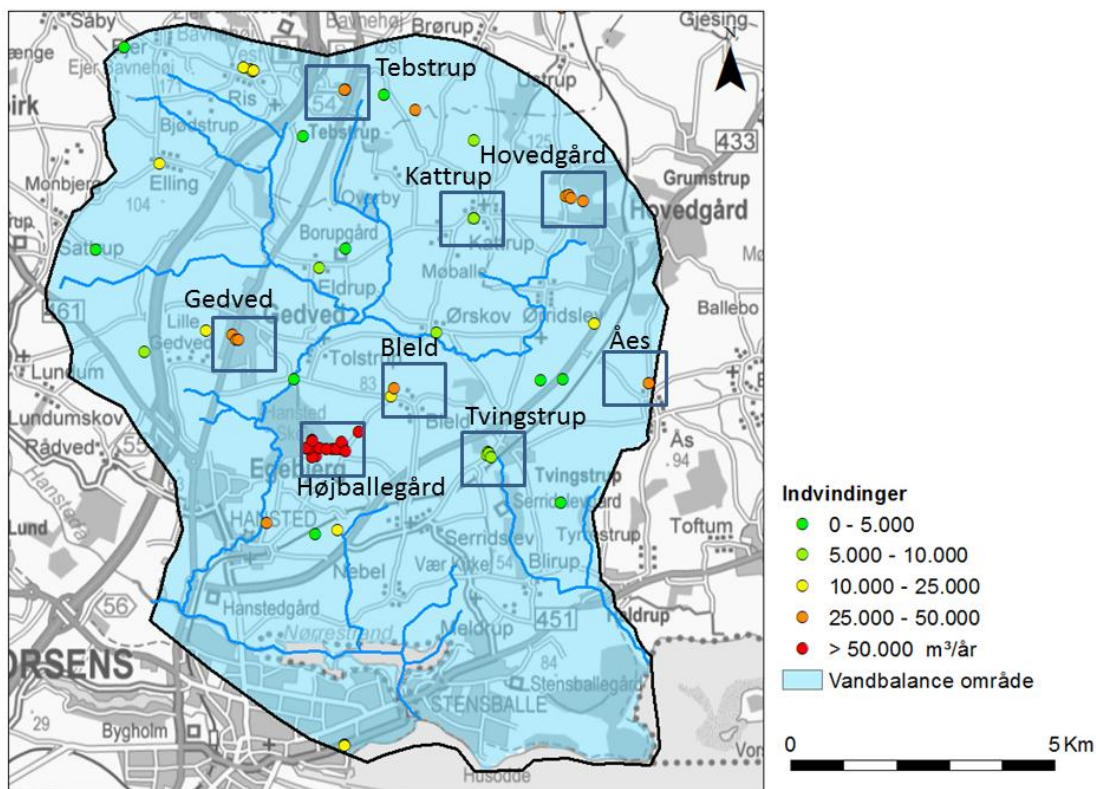
I dette kapitel beskrives modelområde, randbetingelser og diskretisering.

7.1 Modelområde

I figur 7.1 er vist topografi og randbetingelser for modelområdet.



Figur 7.1 Topografi og randbetingelser for Egebjerg model (nederst randbetingelser, 2= fastholdt trykniveau, 0=no flow randbetingelse, øverst topografi).



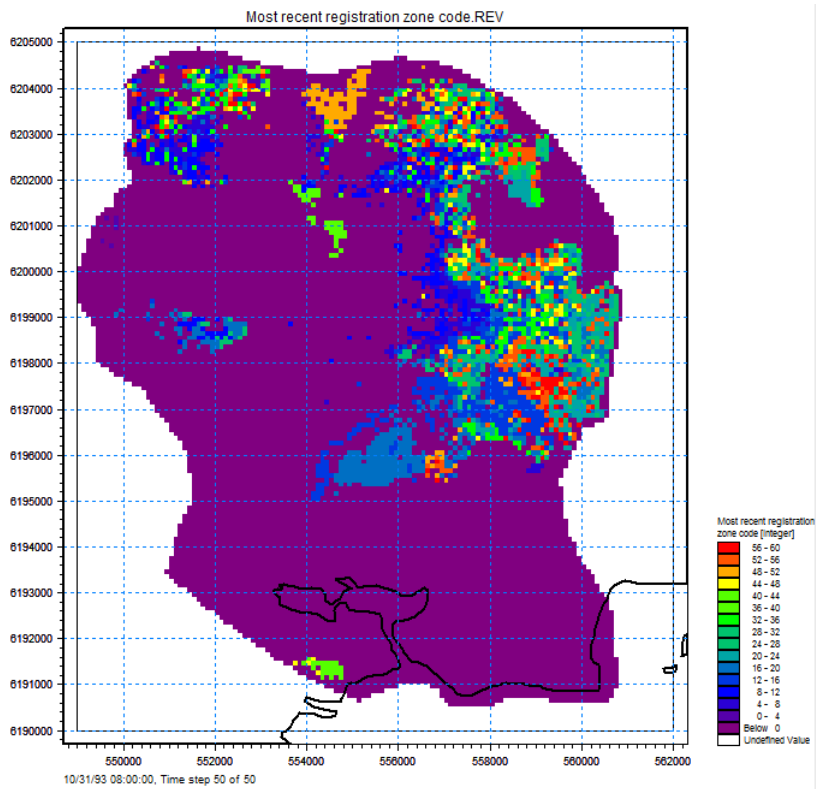
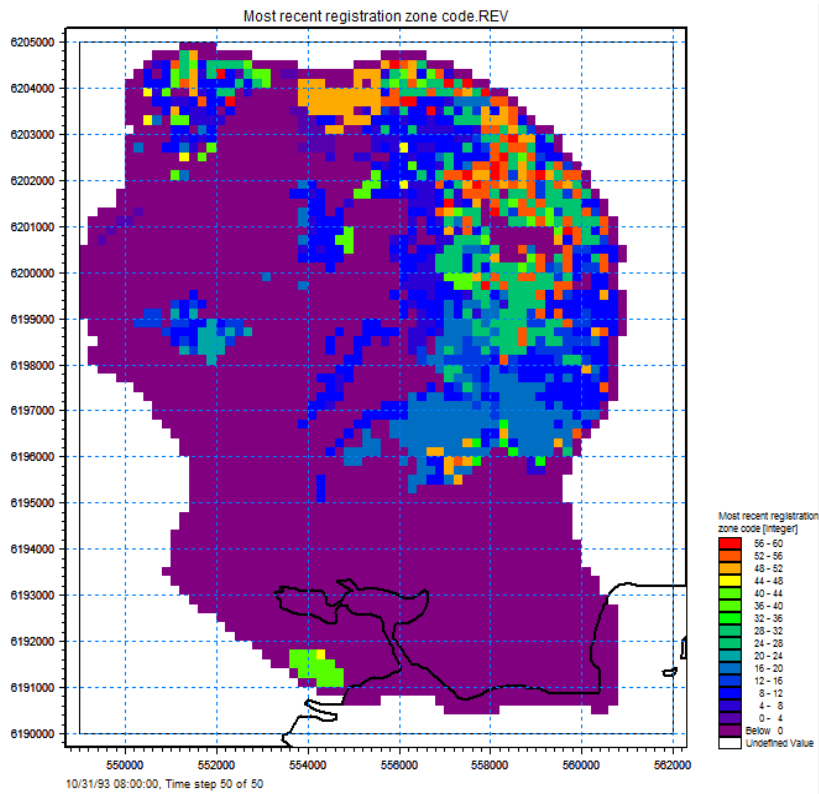
Figur 7.2 Indvindinger samt vandløbsopsætning. Figuren viser indvinding pr. indvindingsboring. For mange af vandværkerne er der flere indvindingsboringer for hver kildeplads. Eksempelvis har Tebstrup 2, Hovedgaard 4, Gl. Katstrup 3, Højballegaard 17, Tvingstrup 4 og Gedved 4 indvindingsboringer tilhørende kildepladsen (se Bilag 2)

Drænrandbetingelsen er kun aktiv, når grundvandspejlet står højere end de indlagte dræn (i 0.5 m's dybde i forhold til modeltopografien i Figur 7.2). Vandløbsrandbetingelsen tillader strømning i begge retninger, og det er antaget at vandløbskontakten kan beskrives som et kombineret vertikalt og horisontalt tryktab gennem såvel magasin som vandløbsbund.

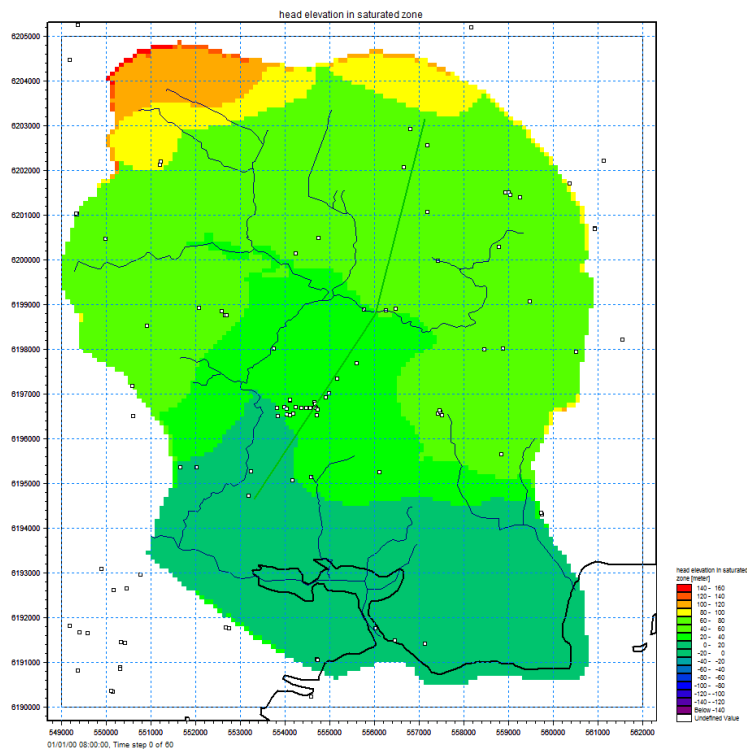
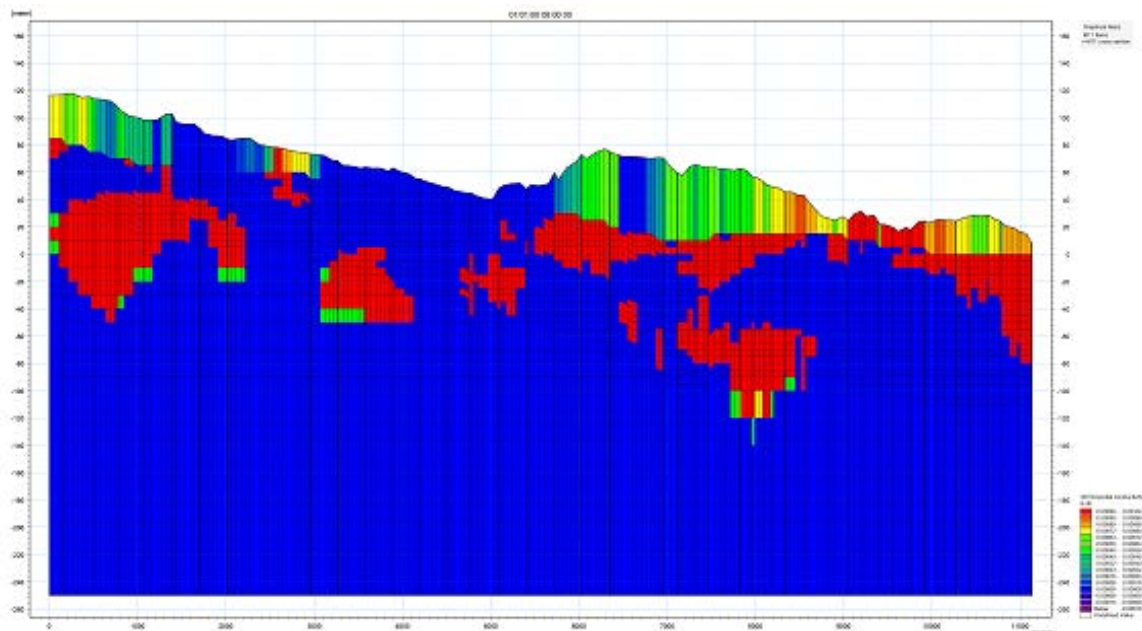
Det er antaget at såvel dræntidskonstant som vandløbslækagekoefficient er konstant i hele modelområdet.

7.2 Diskretisering

Som horisontal diskretisering er anvendt 100 x 100 meter. Forud for dette valg blev gennemført en testkørsel med 200 x 200 m, for at vurdere, om man evt. kunne kalibrere dele af modellen med en grovere diskretisering. Analyser af bl.a. indvindingsoplande viste relativt store forskelle, hvorfor det blev besluttet at anvende 100 x 100 meter. Det blev vurderet at modelarbejdet ikke kunne gennemføres med en finere diskretisering, indenfor rammerne af projektet. I Figur 7.3 er vist resultatet af en testkørsel med en grovere diskretisering på 200 x 200 m.



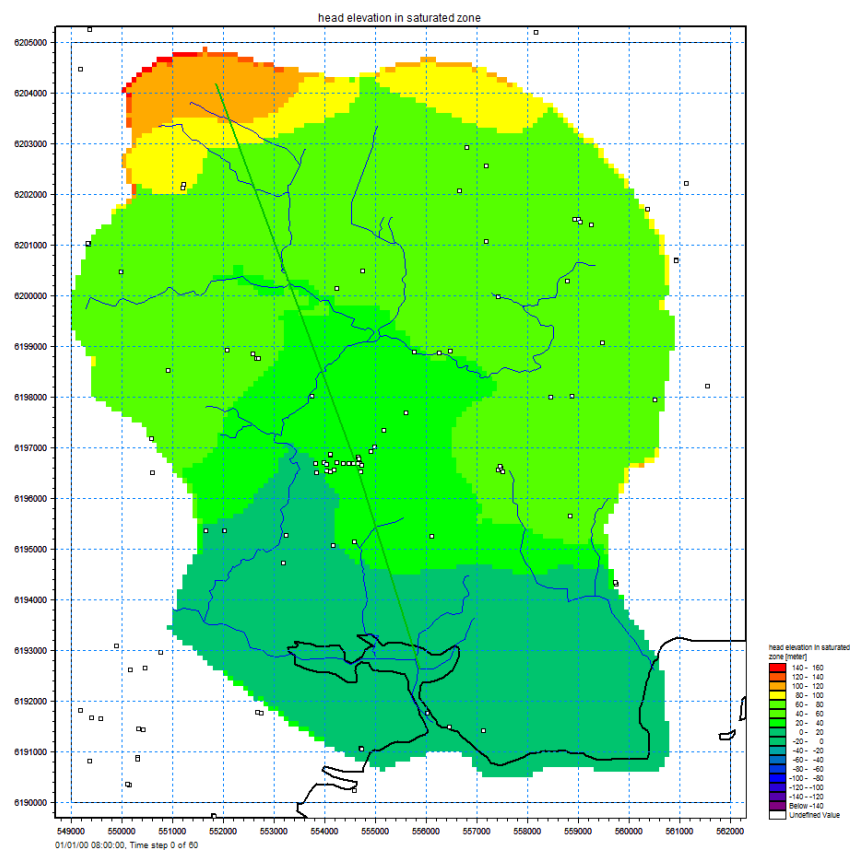
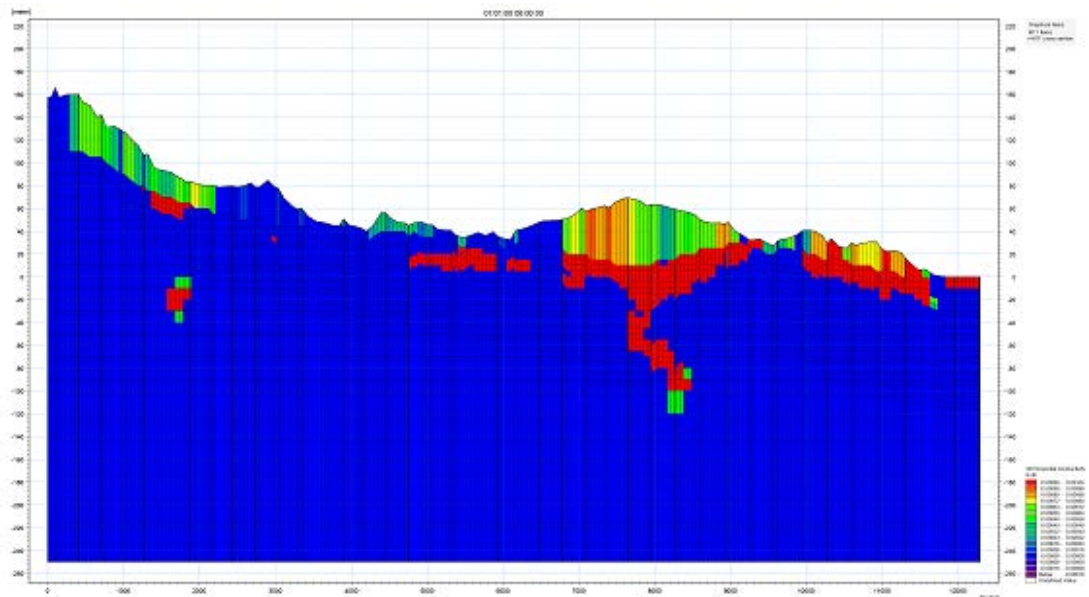
Figur 7.3 Sammenligning af 100 x 100 (nederst) og 200 x 200 m horizontal diskretisering øverst (invers 06). Det er vurderet ud fra ovenstående test, at 100 x 100 m i dette tilfælde giver væsentligt mere detaljeret en afgrænsning.



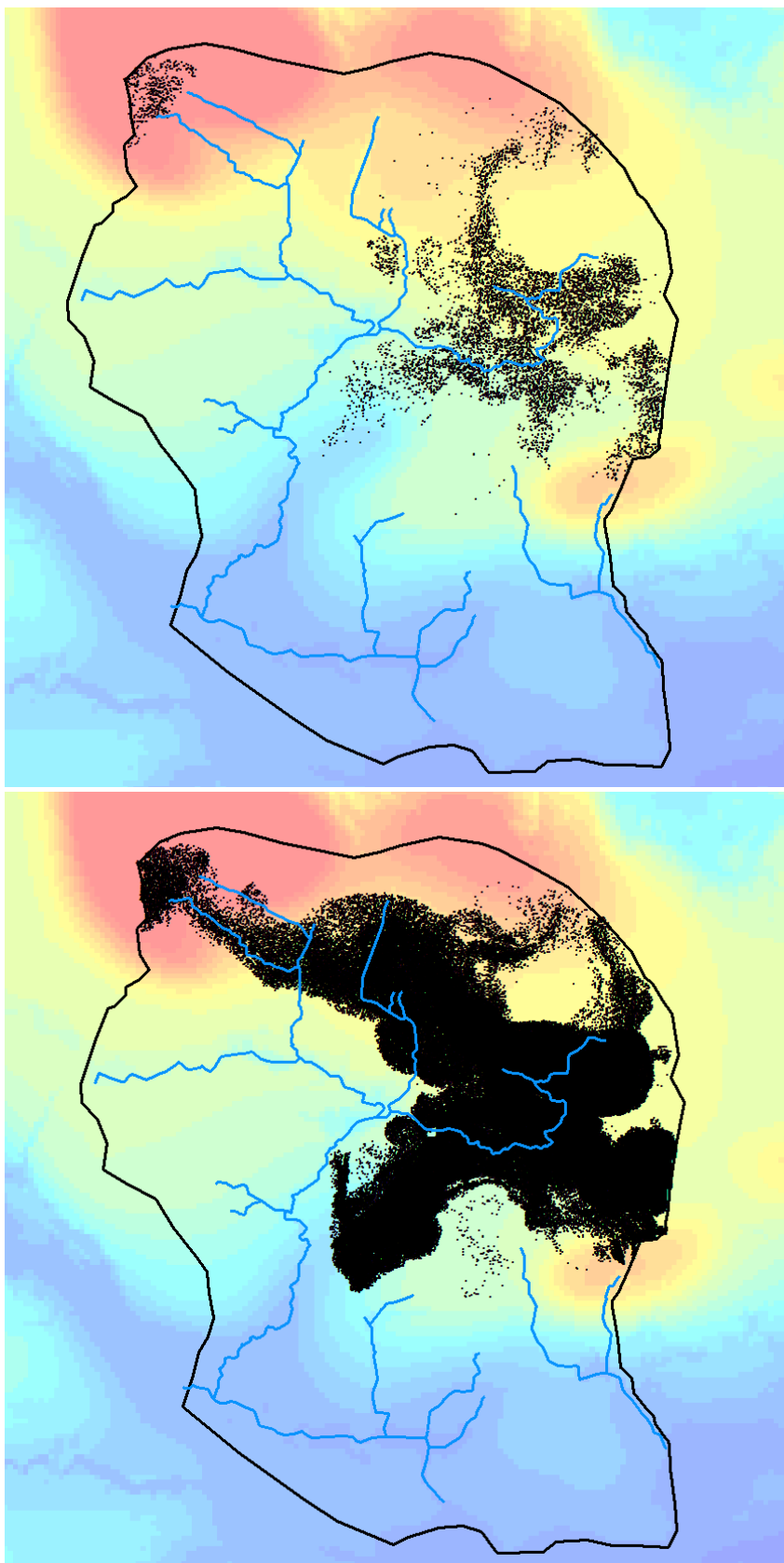
Figur 7.4 Nederst: Område med placering af NØ-SV tværsnit, indvindinger og vandløb. Øverst: Tværsnit med vertikal diskretisering. Farveskalaen på øverste figur illustrerer horisontal hydraulisk ledningsevne ud fra intialparametre, hvor rødt betyder høj ledningsevne (jf. sand) og blå lav ledningsevne (jf. ler). Farveskalaen på nederste figur illustrerer grundvandspejlets variation.

Figur 7.4.-7.5 viser vertikal diskretisering af modellen. Modellen har 30 beregningslag. Det øverste lag er fastlagt med bunden 2 meter under grundvandspejlet, 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 grundvandspejlet. Som minimumslagtykkelser er valgt 5 meter, og

det betyder, at modellen er i stand til at opløse lagfølgen, fx omkring Højballegård kildepladsområdet.



Figur 7.5 Nederst: Område med placering af NØ-SV tværsnit, indvindinger og vandløb. Øverst: Tværsnit med vertikal diskretisering. Farveskala jf. figur 7.4.



Figur 7.6 Partikelbanesimulering for testkørsel. Grundvandsdannende opland (øverst) og indvindingsoplande (nederst) for Højballegårdværkets indvindingsboringer.

På baggrund af testkørslen og de simulerede oplande, se figur 7.6, er det dels vurderet, at modellen er brugbar men skal kalibreres nærmere og dels blev det vurderet at indvindingsoplandet ved Højballegårdværket for nogen af de ældste partikler når helt ud til modelranden, ligesom at enkelte af partiklerne dannes tæt på randen. Der er tale om et meget komplekst indvindings- og grundvandsdannende opland, som afviger markant fra tidligere håndtegnede indvindingsoplande. Da det kun er et begrænset antal meget gamle partikler der dannes tæt på randen, er det valgt at fastholde de valgte randbetingelser.

Testkørslen blev gennemført i december 2010 og afsluttede dermed Milepæl 1 Numerisk modelsetup (31/12 2010). Det er vurderet at konceptet med 100 partikler i øverste beregningslag og 4 partikler i de dybere lag er brugbart til vurdering af grundvandsdannende oplande og indvindingsoplande. I følgende afsnit gennemgås kalibreringen og valideringen af modellen.

8. Kalibrerings og valideringsstrategi

I dette kapitel beskrives de anvendte nøjagtighedskriterier og numeriske mål for nøjagtighed. Der redegøres for kalibreringsdata og metodik. Planlagte valideringstest og –data belyses.

Modellen køres for perioden 1990-2009 som dynamisk model på et dagligt tidsskridt. Modellen er kalibreret i forhold til perioden 2000-2004 (Refsgaard et al., 2010; Sonnenborg og Henriksen, 2005):

- Daglig vandføring ved st. 27.01 LI. Hansted å
 - R² værdier
 - Vandbalancer (F_{BAL} for gennemsnitsvandføring)
 - Sommer vandbalancer (F_{BAL} for gennemsnitsvandføring)
- Residual værdier af trykniveau (ca. pejle 100 punkter)
 - Middelfejl (ME)
 - Root mean square (RMS)
 - Tidsserier fra udvalgte pejlestationer

8.1 Anvendte nøjagtighedskriterier

Et nøjagtighedskriterium er et numerisk mål for overensstemmelsen mellem en modelsimulering og observerede feltdata og benyttes som mål i kalibrerings og valideringsprocedurer. Et nøjagtighedskriterium består af to delelementer (Refsgaard et al., 2010):

1. Valg af kvalitative og kvantitative kriterier (herunder objektivfunktion)
2. Numeriske mål for nøjagtigheden (fx talværdi for størrelsen af R^2 , RMS mv.)

Kriterier og mål vil variere fra opgave til opgave bl.a. afhængigt af model, krav til nøjagtighed, området karakteristika (fx trykniveauvariation indenfor området, heterogenitetsforhold, maskevidde, variationer i afstrømning osv.). Vejledningen kan give en ramme med ”bløde vejledninger”, men det afgørende er at partnerne konkret tager stilling til, hvad der skal benyttes i den konkrete opgave.

8.2 Valg af kriterier

Kvalitativt bør det gælde, at (a) de estimerede parametre har realistiske værdier; (b) residualer er rimeligt jævnt fordelt over tid og sted; og (c) områdets hydrologiske karakteristika reproduceres af modellen (fx strømningsretning, gradient, beliggenhed af grundvandsskel, hydrograf- og vandstandsdynamik).

Ud over de kvalitative kriterier opstilles udvalgte kvantitative kriterier, der beregnes statistisk ud fra simulerings- og observationsdata. I Tabel 8.1 er vist de kriterier der benyttes for Egebjerg modellen (Refsgaard et al., 2010).

Tabel 8.1 Kvantitative nøjagtighedskriterier benyttet for Egebjerg modellen (Refsgaard et al., 2010)

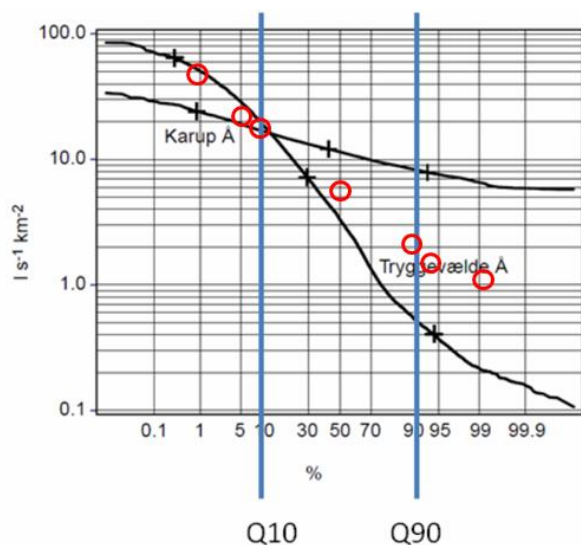
<p>Kriterium 1. Trykniveauekriterium med udgangspunkt i middelfejlen. Middelfejl på potentialerne (ME), relateres til den maksimale variation i de observerede potentialer indenfor de enkelte delmodeller:</p> $ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\psi_{obs,i} - \psi_{sim,i})$	$\frac{ ME }{\Delta h_{max}} \leq \beta_1$
<p>Kriterium 4. Trykniveauekriterium der tager udgangspunkt i variationen i trykniveauobservationernes potentiale for modelområdet (Δh_{max}).</p>	$\frac{RMS}{\Delta h_{max}} \leq \beta_3$
<p>Kriterium 5. Vandføringskriterium der udtrykker modellen evne til at simulere dynamikken i afstrømning baseret på R²-værdien (Nash and Sutcliffe, 1970). Højere R² værdi kan forventes fra store oplande og oplande med store års-tidsvariation i vandføring.</p> $R^2 = \frac{\sum (\psi_{obs} - \bar{\psi}_{obs})^2 - \sum (\psi_{obs} - \psi_{sim})^2}{\sum (\psi_{obs} - \bar{\psi}_{obs})^2}$	$R^2 = f(Q_{var}) \geq \beta_4$ <p>(~ 4 typer defineret af Q_{var})</p>
<p>Kriterium 6. Vandbalancekriterium baseret på vandbalance fejlen svarende til middelvandføring.</p> $Fbal = 100 \frac{\bar{Q}_o - \bar{Q}_s}{\bar{Q}_o}$	$ Fbal = f(Q_{mid}) < \beta_5$ <p>(~ 4 typer defineret af Q_{mid})</p>
<p>Kriterium 7. Vandbalancekriterium baseret på vandbalance fejlen på sommervandføringen. Fbal jf. kriterium 6, men opgjort for juni-juli-august.</p>	$ Fbal = f(Q_{min}) < \beta_6$ <p>(~ 4 typer defineret af Q_{min})</p>

8.3 Numeriske mål for nøjagtighed

Vedr. **kriterium 5** og kravet til oplandsareal jf. R² er i figur 8.1 vist et eksempel på to oplandstyper der benyttes ved fastlæggelse af R² krav jf. variationen i vandføring over året (Q_{var}) samt de fire klasser der benyttes. LI. Hansted å (27.01) er vist på figuren ud fra perioden 1976-2010.

Vedr. **kriterium 6** og kravet til oplandsareal jf. Fbal (år) skelnes der mellem fire typer (Q_{mid}): a) meget små oplande (< 100 l/s eller 3 mio. m³ pr. år), b) små oplande (100 - 500 l/s eller 3 - 15 mio. m³ pr. år), c) mellemstore oplande (500-2000 l/s eller 15-60 mio. m³ pr. år) og d) store oplande (> 2000 l/s eller 60 mio. m³ pr. år).

Vedr. **Kriterium 7** og kravet til oplandsareal jf. Fbal (sommer) skelnes der mellem fire typer (Q_{min}) a) meget små oplande (< 10 l/s eller 0.3 mio. m³ pr. år), b) små oplande (10 - 50 l/s eller 0.3 - 1.5 mio. m³ pr. år), c) mellemstore oplande (50-200 l/s eller 1.5-6 mio. m³ pr. år) og d) store oplande (> 200 l/s eller 6 mio. m³ pr. år).



- Type 1: $Q_{10}/Q_{90} < 5$
- Type 2: $5 < Q_{10}/Q_{90} < 10$
- Type 3: $10 < Q_{10}/Q_{90} < 20$
- Type 4: $20 < Q_{10}/Q_{90}$

Eksempler:

- Type 1: Karup å, Skjern å
- Type 2: Ribe å, Uggerby å, Odense å
- Type 3: Havelse å, Åmose å
- Type 4: Trykgevælde å, Tude å

- 27.01 Ll. Hansted å (75 km²)
(daglig vandføring 1976-2010)
 $Q_{10}/Q_{90} = 8.9 > \text{type 2}$

Figur 8.1 Bestemmelse af type ud fra Q_{10}/Q_{90} (Refsgaard et al., 2010)

I tabel 8.2 er de numeriske krav til overslagsberegning og detailmodellering angivet (Refsgaard et al., 2010).

Tabel 8.2 Numeriske mål for nøjagtigheden (kravværdier til beta gældende for detailmodellering for Egebjerg området, baseret på at 27.01 Ll. Hansted å har en afstrømningsdynamik der svarer til type 2 (Q-variation), og type 3 (Q-mid samt Q-min). Kilde: (Refsgaard et al. 2010)

	Screening	Overslags beregning	Detail modellering	Kalibreringsmål for Egebjergmodellen
Beta 1 (ME/hmax)	0.05	0.025	0.01	$\frac{ ME }{\Delta h_{\max}} \leq \beta_1 = 0.01$
Beta 3 (RMS/hmax)	0.1	0.05	0.025	$\frac{RMS}{\Delta h_{\max}} \leq \beta_3 = 0.025$
Beta 4 (R ²) Type 2 Q90/Q10: 5-10	0.6	0.7	0.8	$R^2 \geq \beta_4 = 0.8$
Beta 5 (Fbal år) Type 3 Qmid 500-2000 l/s	15	10	5	$ Fbal = < \beta_5 = 5$
Beta 6 (Fbal sommer) Type 3: Qmin 50-200 l/s	50	30	15	$ Fbal = < \beta_6 = 15$

8.4 Planlagte valideringstest og –data

Der benyttes split sample test på daglig vandføring 2005-2009.

Sænkninger sammenlignes med vurderinger for 2004 jf. Ambo (2005) i boringer omkring Højballegårdværket.

Det vurderes om de estimerede parametre har realistiske værdier.

Simuleringer af grundvandsafstrømning vurderes i forhold til medianminimumsskøn.

Strømningsretninger og fordeling af residualværdier vurderes i forhold til simulerede trykniveau residualer og udvalgte tidsserier.

9. Kalibrering

I nærværende afsnit beskrives resultater af kalibreringsprocessen, herunder objektivfunktion, udvalgte kalibreringsparametre, kalibreringsresultat mht. simulerede versus observerede variable, opnåede parameterverdier med tilhørende konfidensgrænser og en vurdering af, hvor godt kalibreringsresultatet er.

9.1 Resultater af kalibreringsprocessen

Efter at testkørslen omtalt i kapitel 7 blev gennemført og vurderet rimelig mht. massebalance, robusthed, stabilitet og visualisering, er der i kalibreringsprocessen arbejdet ud fra en adaptiv og eksperimenterende kalibreringsstrategi og læringsproces som har haft fokus på:

- Tilpasning af objektivfunktionen til de hovedformål der er opstillet for modellen (dvs. vægtning af de enkelte led i funktionen i forhold til RMS, R2, Fbal mv.)
- Valg af kalibreringsparametre herunder gruppering/linkning af parametre til et håndterbart antal (max 5-10 parametre i en invers optimering)
- Gennemførelse af invers optimeringskørsel
- Udtræk af resultater mht. kvantitative og kvalitative performance (se kapitel 8)
- Analyse af estimerede parametre, konfidensgrænser og korrelation mellem optimerede parametre
- Vurdering og beslutningstagning vedr. behov for yderligere invers optimering. Hvis behov, videreudvikling på valgte kalibreringsparametre (herunder gruppering/linkning) samt design af objektivfunktion

PEST er anvendt til de inverse optimeringer for Egebjerg modellen. PEST anses i dag for at være det stærkeste værktøj til invers optimering (Henriksen et al., 2010; Doherty, 2004).

Selvom PEST er et godt værktøj kan automatisk kalibrering (invers optimering) være forbundet med problemer med entydighed (Sonnenborg og Henriksen, 2005). Entydighed angår den inverse relation, dvs. hvis forskellige parametersæt kan fremkomme fra samme observationsdatasæt, siges problemet at være ikke entydigt. Flere lokale minima i funktionen, der skal optimeres (objektivfunktionen, dvs. vægtning af residualverdier for synkron- og øvrige pejleobservationer, R2 værdi, Fbal sommer og Fbal året) kan således være årsag til ikke entydighed.

Hvis antallet af parametre overstiger antallet af observationer, vil problemet ligeledes være ikke-entydigt. Her har vi i princippet at gøre med ikke mindre end 84 lithologiske enheder der hver har 4 parametre (K_x , K_z , frit magasintal og magasinkoefficient), samt en række øvrige parametre for two-layer modellen, dræn konstant, vandløbslækage, Manningtal osv. I alt har Egebjerg modellen i størrelsesordenen 400 parametre, som i forhold til et datasæt på i størrelsesordenen 100 observationsdata pr. definition giver en ekstrem høj kompleksitet (altså dermed et "ikke entydigt").

Man vil typisk søge at reducere antallet af frie parametre ved at gruppere forskellige parametre og linke dem til en kalibreringsparameter. For Egebjerg modellen blev det i efter en række inverse kørsler besluttet at gruppere sandmagasinerne i 6 forskellige grupper ud fra en analyse af de forskellige magasiners hydrauliske egenskaber og støttet op af analyse af prøvepumpningsresultater (T-værdier), filtersætninger, sænkninger mv. Indbyrdes blev de enkelte Kx og Kz værdier linket for de 6 grupper som omtalt i afsnit 5.5. De i alt 42 sandlithologier blev på denne måde grupperet og linket til en horisontal ledningsevne for sandet, som indgik i optimeringen som fri parameter. For andre parametre, fx magasintal, blev det besluttet at fiksere parameteren ud fra erfaringsværdier fra bl.a. DK model version 2009 Midtjylland og/eller litteraturværdier.

Generelt sikres entydighed bedst, hvis 1) der indgår flere forskellige observationstyper, hvis 2) observationsdata er jævnt fordelt i tid og rum, hvis 3) usikkerheden på observationsdata er minimal, hvis 4) antallet af kalibreringsparametre er lavt, hvis 5) den valgte kombination af kalibreringsparametre er identificerbare, hvis 6) modellen udviser relativ stor sensitivitet (og relativ ens sensitivitet) overfor de udvalgte kalibreringsparametre, og hvis 7) modellen kalibreres mod flere forskellige hydrologiske påvirkninger (fx våd og tør periode).

Her kan man konstatere, at kun punkt 1), 6) og 7) er rimeligt opfyldt i tilfældet Egebjerg. Punkt 2) og 3) er ikke opfyldt, da der fx kun foreligger en enkelt vandføringsmålestation der dog dækker en stor del af oplandet (LI. Hansted å, 27.01 med et oplandsareal der udgør ca. ½ af modelområdet), og da pejledata er koncentreret omkring de vandværker der er i området, og idet de fleste pejetidsserier ikke har kunnet anvendes da de er meget påvirkede af vandindvinding (hopper mellem vandspejl under pumpning og rolandspejl). Punkt 4) er som beskrevet ikke opfyldt. Punkt 5) er heller ikke opfyldt, da det har vist sig i kalibreringsprocessen, at der er noget flertydigt mht. hvordan forskellige parametre kan grupperes og linkes, fx som beskrevet i afsnit 5.5. hvilket blev erkendt fra kalibreringen af invers 01 og frem til invers 08.

Man kunne i princippet tackle problemet med flertydighed/ikke entydighed på forskellig måde:

- Reduktionistisk tilgang (udelukkende gruppering af samtlige parametre i hhv. sand og ler, der så optimeres ved PEST)
- Superparameter optimering (hvor PEST selv bestemmer de parametre der skal kalibreres automatisk)
- Læringsbaseret tilgang (adaptiv tilgang hvor man "prøver sig frem" og analyser og forbedrer efter hver inverse PEST optimering, ud fra et antal optimeringer)
- Standard parameter tilgang baseret på litteraturen (dvs. at modellen slet ikke kalibreres men i stedet baseres på standardparametre)

GEUS har vurderet at den læringsbaserede tilgang er den mest relevante strategi i en opgave som har så udviklingspræget en karakter som Egebjerg modellen. Denne vurdering understøttes af, at det faktisk ikke er muligt alene at basere vurderingen af modellens performance på de rent kvantitative nøjagtighedskriterier. Det hydrologiske observationsdatasæt er relativt spinkelt, i forhold til at kalibrere modellen på grund af problemet med "ikke

entydighed". Kalibreringsprocessen bliver dermed alt andet end en rutinemæssig øvelse der kan klares med en invers optimering. Det bliver i stedet lidt af en udviklingsproces, hvor modellører og geologer stiller spørgsmål og kommer med nye ideer til gruppering af parametre og/eller dimensionering af objektivfunktion (fx hvilken vægt skal synkronpejlinger have i forhold til øvrige pejlinger, hvor stor vægt skal R2 for vandløbsafstrømning tillægges osv.). Dybest set har kalibreringsstrategien været kvalitativ. Meningstolkningen har været et centralt tema. Det der træder frem, eller viser sig, efter hver inverse optimering har været i fokus. Fortolkningen som modellører og geologer har foretaget har her været afgørende for hvordan der herudfra er taget beslutninger og foretaget forbedringer, og hvornår man har valgt at stoppe.

Kalibreringsprocessen har dermed karakter af en udviklingsproces og det er derfor besluttet at benytte den sidste inverse optimering (invers 08) til modelsimuleringerne, med den begrundelse at invers08 havde den bedst funderede måde at linke parametrene på indbyrdes, og at den samtidig gav den bedre performance i forhold til synkronpejlingerne.

9.2 Udvalgte kalibreringsparametre

Der er udvalgt følgende frie kalibreringsparametre jf. invers 08. Øvrige parametre er linket til en af følgende 6 frie parametre der estimeres i den inverse optimering med PEST:

- Smeltevandssand (ds00_kh)
- Glimmerler (gl00_kh)
- Moræneler (ml00_kh)
- Smeltevandsler (dl00_kh)
- Dræntidskonstant (drain_const)
- Vandløbslækage (leak_01)

Kalibreringsparametre fremgår af Bilag 5, 6 og 7 for invers 08.

9.3 Kalibreringsresultat

Det ses af Tabel 9.1, hvor kalibreringsresultatet er sammenfattet, at performance vurderet ud fra de to vandbalancekriterier er opfyldt (Fbal for året og for sommeren opfylder krav til detailmodellering). Derimod havde samtlige inverse kørsler problemer med R2 værdien (som lå omkring 0.5 i optimeringer). For invers 08 blev resultatet 0.46 hvilket dermed ikke opfylder kravet til detailmodellering. Der er dog kun en vandføringsstation, og det er primært et problem i relation til max afstrømning. Derfor kan man ikke umiddelbart forkaste modellen, da modellen ikke anvendes til simulering af max afstrømning.

Tabel 9.1 viser, at kravet til ME og RMS værdien ikke kan opfyldes jf. detailmodellering når samtlige 99 observationer indgår i analysen, og heller ikke når synkronpejleboringer benyttes. Det skal dog her nævnes, at der er anvendt de nye krav til nøjagtighedskriterier (Refsgaard et al., 2010), som har skærpet kravet til bl.a. RMS i forhold til tidligere krav (Sonnensborg og Henriksen, 2005) fra Håndbog i grundvandsmodellering, hvor kravet til RMS for "high fidelity" model svarende til detailmodellering var fastsat til det der nu svarer til kravet for overslagsberegning. Vurderes resultatet for ME og RMS imidlertid uden de 15 frasorte-

rede borer fås en ME værdi på -1.66 m og en RMS værdi på 5.30 m. Dermed er kriteriet for middelfejlen ME opfyldt for detailmodellering, ligesom at RMS kravet er tæt på at kunne opfyldes, og svarer i størrelsesorden til det der er opnået for fx Århus området (DHI 2004/2004).

Tabel 9.1 Performance kvantitative kriterier. Det bemærkes at krav til R2, Fbal og Fbal som skal gælde for 80 % af stationerne. For kriterium 1 og 2 er foretaget en vurdering dels for samtlige observationsdata og dels ved en frasortering af der konkret er vurderet "upålidelige"

	Performance Kriterium	Inputdata	Klassifikation	Performance krav	Kriterium Overslags beregning (Refsgaard et al., 2011)	Kriterium Detail Modellering (Refsgaard et al., 2011)
1	Trykniveau residualværdi ME/dh Max	ME = -3.30 m	dH Max =165 m	ME/dH Max= 0.02 m	<0.025 OK	< 0.01 EJ OK
1a*	Trykniveau Residualværdi ME / dh Max (frasortering 15 obs)	ME = -1.66 m	dH Max =165 m	ME/dH Max = 0.01	< 0.025 OK	<0.01 OK
2	Trykniveau Residualværdi RMS / dh Max	RMS = 9.54 alle 8.42 syn	165 m	0.057 0.051	< 0.05 OK	< 0.025 EJ OK
2a*	Trykniveau Residualværdi RMS / dh Max (frasortering 15 obs)	RMS = 5.30 alle	165 m	0.032	< 0.05 OK	< 0.025 EJ OK
3	Q-hydrograf R2	Q90/Q10= 5.88	=> Type 2	0.46	> 0.70 EJ OK	> 0.80 EJ OK
4	Vandbalance Fbal år	Q mid ca. 700 l/s	=> Type 3	5.13	< 10 % OK	< 5 % OK
5	Vandbalance Fbal som	Q min 50-200 l/s	=> Type 3	11.5 %	< 30 % OK	< 15 % OK
I alt	Konklusion				OK	EJ OK

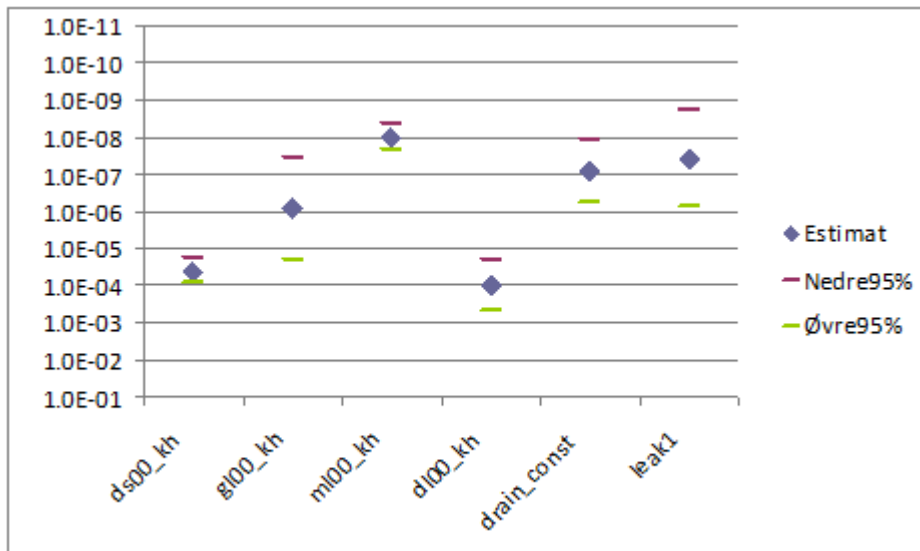
* Følgende 15 borer er frasorteret i 1a og 2 a vurderingen: 107.1128, 107.1202, 107.1215, 107.1221, 107.741, 107.796, 107.830, 107.927, 98.538, 98.606, 98.631, 98.721, 107.707, 98.543 og 98.768. Af de 15 frasorterede borer, har halvdelen meget gamle med pejleobservationer fra 70'erne (107.741, 107.830, 107.927, 98.538, 98.606, 98.631 og 98.721), mens nogle borer udviser mistænkelige koter for de seneste to år, i forhold til ældre observationer hvilket indikerer mulige "kotefej" på nyeste data (107.1202, 107.707, 98.543 og 98.768).

Det vil sige, at Egebjerg modellen dermed opfylder de nye krav til vandbalancen fra Geovejledning 7 (Refsgaard et al., 2010), stort set opfylder kravene til RMS og ME jf. samme

vejledning for detailmodellellering når der frasorteres 15 observationer. Kravet til R2 er dog ikke opfyldt.

9.4 Opnåede parameterværdier og konfidensgrænser

I figur 9.1 er vist resultatet af optimerede parametre.



Figur 9.1 Estimerede parametre (Øverst: invers01, Nederst: invers08)

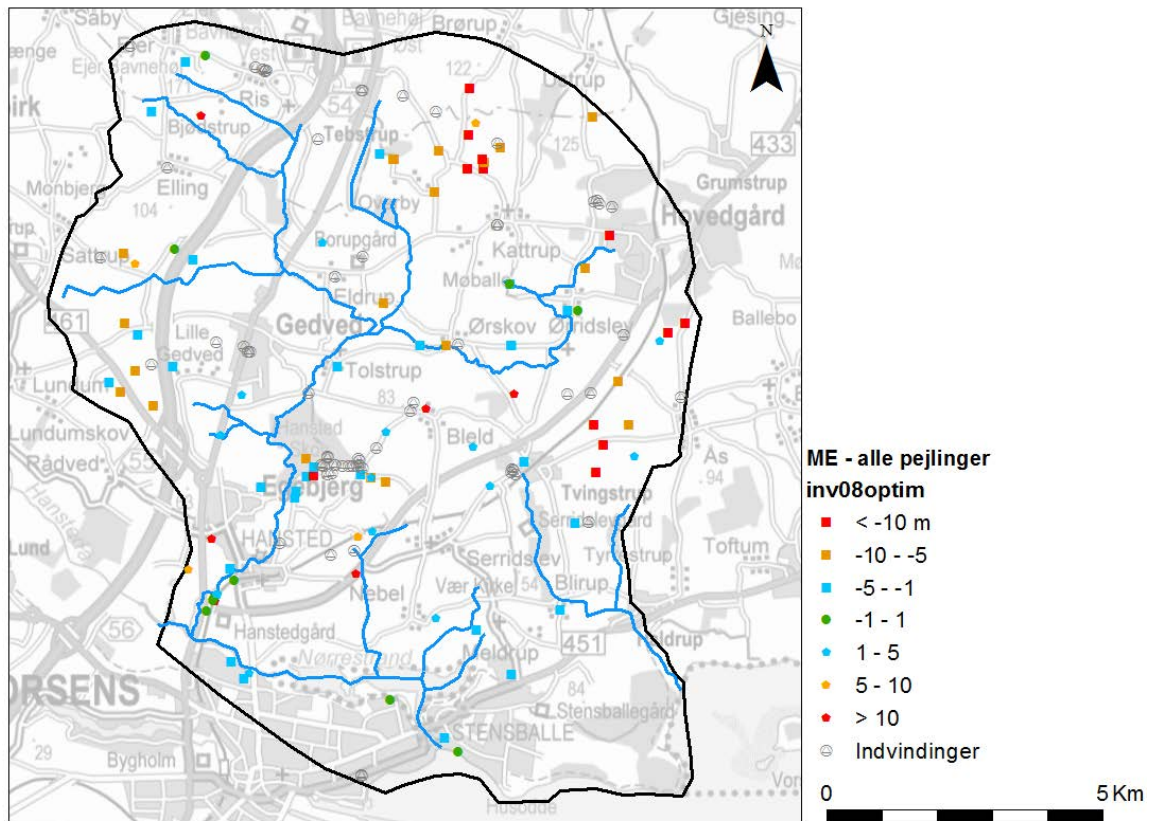
De optimerede parametre fremgår i øvrigt af Bilag 5-7, hvor det også fremgår hvad hver enkelt lithologi estimeres til, på baggrund af den gruppering og linkning der er valgt til invers 08.

9.5 Vurdering af kalibreringsresultatet

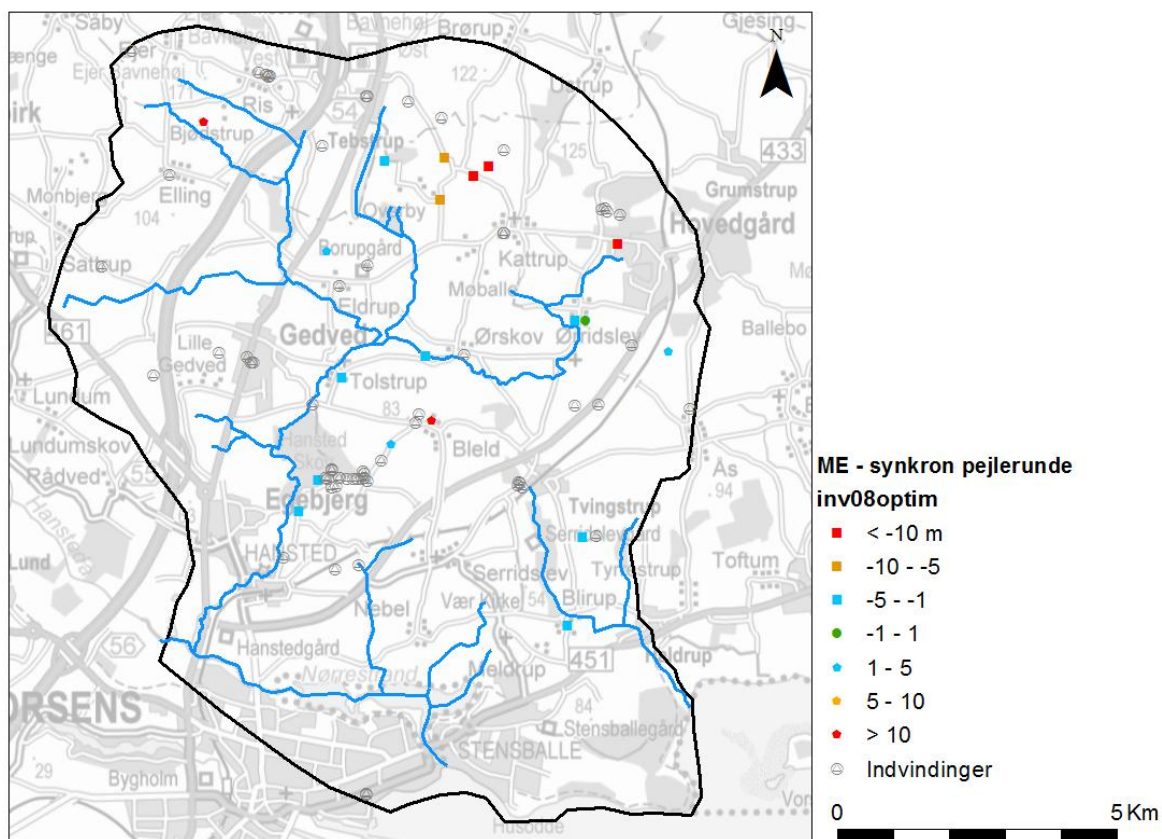
Invers 08 giver generelt mere realistiske konfidensintervaller, dog er glimmerleren relativ usikkert bestemt (kan variere mellem 0,5 e-05 og 0.5 e-08). Sandet (ds00_kh) er relativt godt bestemt, det samme gælder moræneleren). For enkelte parametre ses lidt urealistiske niveauer, specielt ser glimmerleren (gl00-kh) ud til at blive optimeret med en høj værdi, som dog kunne forklares ved at der forekommer tynde sandlag i leren. Mere problematisk er optimeringen af smeltevandsleren (dl00_kh). Samlet vurderes optimering 08 at indeholde de mest valide antagelser vedr. linkningen af enhederne og vægtningen af de enkelte led i objektifunktionen. Det fremgår af BILAG 7 af korrelationsmatricen, at der ikke er væsentlig korrelation mellem de optimerede parametre (mest korreleret er lækagekoefficienten for dræn og vandløbslækagen (værdi 0.84 << kravværdi på 0.95).

I Fig. 9.2 og 9.3 er vist opnåede residualværdier for trykniveau vurderet ud fra hhv. observerede og modellerede værdier. Der ses rimeligt gode overensstemmelser i størstedelen af modelområdet og omkring Højballegårdværket. Der er dog i den nordlige og østlige del af modelområdet nogle systematiske afvigelser hvor modellen simulerer for højt et grund-

vandspejl i forhold til observationsdata i et par områder mellem Tebstrup og Kattrup samt nord for Tvingstrup. Det er disse områder der 'bidrager betragteligt' til de høje samlede RMS værdier på 9-10 m. Mange af pejlinger fra dette områder er dog enten meget gamle (syv boringer har kun observationer fra 70'erne), eller ser upålidelige ud fra en konkret gennemgang, fx i forhold til pejleserien, hvor de nyeste observationer for nogen af boringerne muligvis har kotefejl for de seneste par år (se tabel 9.1). Frasorteres 15 boringer viser tabel 9.1 at modellen for alle resterende pejleobservationer (i alt 84) kan opfylde kravet til middelfejlen (ME) jf. detailmodellering, og er meget tæt på at kunne opfylde kravet til RMS for detailmodellering. Modellen vurderes således at have generel god performance.



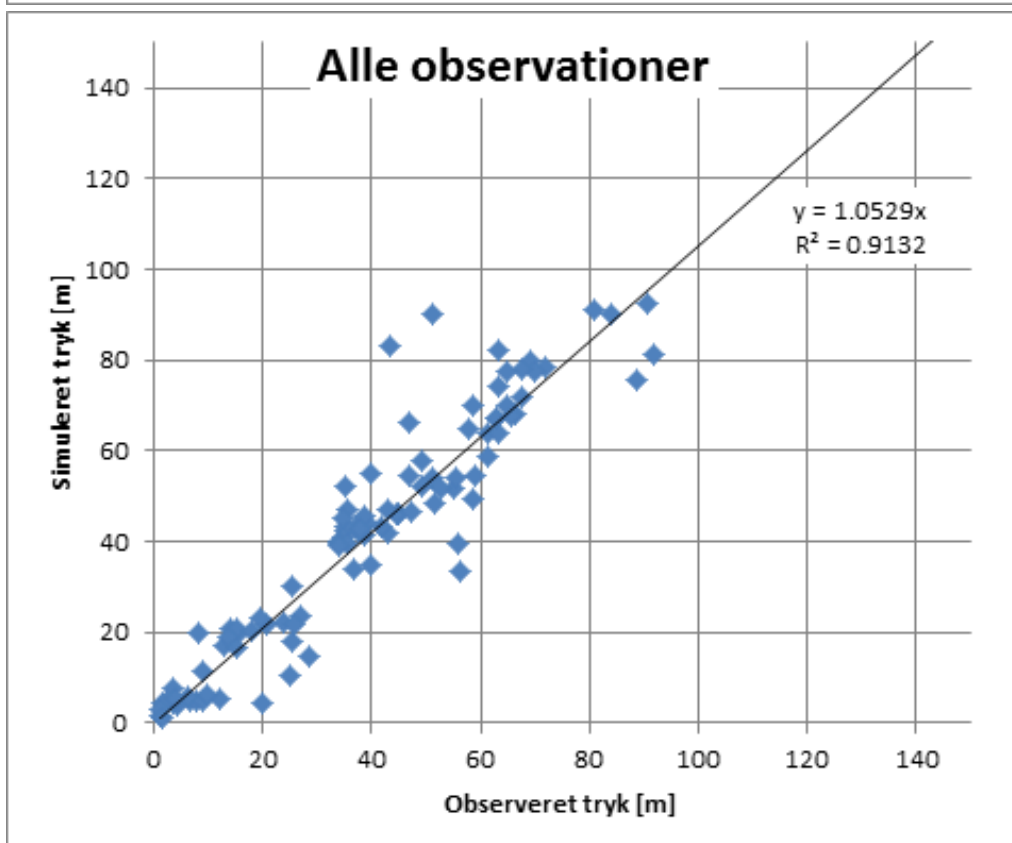
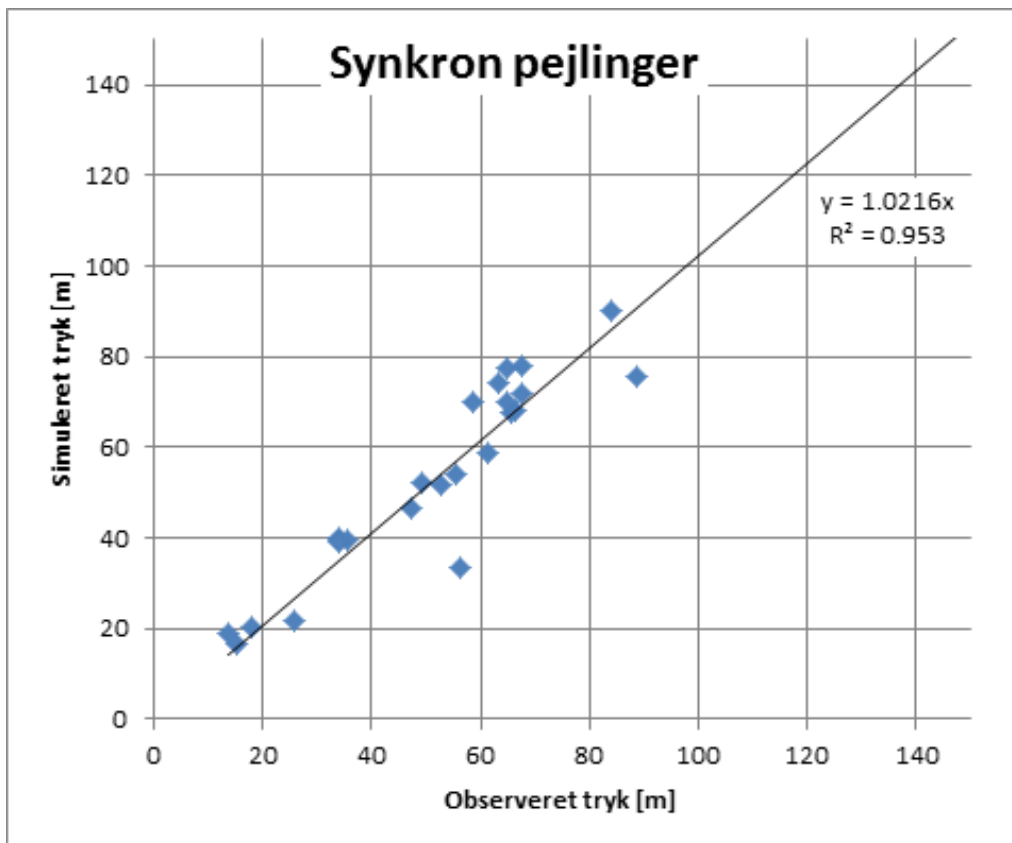
Figur 9.2 Kalibreringsresultat (invers08): Residualværdier for trykniveau (simuleret – observeret) Alle obs.



Figur 9.3 Kalibreringsresultat (invers08): Residualværdier for trykniveau (simuleret – observeret) – synkronpejlinger.

GEUS har valgt at bibeholde samtlige observationer, og fokusere på overensstemmelsen i forhold til synkronpejlerunderne i den seneste inverse optimering (invers08), ved at vægte disse observationer i forhold til de resterende observationer. At modellen samtidigt giver et godt resultat for alle observationer efter frasortering af 15 ud af 99 observationer tyder på at modellen er velkalibreret.

Afbilder man simuleret og observeret trykniveau i et diagram fås resultatet vist i Fig. 9.4.



Figur 9.4 Simuleret og observeret trykniveau (hvh. synkropejlinger øverst og alle observationer nederst)

En fuldstændig validering og dokumentation af modellens evne til at simulere trykniveau incl. tidlige variationer, ville kræve at der blev tilvejebragt daglige data for oppumpningerne som blev lagt ind i modellen for samtlige indvindingsboringer. Herved ville man have en bedre chance for at validere modellen i forhold til observationsdata, men det ville samtidig være en relativ bekostelig opgave at tilvejebringe et sådant datasæt.

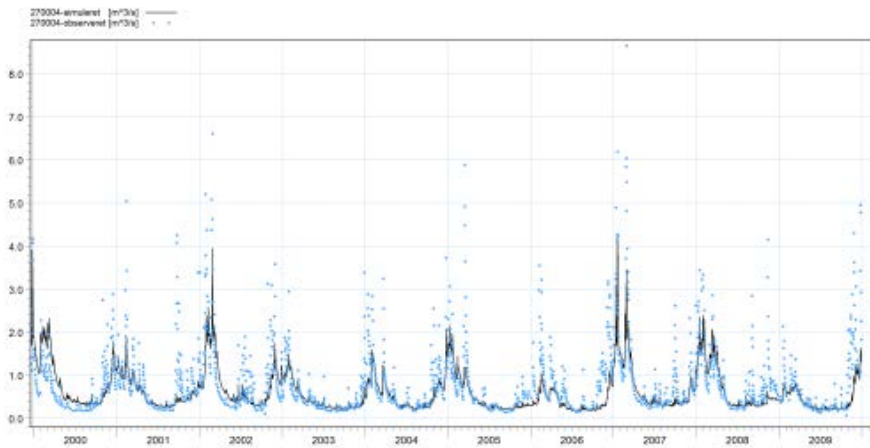
Kigger man på fordelingen af RMS og ME værdier for beregningslag i modellen er resultatet som vist i tabel 9.2 (vist for alle trykniveau observationer).

Tabel 9.2 Kalibreringsresultat RMS værdier fordelt på beregningslag (invers 08 alle observationer)

Beregningslag	Antal trykniveau observationer	ME værdi	RMS værdi
1	14	- 0.79	3.38
2	12	- 4.34	8.40
3	17	- 1.22	9.85
4	11	2.28	7.66
5	10	- 4.37	6.18
6	8	-11.5	15.78
7	7	- 8.23	11.15
8	2	- 5.36	10.32
9	4	- 4.32	11.10
10	3	- 2.55	2.81
11	2	- 3.28	4.49
12	4	- 6.65	22.15
15	1	4.23	4.24
16	2	0.84	3.11
19	1	- 2.13	2.13
20	1	- 1.83	1.83
23	1	- 6.90	6.90
24	1	- 3.38	3.38

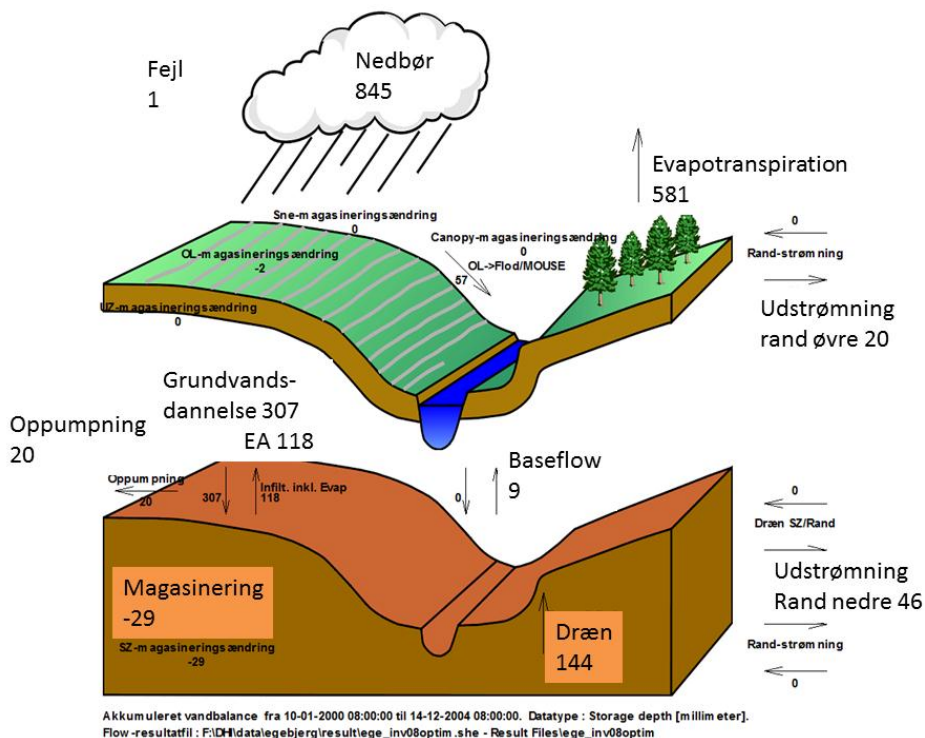
Det fremgår af tabel 9.2 at modellen for de øverste 5 lag (beregningsslag 1-5) generelt simulerer mindre middelfejl og RMS værdier (ME-øvre ~ 1.7 m og RMS-øvre ~ 7.1 m) end gennemsnittet på ME = 3 m og RMS = 9.5 m bedømt ud fra alle observationer. For de næste 10 beregningslag (beregningsslag 6-15) giver modellen noget større afvigelser (ME-mellem ~ 5.8 m or RMS-mellem ~ 10.3 m). For de femten dybeste lag (beregningsslag 16-24) giver modellen igen bedre performance (ME-dybe ~ 3.0 m og RMS-dybe ~ 3.47 m). Det vil sige at model performance dels er rimelig god i de øverste lag der er vigtige for vurdering af grundvandsdannende områder, men også er god i de dybeste lag hvorfra bl.a. Højballégårdværket indvinder sit vand, således at simuleringen af indvindingsoplande formentlig også er rimelig god i forhold til udbredelsen af dybe begravede dale. Der er rimeligt mange observationer til at understøtte denne vurdering for de øverste fem lag, men ret få for de mellemste og dybeste lag.

RMS værdien for samtlige synkronpejlepunkter (Fig. 9.4) er beregnet til 8.27 m for invers_08, mens den for samtlige pejlinger (Fig. 9.4 og tabel 9.2) er 9.54 m.



Figur 9.5 Simuleret og observeret daglig vandføring (m^3/s) ved st. 270004 LI, Hansted å for 2000-2009.

Det fremgår af Fig. 9.5 at modellen kvalitativt vurderet, giver en god beskrivelse af minimumsvandføringen specielt i den sidste del af kalibreringsperioden (2003-2004). Simuleringen af max. afstrømning er mere usikker. Samlet giver invers 08 en R2 værdi på 0.53 for hele perioden 1990-2009. Den tilsvarende værdi for kalibreringsperioden 2000-2004 er 0.47. I Fig. 9.6 er vist resultatet for vandbalancen i kalibreringsperioden.



Figur 9.6 Vandbalance for kalibreringsperioden (invers 08) 2000-2004.

Grundvandsdannelsen er simuleret til 307 mm/år, og fordeler sig videre på 20 mm/år til oppumpning, udveksling med rodzonen til fordampning på 118 mm/år, dræn og grundvandsafstrømning til vandløb på i alt 155 mm/år og udstrømning til modelrand på 46 mm/år. Der ses en ret stor magasinering i kalibreringsperioden på 29 mm/år.

10. Validering og usikkerhedsanalyse

I nærværende afsnit beskrives resultater af modelvalideringen og efterfølgende usikkerhedsanalyse med udgangspunkt i opstilling af usikkerhedsmatrice for Egebjerg og vurdering af usikkerheder på planlagte modelanvendelser

10.1 Resultater af validering

En analyse af afstrømninger for 2005-2009 ved Q27.01 (270004) viser at R2 værdier giver omtrent samme resultat for hele perioden som for kalibreringsperioden (se Fig. 9.5). Resultaterne af den kvalitative vurdering ud fra simuleret fordeling af medianminima fremgår af tabel 10.1, vurderet ud fra referencekørsel 2A (se kapitel 12) baseret på oppumpning for 2006-2008, og gennemsnitsværdier for 1991-2009.

Tabel 10.1 Simulerede fraktilværdier for reference kørsel 2A med 2005-2007 oppumpning (1991-2009) – l/s

	Q station 27.01	Ll. Hanst. å 110	Ll. Hanst. Å 111	Ll.Hans ted å 15	Gedved Mølleå 17	Gedved mølleå 76	Ørskov bæk 3	Ørskov bæk 43	Holtvad bæk 20	Fiske- bæk 9
5%	222	142	156	39	45	75	8	17	24	2
1%	193	123	135	33	40	66	7	14	20	2
Middel af 1 og 5 % fraktil	207	132	145	36	42	70	7	16	22	2
Median Min.	148	110	111	15	17	76	3	43	20	9
Vurde- ring	OK	OK	OK	Lidt høj	Lidt høj	OK	OK	Lidt lav	OK	OK

I dataafsnittet i kapitel 4 fremgik det at usikkerheden på de gamle medianminimumsskøn kunne være op til 100 % bedømt ud fra en enkelt nyere måling i Holtvand bæk som gav et estimat på 10 l/s. Afvigelser på under 10 l/s, eller under 100 %'s afvigelse vurderes derfor at være acceptable i forhold til de gamle medianminimumsskøn fra 1974. De Lidt høje og lidt lave værdier for hhv. øvre del af Ll. Hansted å, Gedved mølleå samt Ørskov bæk kan skyldes at der ikke er arbejdet med delopløandsafgrænsninger indenfor Ll. Hansted å systemet. Modellen dræner derfor til nærmeste vandløb, og afvigelseerne kan forklares af denne modelopsætning.

Kvalitativ vurdering af simulerede sænkninger omkring Højballegårdværket kan kun være en grov vurdering, da effekter af de højere indvindinger i midten af 70'erne stadig kan påvirke perioden 1991-2009 specielt for de dybere lag. Det vurderes desuden at modellen er

flere årtier om at finde en ny ligevægt, i tilfælde af at der ændres væsentligt på indvindingen (der er stadig effekter af magasineringsændring efter 40 år). Endelig er en del af vandspejlsmålingerne evt. påvirket af pumpning, hvorfor de vurderede afsænkninger på op til 20 meter i Ambo (2005) nok er over det man må forvente at modellen med en skala på 100x100 meter kan simulere. Sænkningerne vurderet ud fra hhv. aktuel indvinding 2006-2008 (reference kørsel 2A) og nul-indvinding (se kapitel 12) fremgår af Fig. 10.1 og vurderes dermed at være mindre end det Ambo (2005) når frem til.

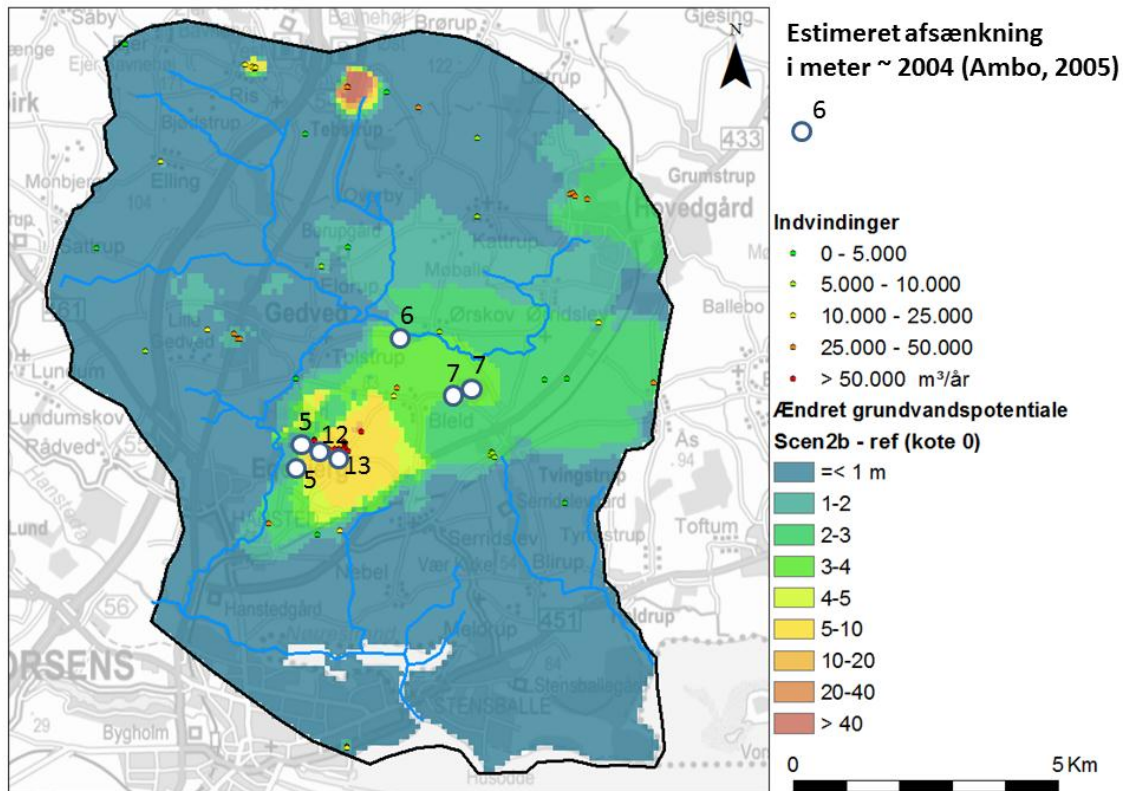


Fig. 10.1 Kvalitativ vurdering af simulerede afsænkninger for 2004 (Ambo, 2005) sammenlignet med vurderet afsænkning for ref. scenarie 2A og kørsel uden oppumpning (se kapitel 12) for kote 0

Det vurderes at modellen giver lidt mindre afsænkninger end vurderet af Ambo (2005) for 2004 situationen, men at den geografiske fordeling af sænkningstragten svarer meget godt til de estimerede sænkninger ud fra pejletidsserier. Det skal bemærkes at den simulerede afsænkning er udtrykt for et niveau svarende til kote 0, altså et par beregningslag over det niveau hvorfra hovedparten af indvindingen fra de dybe filtre ved Højballegårdværket sker.

10.2 Usikkerhedsanalyse

I tabel 10.2 er listet nogen af de vigtigste parametre der har betydning for afgrænsningen af indvindings- og grundvandsdannende oplande (Henriksen et al., 2011). Tabel 10.2 vurderer dermed hvilken fokus de enkelte elementer bør indgå med i en generel kortlægningsopgave.

ve i forhold til vurdering af oplandsusikkerhed på de numerisk beregnede oplande fordelt på tre kategorier: "Vigtigt", "Meget vigtigt" og "Afgørende betydning".

Tabel 10.2 Modelparametre og usikkerhedskilder ved modelbaseret afgrænsning af indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande (Henriksen et al., 2010), 'X' viser vurdering af vigtighed jf. denne kilde. Markering af gråtoneraster viser vurderingen af vigtighed jf. erfaringer med Egebjergmodellen.

Parameter (score)	Vigtigt	Meget vigtigt	Afgørende betydning
Geologisk usikkerhed		X	
Konceptuelle model		X	
Heterogenitet			X
Diskretisering (horisontalt)		X	
Diskretisering (vertikalt)		X	
Randbetingelser (rigtige valg)			X
Vandløbskontakt (størrelse)		X	
Dræn (størrelse)		X	
K- og T-værdier			X
Kh:Kv Anisotropi		X	
Potentiale og gradientforhold			X
Indvindingsstruktur		X	
Nettonedbør		X	
Vandbalancen		X	
Stat/dyn oplande	X		
Klima		X	
Modelkode	X		
Partikelbanemodul	X		
Strong-weak sink		X	
Antal partikler		X	
Optegning af "stregen"			X

Det er en del af formålet at vurdere hvorvidt Egebjerg oplandet adskiller sig fra 'anbefalingerne' i tabel 10.2, og rastermarkeringen i "gråtone" markerer revurderingen foretaget efter at nærværende rapport var færdiggjort (vi kommer tilbage til grundlaget for denne revurdering i de følgende afsnit). Der er foretaget en meget grundig opstilling af en 3D geologisk model, incl. lagt op til markering af usikkerheder på voxelniveau (Møller og Jørgensen, 2011). I rapporten er dog kun vist usikkerheder i forhold til nogle flader fx toppen af kalken, paleogænet, eller for begravede dale: TopDS1, TopDL. TopDL, toppen af smelteandsleren er vurderet "usikker" i den sydligste del af modelområdet omkring Rugballegård, hvor dette lag er modelleret med meget store mægtigheder. Der er dog ikke i rapporten (Møller og Jørgensen, 2011) angivet usikkerhedsvurdering på fx tykkelsen af smeltevandsleren (lithologisk enhed nr. 7) fx for de begravede dale hvor tykkelsen typisk er stærkt varierende mellem ca. 5 meter og ca. 50 meter (jf. Bilag 28 i Møller og Jørgensen, 2011).

Heterogenitet omhandler den variabilitet der kan være på lille skala indenfor den enkelte voxel, og som det fremgår af tabel 10.2 en parameter med afgørende betydning. I forbindelse med Egebjerg modellen er det især forhold omkring det øverste beregningslag, fx sprækker i moræneleren, sandvinduer, tynde sandlag og evt. hængende vandspejl i umættet zone (idet dette lag af beregningstekniske årsager er ført fra terræn til 2 meter under grundvandspejl af hensyn til integrationen af Two-layer og MIKE SHE vandudvekslingen), samt forekomsten af tynde vandførende eller vandstandsende lag i de dybere lag fx smeltevandsler eller glimmerler, der ikke direkte kan afkodes fx i den geofysiske tolkning (SKY-TEM/PACES), og vil indgå i parameteriseringen i form af 'lumped parametre'. Heterogenitet er dermed en væsentlig usikkerhedskilde som modelkonceptet ikke eksplicit inddrager, selvom modelprocessen vil kunne give noget feedback fx ud fra de optimerede parametre til hvorvidt heterogenitet er et væsentligt problem. Vi vurderer problemet som "meget vigtigt" dog ikke af "afgørende betydning" for indvindings- og grundvandsdannende oplande.

Horisontale og vertikale diskretisering er begge meget vigtige (Tabel 10.2). Modellen for Egebjerg er diskretiseret så detaljeret som dagens computerkraft og memory forbrug tillader det (modellen har 30 beregningslag med en diskretisering på 100x100 meter), og i forhold til at der kunne gennemføres de nødvendige inverse modelleringer indenfor den berammede tid til kalibreringen. Det er dog ikke ensbetydende med, at en finere diskretisering ikke er nødvendig, det var blot ikke modelteknisk og tidsmæssigt muligt, selvom fx en 50x50 meter diskretisering og en repræsentation af samtlige voxels fra terræn til kalken ideelt set havde været ønskelig (en sådan diskretisering ville dog have forlænget projektet i kørselstid ganske betragteligt). Vi opgraderer horisontal diskretisering til at have afgørende betydning.

Randbetingelser vurderes at have stor betydning, men dog ikke afgørende betydning, vi nedjusterer derfor til 'meget vigtigt'. Der er indbyrdes modstrid i et ønske om finere diskretisering i forhold til et ønske om et større modelområde af hensyn til randbetingelser. Igen repræsenterer Egebjerg modellen "et kompromis", på hvad der praktisk har været muligt og samlet set mest optimalt. Derfor måtte vi afgrænse Egebjerg modellen som vist i Figur 4.5, og leve med, at der er en usikkerhed på fastlæggelsen af randbetingelser især mod øst (bl.a. den dybe dal der skærer modelranden og anisotropien jf. de begravede dale).

Vandløbskontakt og dræn er begge vigtige (Tabel 10.2). Egebjerg modellen har ikke et datagrundlag i form af kortlægning af udvekslingen mellem grundvand og vandløb der muliggør en distribueret af vandløbslækagen. Denne er derfor antaget konstant, men parameteriseret så den geologiske model i de grids hvor udvekslingen sker, indregnes. Vi har nedjusteret denne parameter til "vigtig". Drænkonstanten er ligeledes antaget konstant, idet der i kortlægningen ikke har været fokus på en kortlægning af de faktiske drænforhold (fx baseret på Orbicon's drænarkiv), idet disse data er vanskeligt tilgængelige. Hertil kommer så, at det er antaget at drænvandet afstrømmer til "nærmeste vandløb" indenfor opsætningen for LI. Hansted å oplandet. Der er ikke afgrænset deloplande til de vandløbspunkter hvor der er udtrukket resultater til sammenligning med medianminimumsskøn på deloplandsniveau indenfor oplandet til 27.01. Selvom resultaterne for målestationen er præcise, giver det en usikkerhed for de øvrige punkter i de tilfælde hvor grundvand ikke strømmer

mod nærmeste vandløb. Resultatet for Fiskebæk er dog præcist da der er defineret drænoplunde til de nye vandløb der er lagt ind i setupet. Usikkerheden kan evt. reduceres ved at der lægges deloplunde ind for samtlige udtrækspunkter i forbindelse med senere anvendelse af modellen til simulering af scenarier for fx nye vandindvindingsstilladelser. Vi har derfor opjusteret drænet til at have "afgørende betydning" også bedømt ud fra sensitivitet.

De hydrauliske parametre (K- og T-værdier) har været i fokus i området og der foreligger en del litteratur specielt omkring Højballegårdværket. Disse data indgår som T-værdier i fastlæggelsen af initialparametre og i linkningen af enheder. Reelt set er det imidlertid meget sparsomme data, der kun giver vurderinger for nogen ganske få vandførende enheder (typisk de vigtigste magasiner der indvindes fra). Når det gælder de lavpermeable enheder, og nogen af de prækvartære sandenheder, så der reelt set ingen T-værdi (eller K-værdi) data i området, det er derfor svært at give de nødvendige input til initialværdier og usikkerhedsbånd for samtlige 84 lithologiske enheder (som det fremgår af Bilag 1 er der ikke givet et skøn over hver enkelt lithologi's usikkerhedsinterval). Det vil sige af for 'helheden' af parametersættet, ja der er datagrundlaget i form af målte hydrauliske parametre meget spinkelt, på trods af at K- og T-værdier jf. Tabel 10.2 er af afgørende betydning.

Ligeledes er potentiale og gradientforhold samt indvindingsstruktur af afgørende betydning. Der er i kortlægningen gennemført indsamling af synkronpejledata, men mange af tidsserierne for pejlinger er tydeligvis påvirkede af indvindingsboringer (se Bilag 2), hvorfor mere fokus på dynamikken i vandindvindingen og nogen pejleserier der kan beskrive potentialeforhold i større afstand fra pumpeboringer ville have været et væsentligt forbedret grundlag. Potentiale og pejledata udgør dermed et relativt spinkelt grundlag for modelkalibreringen, specielt i lyset af den meget detaljerede model med mangfoldigheden på 84 lithologiske enheder, der reelt set ville kræve et væsentligt større datagrundlag i form af brugbare pejletidsserier og oppumpede vandmængder på nærmest 'dagsniveau' (kun nogle enkelte pejletidsserierne indgik eksempelvis i den inverse optimering, for de øvrige var det nødvendigt at benytte gennemsnitsværdier over tid). Den konkrete gennemgang med frasortering af 15 pejleobservationer bekræfter problemerne med datakvaliteten i forhold til pejledata.

Nettonedbør og vandbalancen er jf. Tabel 10.2 vurderet som "Meget vigtige" for indvindings- og grundvandsdannende oplande. Hvis vandbalancerne er fejlagtige vil det eksempelvis resultere i, at placeringen og størrelsen af de grundvandsdannende oplande og indvindingsoplandene, som skal udpeges i grundvandskortlægningen, vil være systematisk forkerte. Så en forudsætning for at de udpegede oplande får høj troværdighed er, at vandbalancen er bestemt på det bedst mulige faglige grundlag (Refsgaard et al., 2011). I Egebjergmodellen er vandbalancen bestemt jf. krav til Fbal sommer og Fbal året. Andre undersøgelser (fx den igangværende Horsens fjord model / KIMONO projektet) peger også på, at dynamisk eller standard korrektion har mere begrænset betydning i netop Horsens fjord oplandet. Derfor vurderer vi, at nettonedbør og vandbalance er relativt godt beskrevet for Egebjerg modellen. Vi fastholder vandbalance og nettonedbør som 'meget vigtig'.

Partikelbanemodulet og antal partikler vurderes at være en væsentlig usikkerhedskilde. I starten blev der anvendt 10 partikler i hver kasse for det øverste af de 30 beregningslag og

4 partikler i hver kasse for lag 2 til 30. En test med 100 partikler i det øverste lag viste imidlertid et meget mere detaljeret billede på de grundvandsdannende oplande. Derfor blev der benyttet 100 partikler i lag 1 og 4 partikler i de følgende lag i produktionskørslerne, med en tilfældig fordeling af partikler indenfor kassen (for lag 1 i den mættede del af kassen). Samlet er antallet af partikler derfor noget der har afgørende betydning, vi opgraderer antal partikler til "afgørende betydning".

Den sidste usikkerhed, optegning af strengen, som der er taget hensyn til ved at der er lagt et usikkerhedsbånd ind svarende til en afstand på 2 kasser udenom kassen med partikelfund (~ 200-300 m usikkerhedsbånd). Dette er et subjektivt vurderet usikkerhedsbånd på baggrund af de samlede usikkerheder på især residualværdier for "simuleret trykniveau" for Egebjergområdet. Vi fastholder "afgørende betydning" som markør for optegning af strengen. Tabel 10.3 opsummerer ovenstående usikkerhedskilder.

Tabel 10.3 Usikkerhedsmatrix for Egebjerg

EGEBJERG OPLANDET		Usik.grad/ dækning	vægt	effekt	Redu- cerbar	Kvanti- ficer- bar	Tiltag såfremt Ege- bjergmodellen skal forbedres	
Kilde til usikkerhed								
Data	Geologi	Øvre	<i>lille</i>	<i>stor</i>	<i>Middel</i>	<i>nej</i>	nej	
		Mellem	<i>stor</i>	<i>middel</i>	<i>Stor</i>	<i>nej</i>	nej	Alternative modeller for glimmerler og smeltvandsler
		Nedre	<i>middel</i>	<i>middel</i>	<i>Middel</i>	<i>ja</i>	nej	
	Geologi	Heterogenitet	<i>stor</i>	<i>stor</i>	<i>Stor</i>	<i>Ja</i>	nej	Fokus bør være på lavpermeable lerlag
	Potentiale		<i>lille</i>	<i>stor</i>	<i>Stor</i>	<i>nej</i>	ja	Forbedret pejlegrundlag (flere punkter/tidsserier)
	Afstrømning		<i>stor</i>	<i>stor</i>	<i>Stor</i>	<i>ja</i>	ja	Nye Q-målinger fx et par nye stationer samt ny synkronmålingsrunde
	Hydrauliske Værdi(K, T)		<i>stor</i>	<i>stor</i>	<i>Stor</i>	<i>ja</i>	ja	Primært behov for effektive parametre til linkning af parametre for lerlag
Model	Inputdata	Grundvandsdannelse	<i>middel</i>	<i>middel</i>	<i>Middel</i>	nej	nej	
	Konceptuel model	Geologi	<i>stor</i>	<i>stor</i>	<i>Stor</i>	ja	nej	Undersøge alternative geologiske modeller
		Diskretisering	<i>middel</i>	<i>middel</i>	<i>middel</i>	nej	ja	
		Rand	<i>lille</i>	<i>stor</i>	<i>middel</i>	nej	nej	
	Kode		<i>lille</i>	<i>lille</i>	<i>lille</i>	nej	nej	
Scenarier	Fremtidige forhold							
		Indvindingsbehov	<i>stor</i>	<i>stor</i>	<i>stor</i>	Nej	ja	Sensitivitetskørsel med ændret fordeling på kildepladser jf. tilladelser.
		Klima	<i>stor</i>	<i>middel</i>	<i>stor</i>	Ja	nej	Ekstra kørsel med A2 klimascenariet

11. Modellens dokumenterede anvendelsesområde

Beskrivelse af hvilke anvendelser (geografiske områder, typer af beregninger, nøjagtighedsniveau) modellen er dokumenteret gyldig for valideringstest. Endvidere beskrivelser af hvilke anvendelser modellen måske er egnet til og endelig beskrivelser af anvendelser modellen ikke kan anses for egnet til.

GEUS vurderer, at modellen for Egebjerg med foreliggende kortlægningsdata og kalibrering udgør et solidt og det bedst mulige faglige grundlag til:

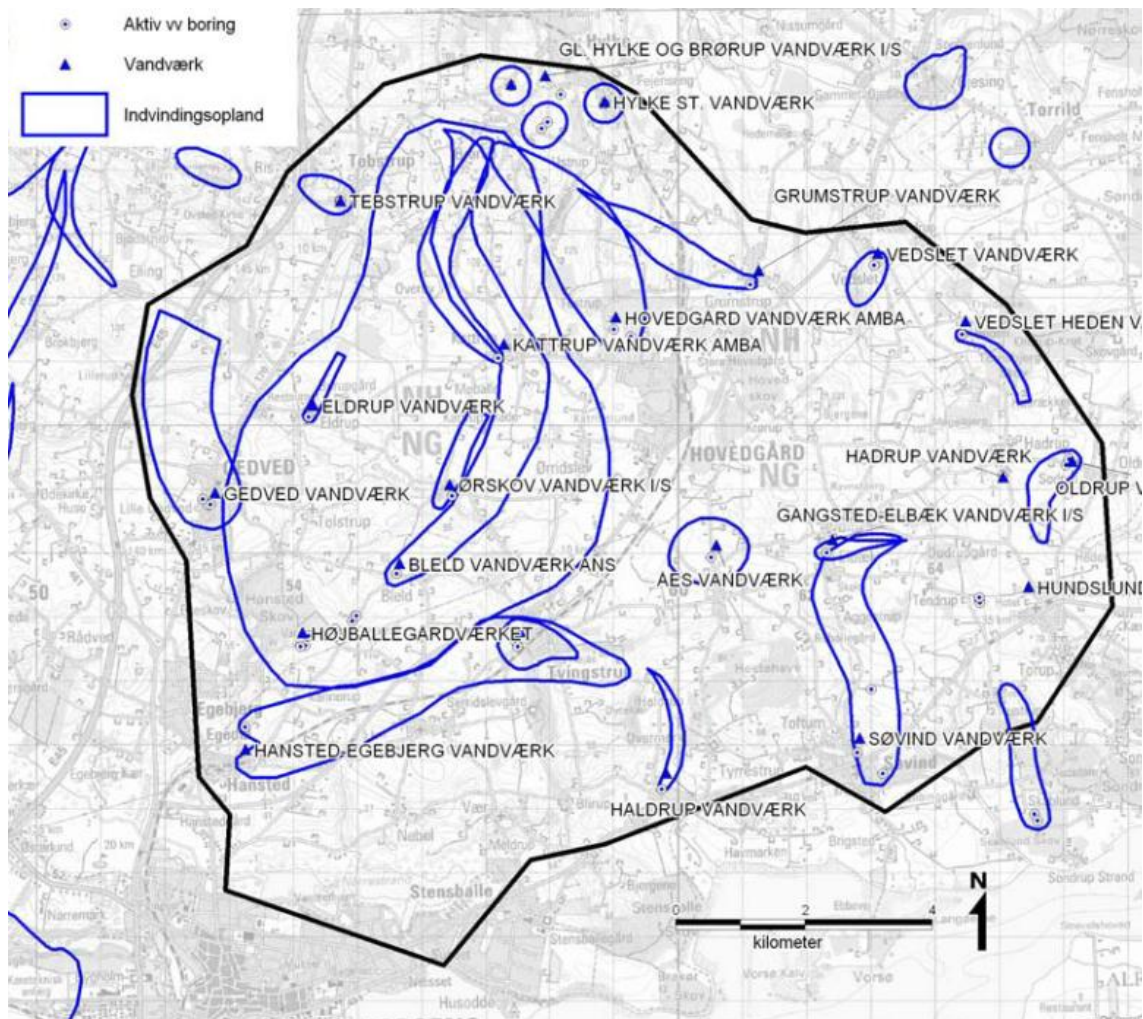
- 1) detaljeret afgrænsning af det samlede indvindingsopland og grundvandsdannende opland til de 8 vandværker i området (som indbyrdes er stærkt afhængige og indbyrdes påvirkede af indvindingen ved Højballegårdværket)
- 2) detaljeret vurdering af de samlede vandbalanceforhold, grundvandsdannelse, udbredelse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

Modellen er dokumenteret gyldig jf. krav til detailmodellering for vandbalance kriterier samt middelfejl på trykniveau (når der frasorteres 15 meget usikre boringer). Modellen giver RMS værdier (ligeledes efter frasortering af 15 meget usikre boringer) der er tæt på at kunne opfylde kravet til detailmodellering. Det bemærkes, at kravværdien til RMS er blevet skærpet jf. Refsgaard et al. (2011) i forhold til tidligere anbefalede værdi i Håndbog for grundvandsmodellering (Sonnenborg og Henriksen, 2005). Vurderet i forhold til RMS værdier bestemt for Århus området, vurderes RMS værdien at være acceptabel jf. kravet til detailmodellering. Tilbage er R2 værdien, som ikke opfylder kravværdien. Der er dog kun en målestation i oplandet, og det er primært simuleringen af maksimumsafstrømninger der afviger fra det målte. Derfor vurderes modellens evne til at simulere middel og minimumsafstrømning som god, med en pålidelig beskrivelse af sommervandføringen ved denne station specielt i valideringsperioden (2005-2009) som er vigtig i forhold til scenarieperioden 2006-2008.

En del af argumentationen vedr. modellens gyldighed er baseret på kvalitative kriterier vurderet ud fra 1) modellens beskrivelse af den geografiske fordeling i minimumsvandføringen sammenlignet med ældre medianminimumsskøn, 2) beskrivelsen af afsænkning i forhold til estimater for 2004 (Ambo, 2005), samt 3) rimeligt realistiske estimerede parametre fra den inverse optimering. Når man ser bort fra parameteren for smeltevandsløbet, som er klart urealistisk, så opfylder Egebjerg modellen de krav der er opstillet til modelperformance. Den urealistiske værdi for smeltevandsløbet tolkes som et strukturelt problem i den geologiske og konceptuelle model for denne lithologiske enhed, der betyder at smeltevandsløbet måske ikke er så sammenhængende, som det oprindeligt er antaget i den geologiske tolkning.

12. Scenarieopstillinger

I dette kapitel beskrives opstillingen af scenarier og der gives en beskrivelse af, hvordan modellen kan simulere scenarierne. Der foretages en vurdering af de indgående scenarier. Resultater af de valgte simuleringsscenarier beskrives i forhold til valgt basis-case (referencenkørsel). Vurdering af usikkerheder på simuleringresultater foretages. I figur 12.1 er vist den hidtidige udpegning af indvindingsoplande jf. trin-1 kortlægningen (Sandersen et al., 2009).



Figur 12.1 Indvindingsoplande som udpeget jf. trin-1 kortlægningen (Sandersen et al., ,2009)

12.1 Opstilling af scenarier

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

Tabel 12.1 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.

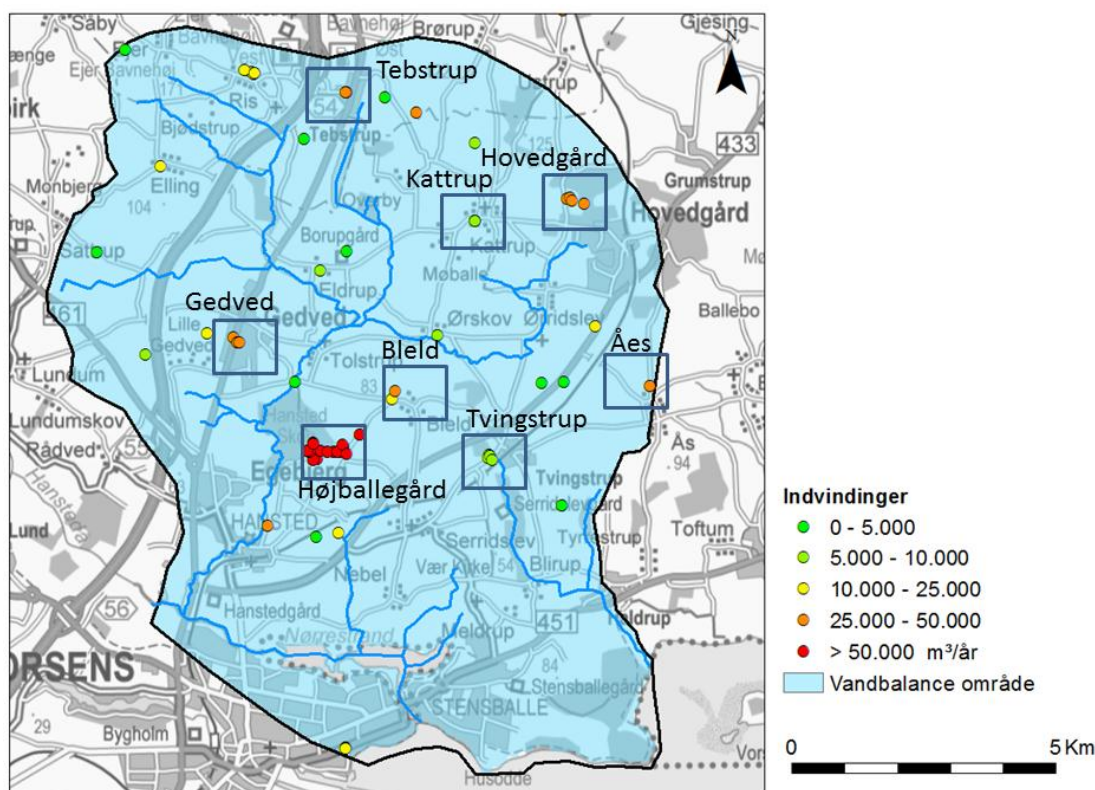
Vandværk	Nr.	Tilladelse m ³ /år	Aktuel indvinding m ³ /år 2006-2008
Hovedgård VV amba	72296	130000	120000 (3 %)
Gl. Katrupvej VV	82297	32400	27000 (1 %)
Højballegårdværket	72322	2800000	3000000 (87 %)
Tvingstrup VV	72376	40000	30000 (1 %)
Åes VV	72377	40000	29000 (1 %)
Blæld VV	72937	25000	22000 (1 %)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

Det fremgår af tabel 12.1 at aktuel indvinding for 2006-2008 er af samme størrelsesorden som tilladt indvinding. Aktuel indvinding anvendes derfor i beregningsscenarier. Højballegård udgør i alt 87 % af indvindingen fra de 8 vandværker og dominerer derfor mht. udnyttelse af grundvandsmagasinerne.

Fire mindre vandværker, som alle er beliggende lige udenfor modelområdet, har måttet frasorteres i modelleringen af grundvandsdannende oplande / indvindingsoplande, det gælder (se Fig. 12.1):

- 72298 Grumstrup VV (tilladelse: 15000 m³/år),
- 73905 Haldrup VV (tilladelse: 20000 m³/år),
- 80199 Gl. Hylke og Brørup VV (tilladelse: 35000 m³/år), samt
- 80205 Hylke St. Vandværk (tilladelse: 40000 m³/år).

For øvrige vandindvindinger udover de otte vist i tabel 12.1 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 Tabel 12.1 er for de udvalgte 8 vandværker vist indvundne vandmængder i modeloplandet for perioden 2006-2008. Indvindingen i oplandet var størst i starten af 1990'erne, hvorefter den faldt og var relativ lav fra 1995 og frem til 2003. Herefter er den igen steget i de seneste år. I figur 12.2 er vist hvordan aktuelle vandindvindinger i modelområdet er fordelt på indvindingsboringer (figuren viser indvindingsboringer til vandværker nævnt i tabel 12.1 samt for øvrige indvindinger). Indvindinger antages jævnt fordelt over kildepladsens indvindingsboringer. I tabel 12.2 er vist en oversigt over de ni scenarier der er simuleret.



Figur 12.2 Aktuel indvinding i modelområdet

Tabel 12.2 Scenarier

Scenarium	Navn	Klima	Indvindingsstruktur / mængde
I - 2a	Reference	Aktuel 1991-2010	Aktuel 2006-2008
II - 4a	Fremtidigt klima	A1B 2081-2100	Aktuel 2006-2008
III - 2b	Uden oppumpning	Aktuel 1991-2010	Ingen indvinding
IV - 2c	Stationær kørsel	Aktuel 1991-2010 (stationær recharge)	Aktuel 2006-2008
V - 4c	Fremtidigt klima / stationær kørsel *)	A1B 2081-2100	Aktuel 2006-2008
VI - 2ax	Følsomhed dræn (nedre konfidensgrænse dræn)	Aktuel 1991-2010	Aktuel 2006-2008
VII - 2ay	Følsomhed dræn (øvre konfidensgrænse græn)	Aktuel 1991-2010	Aktuel 2006-2008
VIII - 4ax	Følsomhed dræn fremtidigt klima (nedre konfidensgrænse dræn)	A1B 2081-2100	Aktuel 2006-2008
IX - 4ay	Følsomhed dræn fremtidigt klima (øvre konfidensgrænse dræn)	A1B 2081-2100	Aktuel 2006-2008

*) vurderes ikke brugbar da der er problemer med at opnå tilstrækkelig ensartet vandbalance for stationer og dynamisk model, se senere afsnit

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

Periodisk strømningssimulering er benyttet for de dynamiske partikelbanesimuleringer (2a/4a), hvor perioden 1991-2009 er "recyklet" (der ses dermed bort fra det første år 1990 for at undgå initial effekter). For stationære kørsler er benyttet "øjeblikke strømningssmønster" fra det seneste tidsskridt i simuleringen.

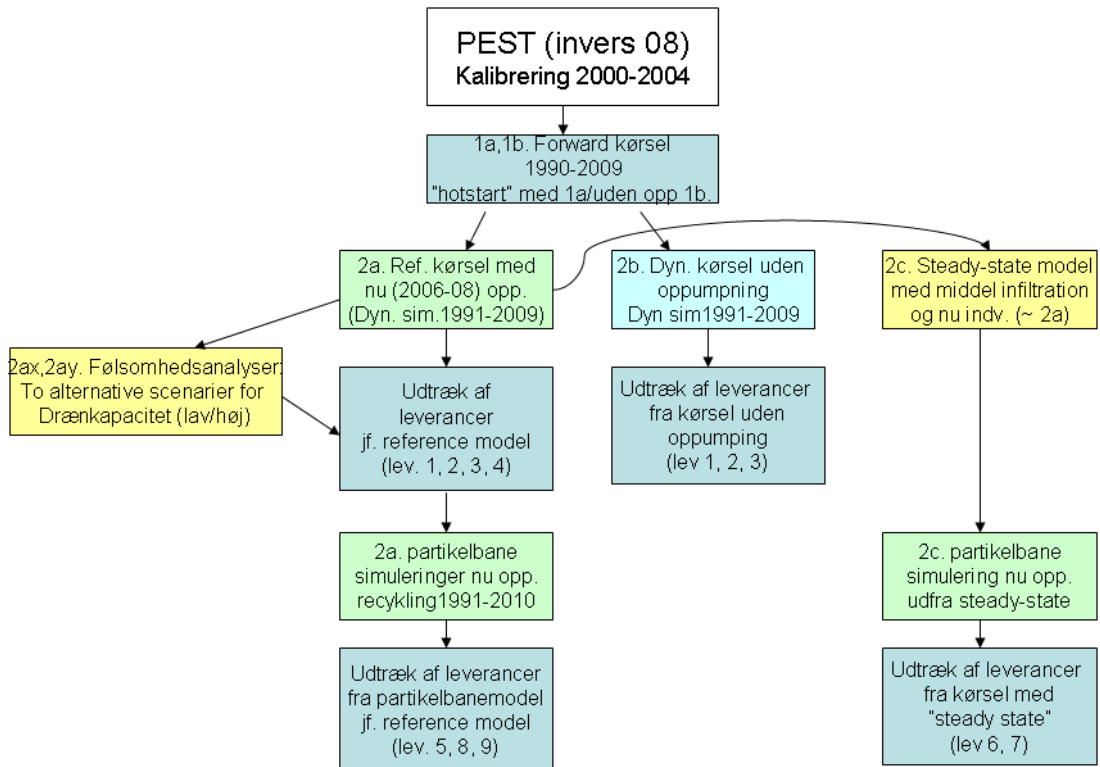
Transporttider i grundvandszonen er ofte meget store, nogle gange adskillige hundrede år eller mere. Der er gennemført PT simuleringer svarende til 500 år med anvendelse af en effektiv porøsitet på 0,1. Initialt er benyttet 100 partikler (tilfældigt fordelt indenfor cellerne på 100x100 m) i hver beregningscelle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

Disse valg begrundes med, at der herved opnås en rimelig beskrivelse af indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande, og brugbare afviklingstider / memory-krav på kørsler. Der er genereret følgende resultater angående grundvandsressourcer og – beskyttelse for nuværende klima med den kalibrerede Egebjergmodel (invers kalibrering 08):

1. Hydraulisk trykniveau i udvalgte modellag med og uden grundvandsindvinding (2a/2b)
2. Vandløbsafstrømning for udvalgte vandløbspunkter med og uden grundvandsindvinding (2a/2b)
3. Magasinspecifikke og oplandsspecifikke vandbalancer med og uden grundvandsindvinding (2a/2b)
4. Hydraulisk trykniveau i specielt terrænnære magasiner ved anvendelse af tre scenarier for drænkapaaciteten af lerede topjorde. Dette vil belyse risikoen for grundvandsoversvømmelse som funktion af, hvor effektivt oplandet er drænet (2a/2ax/2ay).
5. Bestemmelse af grundvandsdannende oplande (2a/2c)
6. Indvindingsoplande til udvalgte kildepladser (stationær model) (2c)
7. Transporttider til indvindingsboringer (stationær model) (2c)
8. Indvindingsoplande til udvalgte kildepladser (ikke-stationær model) (2a)
9. Transporttider til indvindingsboringer (ikke-stationær model) (2a)

Arbejdsgangen i processeringen fremgår af Fig. 12.3. 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 hotstart fra forward kørslen. Dvs. modellen har kørt i 2x20 år, og antages derfor at være faldet på plads i forhold til ændringerne i vandbalancen. Hver kørsel afsluttes med partikelbanesimulering, hvor strømningssmodellen recykles og køres i i alt 500 år, med henblik på at afgrænse ind-

vindingsoplande og grundvandsdannende oplande for en lang årrække. Der er kørt en kolonne med steady state input i nettonedbøren svarende til den dynamiske models input, blot med konstant nettonedbør i alle daglige tidsskridt.



Figur 12.3 Oversigt over simuleringskørsler / scenarier for nuværende klima

12.2 Fremtidigt klima

Følgende resultater genereres for fremtidigt klima (invers kalibrering 08):

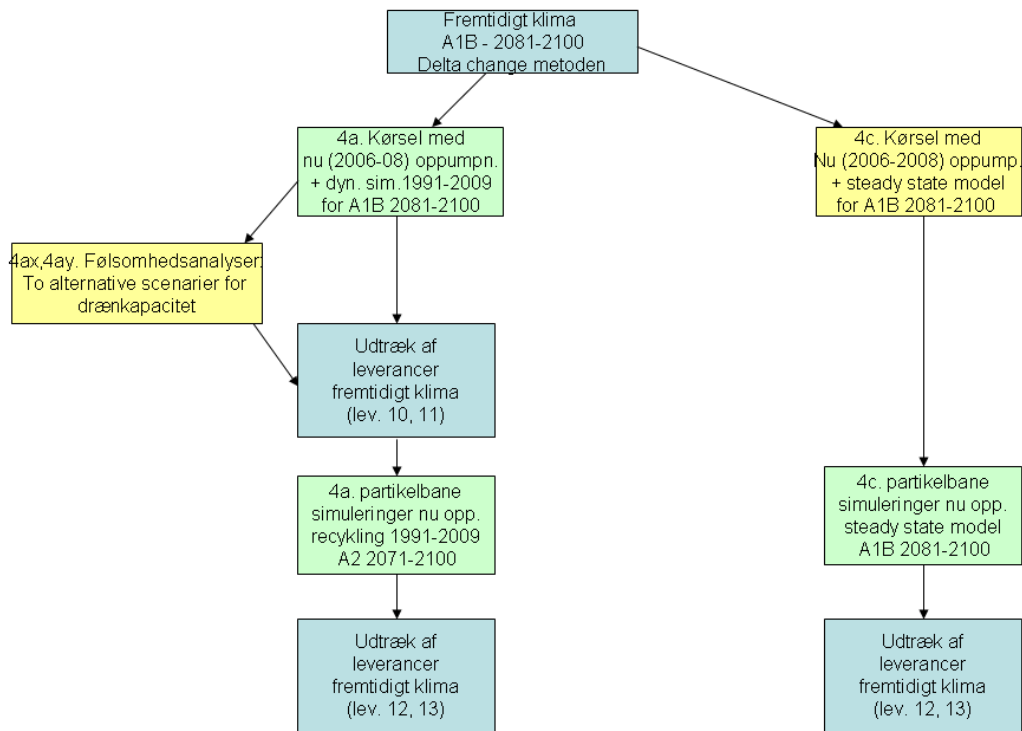
10. Hydrauliske trykniveau i specielt terrænnære magasiner ved anvendelse af tre scenarier for drænkapaaciteten af lerede topjorde. Dette vil belyse risikoen for grundvandsoversvømmelse i et fremtidigt klima som funktion af, hvor effektivt oplandet er drænet (4a/4ax/4ay).
11. Ændring i grundvandsstand som følge af klimaændringer (2a/4a)
12. Ændring i indvindingsoplande som følge af klimaændringer (stationær og ikke-stationær model) (2a/4a/2c/4c)
13. Ændring i transporttider til indvindingsboringer som følge af klimaændringer (stationær og ikke-stationær model) (2a/4a/2c/4c)

I punkt 12 og 13 er stationære kørsler udeladt, da resultater ikke vurderes brugbare til en ordentlig og meningsfyldt analyse, fordi der på trods af forsøg med skalering af vandbalancen fortsat er væsentlige forskelle for grundvandssystemet.

Klimakørslerne afvikles efter en skabelon hvor modellen køres med et fremtidigt klimainput jf. A1B scenariet og delta change metoden (for 2081-2100 ud fra 1991-2010), hvor nedbør,

fordampning og temperatur justeres ud fra månedlige korrektionsfaktorer i et fremtidigt klima.

Resultater af A2 scenariet til brug for CLIWAT projektet (Appendix A), men er kørt med lignende "delta change" antagelse (for 2071-2100 i forhold til ref. perioden 1961-1990).



Figur 12.4 Oversigt over simuleringskørsler / scenarier for fremtidigt klima

Ved gennemgang af scenarier er den dynamiske kørsel (2a) med aktuel indvinding og aktuelt klima benyttet som reference.

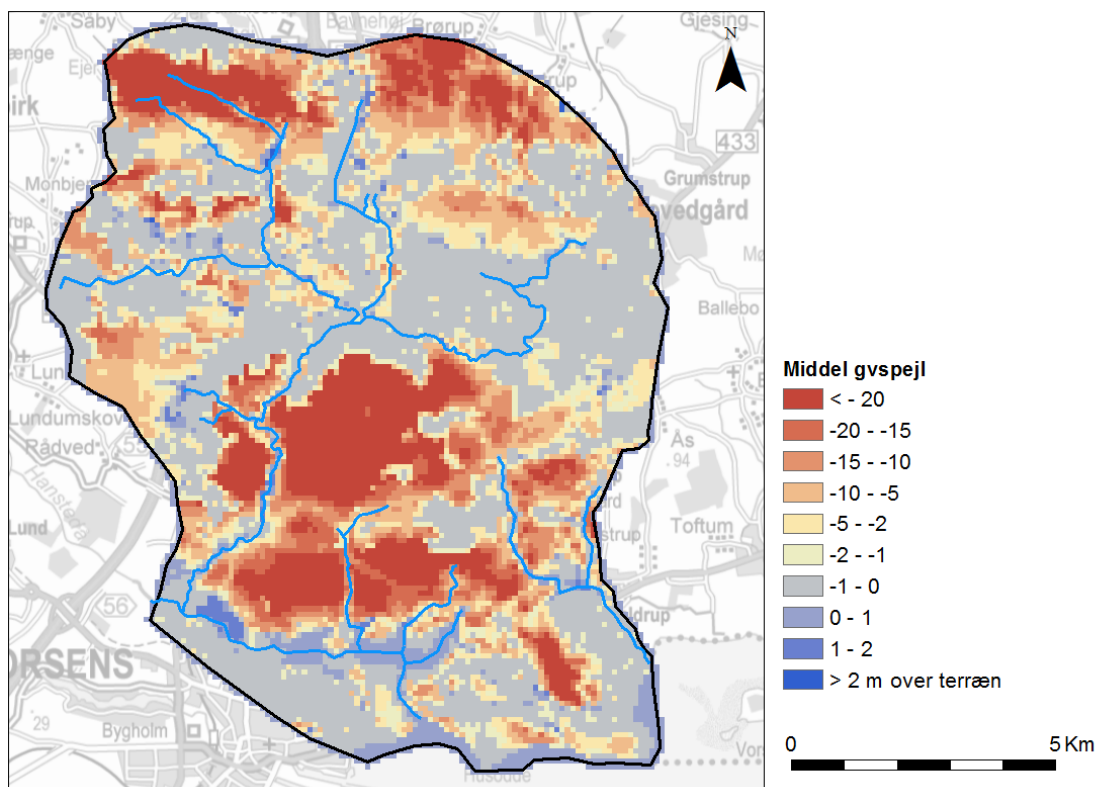
Der er kørt en særlig følsomhedsanalyse for fremtidigt klima med to alternative drænop-sætninger, hhv. laveste konfidensgrænse og højeste konfidensgrænse for dræntidskonstanten. Hermed illustreres betydning af dræning i et fremtidigt klima, som jo er en ubekendt faktor. Der afsluttes med partikelbanekørsler så forskelle i indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande kan analyseres.

13. Simuleringsresultater

I nærværende afsnit beskrives resultater og vurderinger, incl. usikkerhedsvurderinger, af modelberegningerne for de opstillede scenarier.

13.1 Ændringer i grundvandsstand som følge af vandindvinding og klima

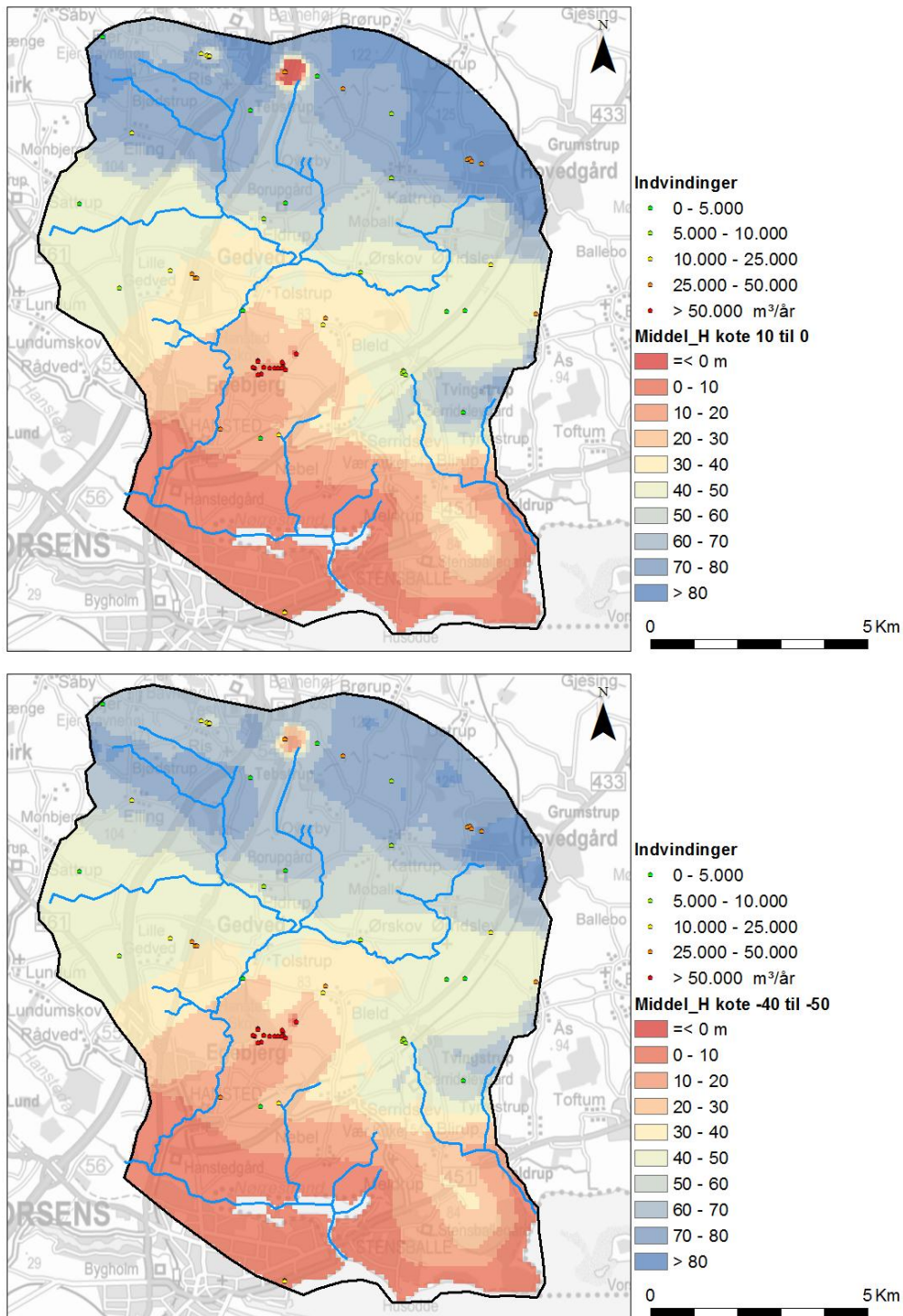
I Fig. 13.1 ses gennemsnitsdybden til det øverste aktive grundvandsspejl i modellen for perioden 1991-2009 for reference scenariet (2a). Lavtliggende områder omkring Hansted å og Nørrestrand har trykniveauer over terræn, ligesom at der lokalt i modelområdet er en del områder i denne kategori. I den nordlige del af modelområdet har en del områder stor dybde til grundvandsspejlet (dvs. mere end 20 m til grundvandsspejlet), det samme gælder området centralt i modelområdet bl.a. omkring Højballegårdværket, øst for Ll. Hansted å og Egebjerg. En stor del af modelområdet har grundvandsspejl mellem 0-1 meter under terræn. I Bilag 9 er vist resultater for max og min ændring.



Figur 13.1 Dybde til middel grundvandsspejl (reference 2A) 1991-2009

I figur 13.2 er vist middeltrykniveau (1991-2009) for hhv. beregningslag svarende til kote 10 -0 meter (mellemdyb) og kote -40 til -50 meter (dybt). Sænkningstragten fra den store indvinding ved Højballegårdværket fremgår af potentialebillederne jf. figur 13.2. Der optræder en lokal sænkningstragt omkring Tebstrup VV i den nordlige del af modelområdet, som fremtræder med et lavt potentiale i dette område. For visse af vandværkerne kan man ikke

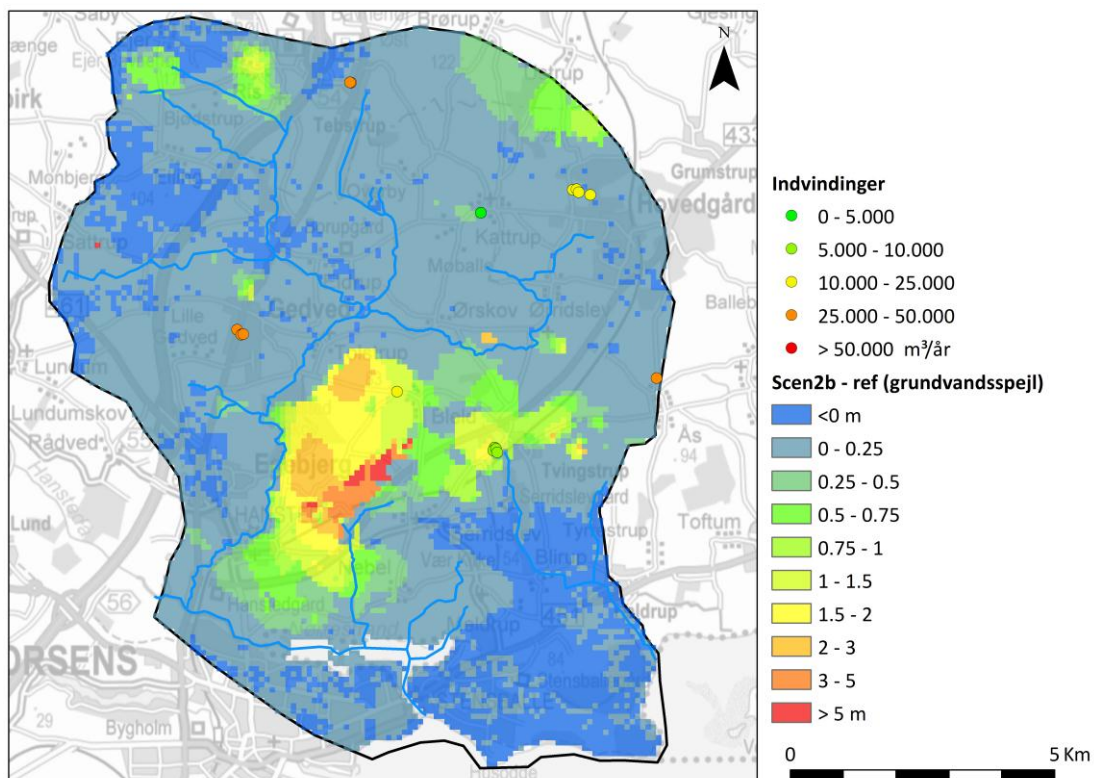
se nogen tydelig sænkningstragt ud fra figuren (det gælder fx Hovedgård, men her indvindes vandet typisk i dybden 20-40 m, og altså ikke i de på figuren præsenterede niveauer).



Figur 13.2 Simuleret trykniveau i to beregningslag hhv. 10-0 m (øverst) og -40 - -50 m (nederst). På figuren er desuden vist indvinding på boringsniveau.

I Fig. 13.3 er vist stigningen af grundvandspejlet i det øverste modellag, der fremkommer som forskellen på simuleret dybde til grundvandspejlet for en kørsel uden oppumpning (2B) i forhold til reference scenariet (2A) med aktuell indvinding. I store dele af området er der en meget begrænset stigning (det lyseblå område, 0- 0.25 m). Der er tydelig stigning lokalt i den nordvestlige (bl.a. omkring Riis vandværk) og i den nordøstlige del nordvest for Hovedgård, samt omkring Tvingstrup i den østlige del og i et stort område omkring Højballegårdværket og Bleid i den centrale del (stigninger på 1-2 meter).

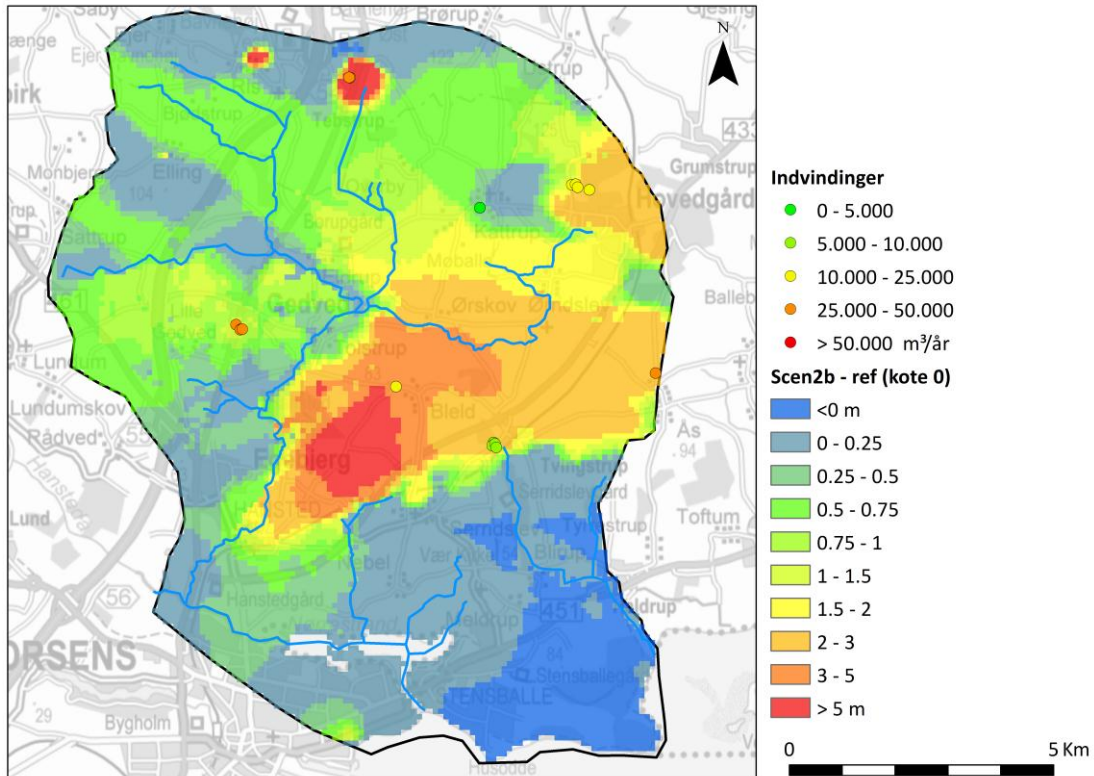
Påvirkningen af det øverste vandspejl ved indvinding er som vist i Fig. 13.3 relativt kompleks og ikke lokaliseret præcist centreret omkring kildepladserne. Omkring Højballegårdværket er stigningen størst, visse steder 3 - 5 meter, og lokalt mere end 5 meter sydøst for kildepladsen. Omkring Tvingstrup er der lokalt stigninger på op til 2 meter tæt på kildepladsen og i lokale delområder indenfor 2 km fra kildepladsen for nul indvinding i forhold til referencen.



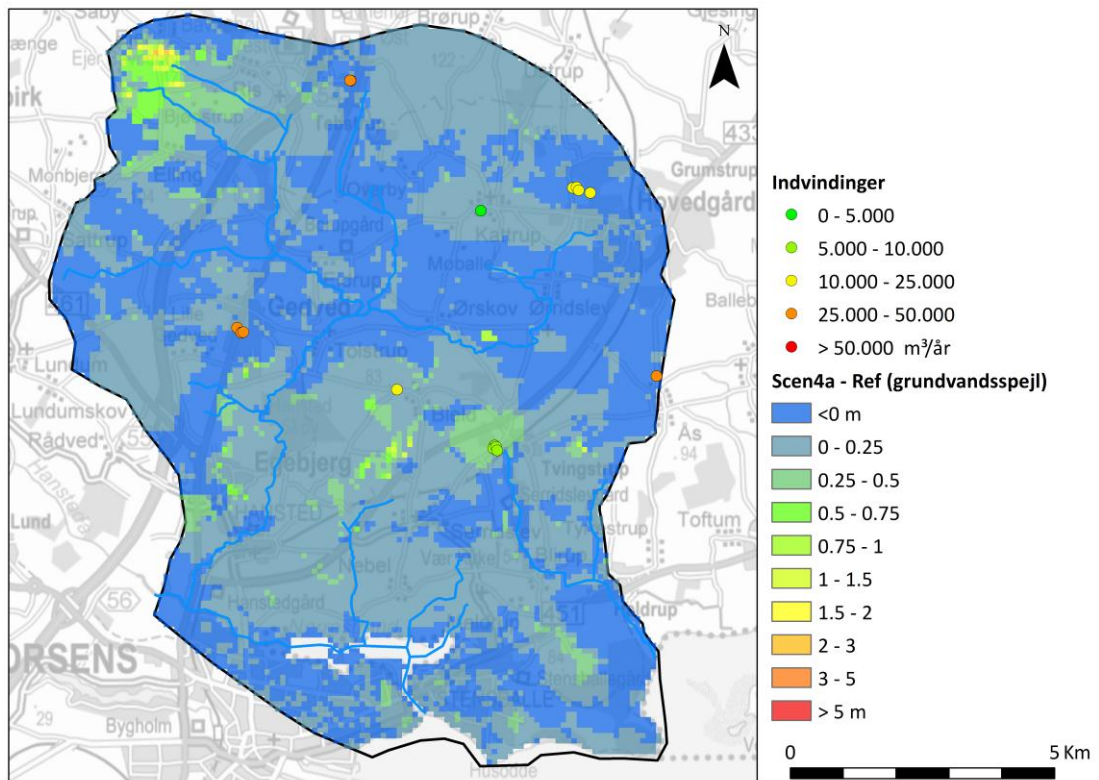
Figur 13.3 Simuleret ændring i øverste grundvandspejl for kørsel uden oppumpning (scenarie 2B) i forhold til referencekørsel (scenarie 2A). Positive værdier: stigende VSP.

Stigningen i de dybere magasiner er vist i Fig. 13.4 for et beregningslag / niveau der ligger omkring kote 0. I denne dybde er stigningen tydeligst omkring Højballegård værket med maksimale stigninger centralt i kildepladsområdet på > 5 meter. Omkring Tebstrup og Riis er stigningen lokalt ligeledes > 5 meter. For øvrige vandværker ses for Bleid stigninger på 3-5 meter, Hovedgård 2-3 meter, Tvingstrup 2-3 meter og Gedved 1-1.5 meter lokalt i denne dybde. Ændringer i det øverste grundvandspejl / trykniveau for et fremtidigt klima er vist i Fig. 13.5.

Af figuren ses det at grundvandspejlet i store dele af modelområdet og specielt i den nordlige del og omkring Højballegårdværket i et fremtidigt klima (scenarie 4A, A1B klimascenariet) vil stige med typisk 0 – 0,5 meter, og meget lokalt med større stigninger på op til et par meter. I en stor del af modelområdet vil grundvandspejlet være uændret eller svagt faldende, typisk i de lavtliggende områder, hvor den forøgede fordampning vil give et lidt lavere gennemsnitsniveau.



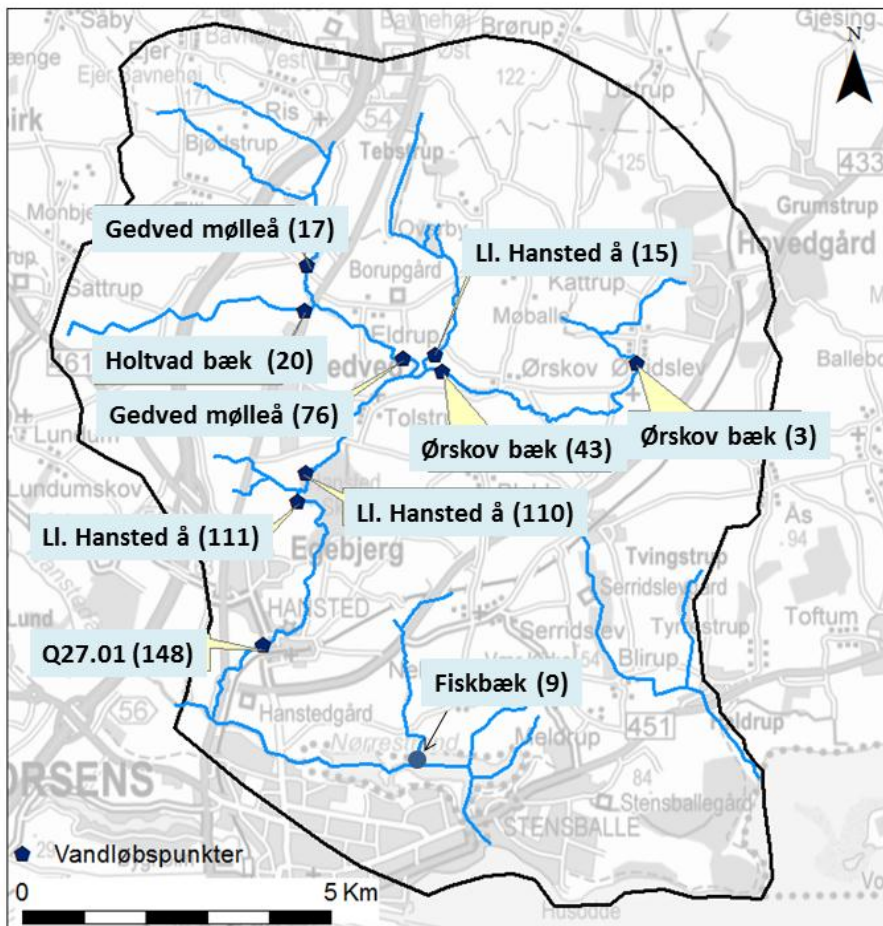
Figur 13.4 Simuleret ændring i trykniveau uden oppumpning (scenarie 2B) i forhold til referencekørsel (scenarie 2A) for niveau svarende til kote 0. (som figur 7.4 men med ændret skala).



Figur 13.5 Ændret øvre grundvandsspejl i et fremtidigt klima jf. A1B (scenarie 4A) i forhold til referencekørslen (scenarie 2A). Positive værdier: stigende grundvandsspejl.

13.2 Ændret afstrømning som følge af vandindvinding

I Figur 13.6 er vist de vandløbspunkter hvor der udtrækkes resultater af simuleringer for vandføringen (i parentes er angivet estimeret medianminimum i l/s).



Fraktil	Q	LI Han-	LI Han-	LI Han-	Gedved	Gedved	Ørskov	Ørskov	Holtvad	Fiske-
Værdi	27.01	sted å	sted å	sted å	Mølleå	Mølleå	bæk	bæk	bæk	bæk
99%	2655	2342	2463	471	266	776	452	898	402	63
95%	1835	1603	1687	320	183	523	328	623	265	44
90%	1422	1213	1285	247	149	408	248	462	201	32
50%	440	310	342	76	72	142	41	70	54	5
10%	242	157	172	42	48	82	10	20	27	2
5%	222	142	156	39	45	75	8	17	24	2
1%	193	123	135	33	40	66	7	14	20	2
~min	207	132	145	36	42	70	7	15	22	2
median										
min	148	110	111	15	17	76	3	43	20	9
middel	668	530	568	116	87	202	90	169	90	12

Figur 13.6 Simulerede fraktilværdier for vandføringen for referencekørslen (scenarie 2A) 1991-2009. Der simuleres 20-40 % mere vand end median min for L. Hansted ås hovedløb Q27.01 (median min = 148 l/s). Der simuleres for lidt i Ørskov bæk (sim= 15 l/s, median min = ca. 43 l/s). Holtvad bæk, Gedved Mølleå og øvre del af Ørskov bæk simulerer et niveau svarende til synkronmålingsbestemte medianminima. Indvindinger er dog jf. scenarie 2A og ikke de faktiske indvindinger, men det illustrerer alt i alt et rimeligt niveau. Som karakteristiske afstrømninger er for minimumsvandføring valgt 'min' ~ middel af 1 og 5 % fraktilen der er tæt på medianmin. Ved 27.01.

Vurderingen af ændringer i afstrømningen som følge af vandindvinding er foretaget ved at

sammenligne udtræk af fraktilværdier for simuleret vandføring med henholdsvis en kørsel uden oppumpning, samt en kørsel med aktuelle oppumpninger for 2006-2008 (vist i Fig. 13.6). Der er benyttet perioden 1991-2009 til analysen med daglig nedbør, fordampning og temperatur for denne periode.

Tabel 13.1 Ændringer i karakteristiske afstrømninger i forhold til referencekørslen 2A (i %) samt simuleret middel vandføring ved scenarie kørsler

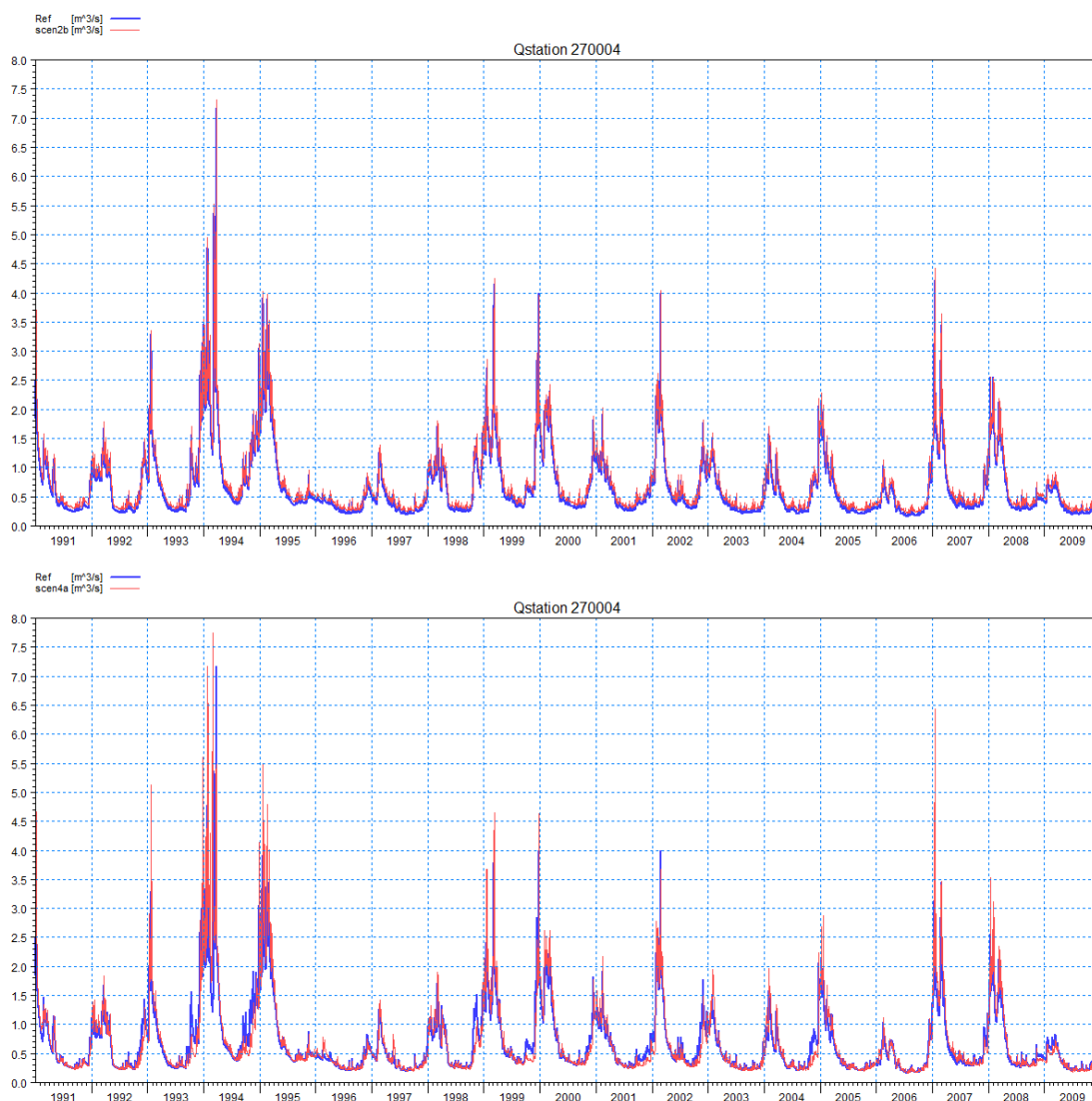
SCENARIE	Q 27.01 148	Lille Han- sted å 110	Lille Han- sted å 111	Lille Han- sted å 15	Gedved Mølleå 17	Ged- ved Mølleå 76	Ørskov bæk 3	Ørskov bæk 43	Holtvad bæk 20	Fiske- bæk 9
Ændret Mini- mum %										
2B Nul indvin- ding	+ 29 %	+ 6 %	+ 6 %	+ 6 %	+ 5 %	+ 3 %	0	+ 20 %	0	0
4A Æn- dret klima A1B	-1 %	-1 %	- 1 %	-1 %	-1 %	- 2 %	-2 %	- 2 %	-4 %	0
4AX/AY Ændret klima A1B										
Lav 4AY	+3 %	+3 %	+5 %	- 3 %	+7 %	+3 %	+14 %	+7 %	0	+100%
Høj 4AX	+1 %	+1 %	-3 %	-20 %	-7 %	-11 %	+71 %	+47 %	-27 %	-50 %
Middel l/s										
2A Ref	668	530	568	116	87	202	90	169	90	12
2B Nul indvin- ding	739 +11 %	543 + 2 %	582 + 2 %	119 +3 %	89 +2 %	204 +1 %	92 +2 %	175 +4 %	90 0	12 0
4A Æn- dret klima A1B	684 +2 %	542 +2 %	581 +2 %	118 +2 %	89 +2 %	206 +2 %	92 +2 %	174 +3 %	91 +1 %	12 0
4AX/AY Ændret klima A1B										
Lav 4AY	700	557	600	123	91	211	96	178	95	16
Høj 4AX	633	496	526	100	85	184	79	161	78	6
2C Statio- nær	657	514	557	111	97	212	85	150	91	12

Vurderingen af ændringer i vandbalancen er i det følgende vurderet for dels en karakteristisk max-afstrømningsværdi svarende til 95 % fraktilen, dels en karakteristisk middelværdi svarende til 50 % fraktilen, og dels en karakteristisk minimumsværdi, svarende til midlen af

1 % og 5 % fraktilen der er i rimelig god overensstemmelse med niveauet for medianminimum. I tabel 13.1 er resultater for stationerne vist i form af ændringer (i %) i forhold til reference kørsel 2A (Fig. 13.6) for samtlige scenarie kørsler.

Det fremgår af Tabel 13.1 at vandløbspåvirkningen på flere strækninger (vandløbspunkter) er markant for den karakteristiske minimumsvandføring. En tænkt neddrøsling med nul indvinding vil give en forøgelse i minimumsvandføringen på + 29 % for st. 27.01 LI. Hansted å, og + 20 % for nedre station i Ørskov bæk. For øvrige stationer ses en mere begrænset forøgelse af minimumsafstrømningen på mellem 0 og 6 %.

I Fig. 13.7 er vist simuleret ændring i daglig vandføring ved nulindvinding (senarie 2B) sammenlignet med ref. scenariet (2A), samt for et fremtidigt klima (A1B/4A) sammenlignet med ref. scenariet (2A).



Figur 13.7 Øverst: Simuleret daglig vandføring for referencekørsel (scenarie 2A – blå) og kørsel uden oppumpning (scenarie 2b) m³/s for station 270004. Nederst: fremtidigt klima (4A/A1B scenariet) sammenlignet med ref. kørsel (2A) ved station 27.01 LI. Hansted å (75 km²)

Ændringen i max. afstrømningen (udtrykt ved 99 %, 95 % og 90 % fraktilen) ved en nul indvinding er en stigning i afstrømningen på hhv. 4 %, 5 % og 6 %. Ændringen i minimumsafstrømningen (udtrykt ved 10 %, 5 % og 1 % fraktilen) ved nul indvinding er tilsvarende en stigning i afstrømningen på hhv. 25 %, 27 % og 31 %.

Den tilsvarende ændring i max afstrømningen for et ændret klima jf. A1B scenariet er noget mere markante. Eksempelvis stiger max. afstrømningen i Ll. Hansted å ved vandføringsstation 27.01 for 99 %, 95 % og 90 % fraktilen med hhv. 22 %, 9 % og 7 %. Ændret klima giver kun begrænsede reduktioner i minimumsvandføringen udtrykt ved 10 %, 5 % og 1 % fraktilen, hhv. -2 %, -2 % og 0 % i forhold til ref. scenariet.

Klimæændringer vurderet ud fra A1B scenariet giver ved samtlige lokaliteter en lille reduktion i minimumsafstrømningen i forhold til reference scenariet 2A på mellem 0 og 4 %. Resultaterne med hhv. lav og høj dræntidskonstant svarende til konfidens-intervallet for sensitivitetsskørslerne for et fremtidigt klima giver ret markante forskelle i minimumsafstrømningen. Dog viser resultaterne en forøgelse af minimumsvandføringen ved de af vandindvinding kraftigst påvirkede stationer hhv. 27.01 og nedre station i Ørbæk bæk for begge sensitivitetsskørslere.

Forøgelsen i middelvandføring ved nul indvinding (2B) er væsentligt mindre, end forøgelsen i minimumsvandføringen for 27.01 og nedre station i Ørbæk (hhv. 11 % mod 29 %, og 4 % ved middel mod 20 % ved minimum).

Den stationære kørsel afviger med max. ca. 10 % i forhold til referencekørslen med hensyn til middelvandføringen ved lokaliteterne. Dette på trods af at der er foretaget en skalering så det er sikret at hhv. dynamisk og stationær model har samme nettonedbør.

Middelvandføringen forøges med i størrelsesordenen et par procent ved et ændret klima (A1B). Der er stor følsomhed i forhold til de to sensitivitetsskørslere med høj og lav dræntidskonstant (A4X og A4Y). Resultater af sensitivitetsskørslere er nærmere beskrevet i afsnit 13.6.

13.3 Ændringer i vandbalance og grundvandsdannelse

I tabel 13.2 er vist grundvandsdannelsen for hele modelområdet og for oplandet til Ll. Hansted å (75 km^2 /station 27.01) for beregningslag 2-30 for perioden 1991-2009. I tabellen er samtidig vist oppumpningen for hele oplandet og til station 27.01 som den er fordelt på de enkelte beregningslag. Til højre i tabellen er oppumpningen opsummeret, sådan at der for hvert lag er beregnet oppumpningen for samtlige dybere beliggende lag incl. det aktuelle lag, samt vurderet hvor stor en %-del den således "dybde aggregerede" oppumpning udgør i forhold til grundvandsdannelsen for beregningslaget ved aktuel indvinding. Sidstnævnte beregning er kun opstillet for oplandet til station 27.01 Ll. Hansted å. Yderst til højre er tilsvarende tal vist for grundvandsdannelse for nul indvinding (jf. scenarie 2B).

Tabel 13.2 Vandbalance for grundvandsdel (lag 2-30) for hele modeloplandet og for oplandet til station 27.01 for referencekørsel (1991-2009)

Vandbalance for grundvandsmodel lag 2-30	Grundvandsdannelse	Grundvandsdannelse	Oppumpning pr. beregningslag	Oppumpning pr. beregningslag	Summeret oppumpning fra og under beregningslaget (% indvinding af grundvandsdannelse)	Grundvandsdannelse for NUL oppumpning (2B)	Indv. % I forhold til grundvandsdannelse ved NUL
	Hele model	Opland 27.01	Hele model	Opland 27.01	Opland 27.01	Opland 27.01	27.01
	mm/år	mm/år	mm/år	mm/år	mm/år (% indv.)	mm/år	% indv.
2	98	85	0,9	1,0	39,5 (46 %)	72	55
3	123	113	2,2	3,6	38,5 (34 %)	96	40
4	126	116	2,9	4,8	34,9 (30 %)	97	36
5	113	105	2,6	4,1	30,1 (30 %)	88	35
6	98	97	2,5	3,7	26,0 (27 %)	82	32
7	86	93	2,3	3,4	22,3 (24 %)	78	29
8	77	87	2,0	3,1	18,9 (22 %)	73	26
9	69	80	1,9	3,1	15,8 (20 %)	67	24
10	61	71	1,1	1,8	12,7 (18 %)	61	21
11	55	65	0,7	1,1	10,9 (17 %)	56	19
12	50	60	0,6	1,0	9,8 (16 %)	52	19
13	44	54	0,4	0,6	8,8 (16 %)	47	19
14	40	50	0,3	0,5	8,2 (16 %)	43	19
15	36	46	1,2	2,0	7,7 (17 %)	40	19
16	32	41	1,7	2,5	5,7 (14 %)	36	16
17	27	36	1,2	1,7	3,2 (9 %)	32	10
18	22	31	0,5	0,5	1,5 (5 %)	28	5
19	18	24	0,5	0,5	1,0 (4 %)	23	4
20	14	19	0,5	0,5	0,5 (3 %)	19	3
21	10	14	0,2	0,0	0,0	14	0
22	8	11	0,0	0	0,0	11	0
23	6	8	0,0	0	0,0	9	0
24	4	6	0,0	0	0,0	5	0
25	2	4	0,0	0	0,0	3	0
26	1	3	0,0	0	0,0	2	0
27	1	3	0,0	0	0,0	2	0
28	1	3	0,0	0	0,0	2	0
29	1	2	0,0	0	0,0	1	0
30	0	2	0,0	0	0,0	1	0

Beregningen viser at indvindings - % er størst for beregningslag 2 hvor den udgør 46 % af den aktuelle grundvandsdannelse til laget (og ikke mindre end 55 % af grundvandsdannelsen ved nul oppumpning jf. scenarie 2B). For beregningslag 2 er vurderet en lidt mindre 'vertikal nedsivning' end for beregningslag 3, som må skyldes horisontal strømning der bevirker at vi ikke får en successiv aftagende grundvandsdannelse i de allerøverste lag. Fra beregningslag 3-5 er udnyttelsesgraden / indvindings - % mere konstant omkring 30 % af grundvandsdannelsen. Herefter falder den ned til omkring 18 % af grundvandsdannelsen for beregningslag 10.

Det er ikke umiddelbart helt enkelt at foretage nogen vurdering af bæredygtig indvindings-%, men tabel 13.2 giver dog et billede af hvordan indvinding og grundvandsdannelse er fordelt for oplandet til 27.01. Bæredygtig indvinding vurderes primært at være et spørgsmål om afsænkning og vandkvalitet (fx arsen) samt evt. påvirkning af vådområder og vandløbspåvirkning altså et mere dynamisk problem. Indvindings-% giver næppe relevante bud på bæredygtig ressource i et område som Egebjerg.

I Fig. 13.8 er vist simuleret infiltration til beregningslag 1 for referencekørslen for 1991-2009.

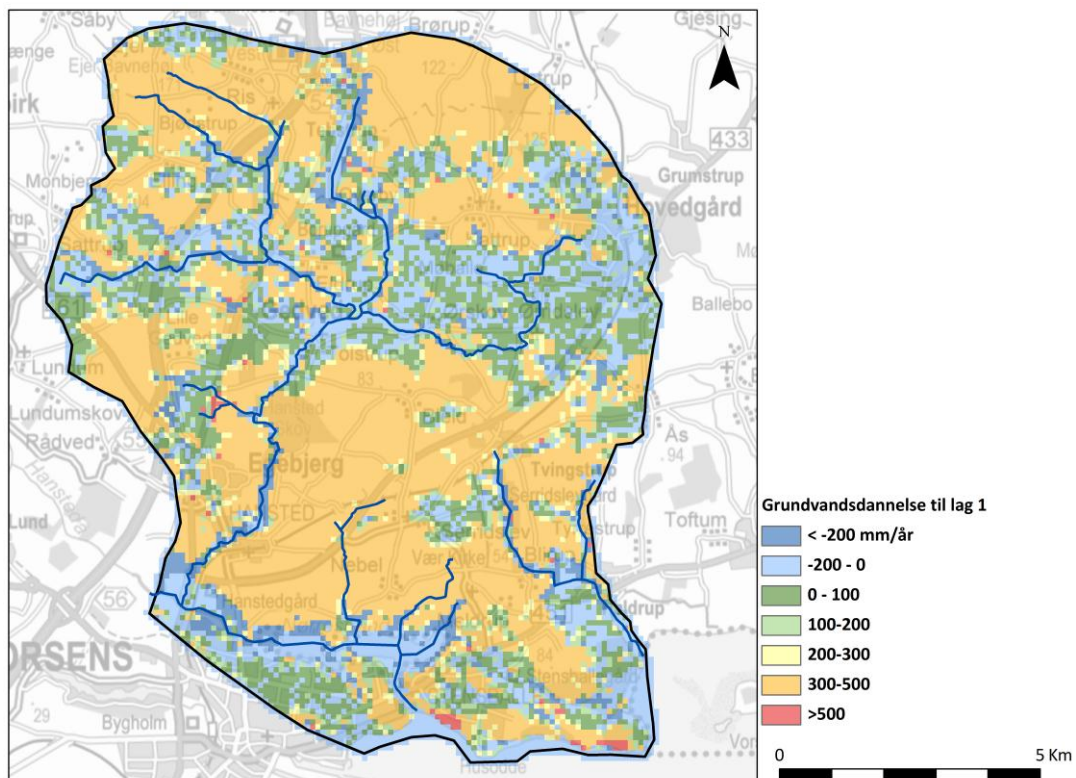


Fig. 13.8 Simuleret infiltration til beregningslag 1 (1991-2009) for modelområdet.

Det bemærkes at infiltrationen til beregningslag 1 i Fig. 13.8 i gennemsnit udgør 321 mm/år for hele modeloplandet. Der er en kompleks interaktion med en række vandbalance størrelser bl.a. udveksling i forhold til overfladisk afstrømning, hvor bidraget fra grundvandet til overfladisk afstrømning udgør 97 mm/år, mens der er et bidrag fra overfladisk afstrømning til grundvand på 26 mm/år for perioden 1991-2009 i gennemsnit. Dertil kommer et bidrag fra grundvand til fordampning på 21 mm/år alt sammen fra lag 1. Der sker en begrænset udstrømning til modelranden på ca. 5 mm/år fra lag 1, en ændret magasinering i lag 1 på -7 mm/år, og en betydelig udstrømning fra lag 1 til dræn, hhv. 39 mm/år til randen fra områder tæt på modelranden nord og øst for LI. Hansted å oplandet, samt øvrige randområder udenfor de vandløbsoplande der indgår i setupet. Udstrømningen fra dræn indenfor opland-

de til vandløb udgør i alt 152 mm/år. Endelig er der en udstrømning fra grundvand til vandløb på 8 mm/år.

I Fig. 13.9 er vist grundvandsdannelse fra beregningslag 1 til beregningslag 2.

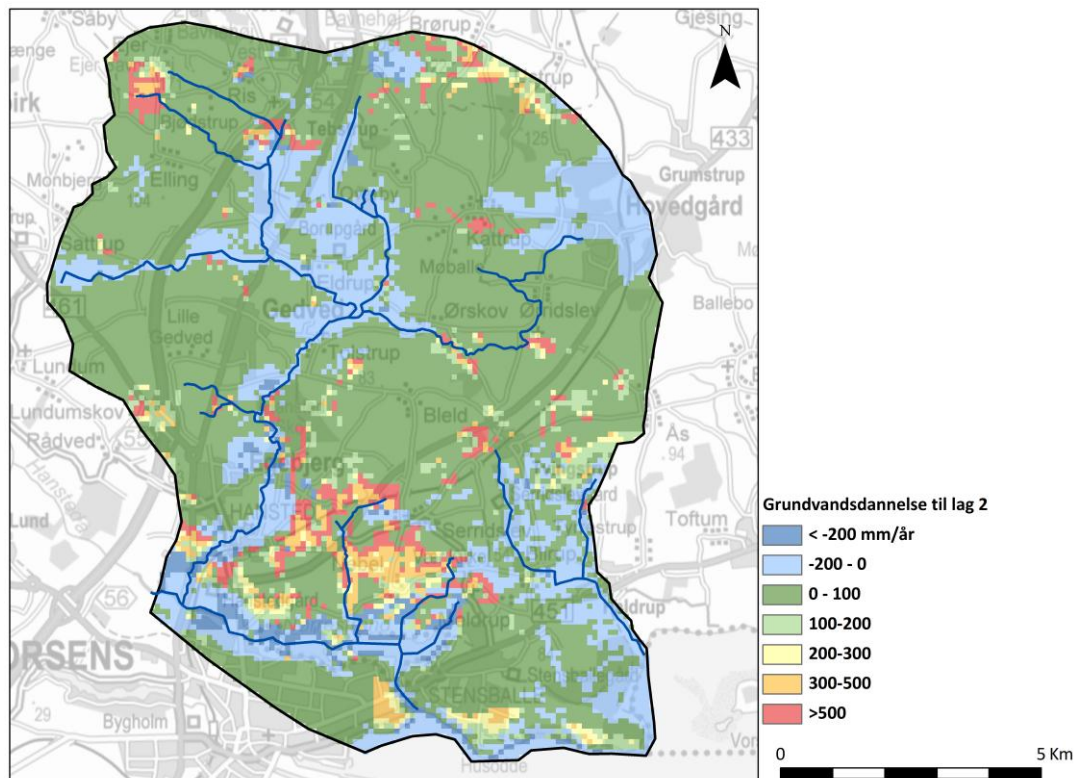


Fig. 13.9 Simuleret grundvandsdannelse til beregningslag 2 (1991-2009) for modelområdet.

Grundvandsdannelsen til beregningslag 2 (Fig. 13.9) udtrykker det vand der nedsiver fra beregningslag 1 mod dybere lag. Mens infiltration til beregningslag 1 var relativt jævnt fordelt, når man ser bort fra udstrømningsområder langs vandløb, så er nedsivningen til beregningslag 2 væsentlig mere geografisk varierende. Gennemsnitsværdien udgør som nævnt i tabel 13.1 98 mm/år for perioden 1991-2009. En stor del af modelområdet har en værdi i intervallet 0-100 mm/år som formentlig ligger tæt på de 100 mm/år. Der er dog lokalt områder med meget stor grundvandsdannelse på over 500 mm/år, og det er i disse områder at den store grundvandsdannelse til de primære grundvandsmagasiner i området finder sted. Den opadrettede strømning mod vandløb kommer også klart frem på Fig. 13.9. Grundvandsdannelsen til beregningslag 2 vurderes at være et relevant indgang til vurdering af områder med størst grundvandsdannelse for oplandet som helhed.

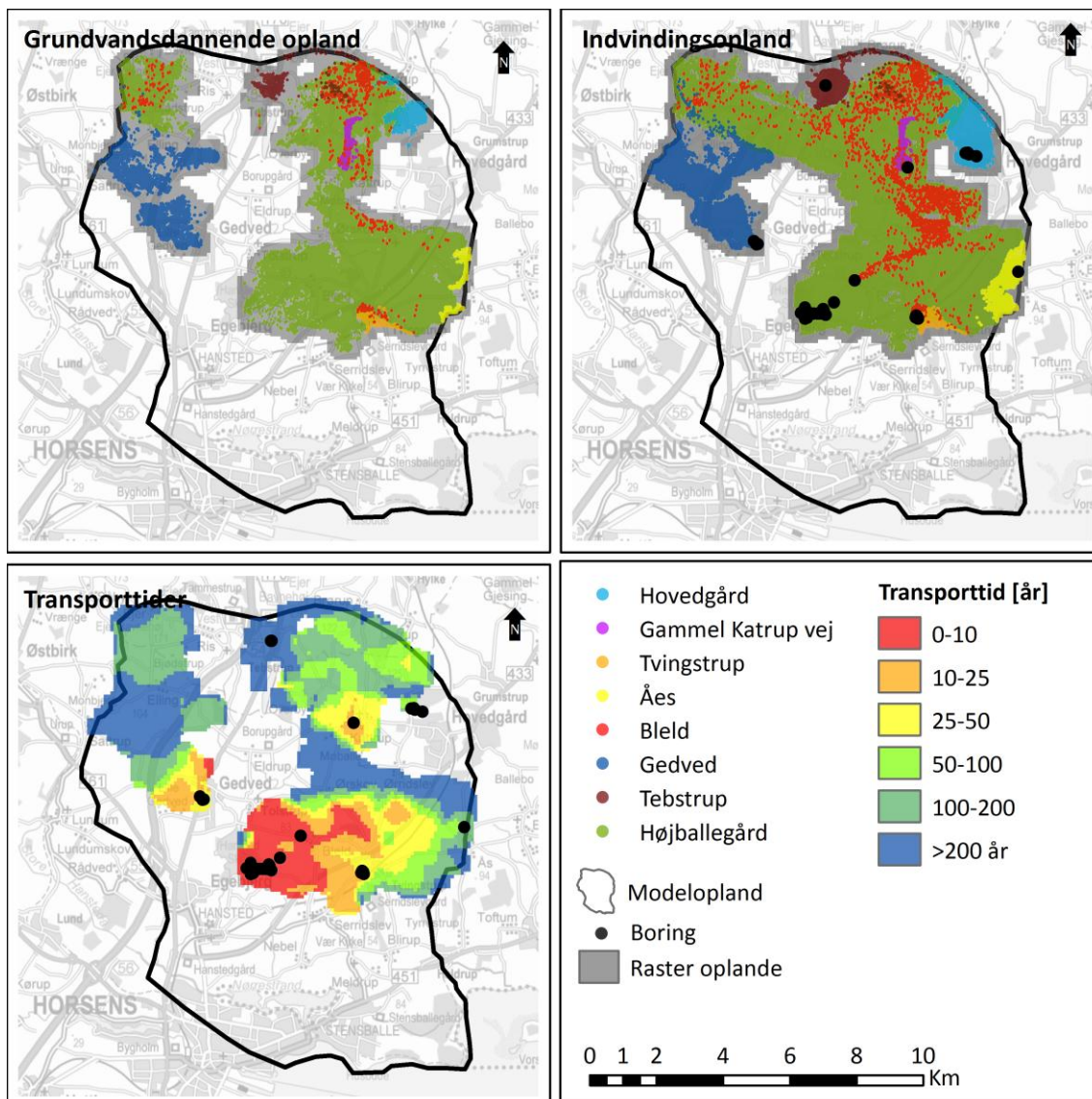
13.4 Oplandsberegninger og transporttider

Der er gennemført oplandsberegninger ved hjælp af partikelbanesimuleringer med 100 partikler i lag 1 og 4 partikler i lag 2-30. Herved kan det undersøges fra hvilke kasser partik-

lerne der ankommer til boringerne i en af de 8 undersøgte kildepladser stammer, ligesom at alderen på hver enkelt partikels samlede transporttid kan vurderes.

I Fig. 13.10 er vist resultatet af partikelbanesimuleringen for hele oplandet ud reference kørsel 2A. Figuren illustrerer metodikken. På den første tema figur er vist det samlede vurderede grundvandsdannende opland til de 8 vandværker (der vil efterfølgende blive zoomet ind på de enkelte vandværker i efterfølgende Fig. 13.11-13.15) samt de partikler der ligger til grund for den gridbaserede afgrænsning. Partiklerne er vist med en farve der repræsenterer hvert enkelt af de 8 vandværker. Ved afgrænsningen er der arbejdet med et fast usikkerhedsbånd på ca. 200-300 m fra hver enkelt partikel, så kasser i denne afstand inkluderes som end del af det grundvandsdannende opland, markeret som rasteropland på figuren med en gråtone.

Næste tema er en figur der viser indvindingsoplandet. På denne figur er det partikler fra samtlige af de 30 model lag der ankommer til en af de 8 vandværker der indgår i afgrænsningen. På figuren er placering af de enkelte indvindingsboringer til de otte vandværker i området der indgå i analysen. Indvindingsoplandet er herefter afgrænset med tilsvarende usikkerhedsbånd på ca. 200-300 m. Den sidste figur viser transporttider fra grundvandsdannelse (fra lag 1) til ankomst til kildepladser. Transporttiden er vist med intervaller på 0-10, 10-25, 25-50, 50-100, 100-200 og >200 år.



Figur 13.10 Illustration af vurdering af grundvandsdannende oplønde, indvindingsoplønde og transporttider for modelområdet som helhed for referencekørsel 2A samt illustration af simulerede partikler.

Herefter er der foretaget en detaljeret vurdering for 5 delområder ved at zoome ind.

I figur 13.11-13.15 er vist simulerede oplønde zoomet ind på kildepladser:

1. Højballegårdværket (Fig. 13.11)
2. Gedved VV i det vestlige område (Fig. 13.12)
3. Tebstrup, Kattrup og Hovedgård VV i det nordlige område (Fig. 13.13)
4. Bleld VV indhyldet i Højballegård området (Fig. 13.14)
5. Tvingstrup og Åes VV, i det sydøstlige område (Fig. 13.15)

I den detaljerede vurdering afgrænses igen et rasteropland inkl. usikkerhedszonen på godt 200 m udenfor kassen hvor der er fundet partikel-startpunkter fra beregningslag 1. På figuren er det relative antal partikler der starter i hver kasse og som er fundet ved vandværket omsat til en "procent af infiltrationen", vist med en skala på 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 og 80-100 %. For mange områder er det mindre end 1/5 af de 100 partikler der opsamles ved vandværket, og her får oplandet farvesignaturen "blå" dvs. blot 0 - 20 % infiltrerer dermed til vandværksboringerne.

På figurerne af oplande er desuden vist NST oplande baseret på indvindingsoplande fra Regionplan 2005, se Sandersen et al. (2009). Det giver en god orienteringsmulighed. Herved kan man ud fra temaet der viser de modellerede indvindingsoplande fx sammenligne med NST oplande (jf. Regionplan 2005 oplande). Der er i sagens natur store forskelle, da NST oplande bygger på relativt simple metoder, og efterfølgende skal opdateres med den nye viden fra nærværende modellering. På temaet over indvindingsoplande er samtidig vist betydningen af et ændret klimainput jf. A1B scenariet (2081-2100) i forhold til (1991-2010). Her er fællesoplandet for referencekørslen (scenarie 2A) og A1B (Scenarie 4A) vist med en vissengrøn farve (i legende markeret som Reference & A1B). Det vil sige at både nutidsklima og et fremtidigt klima jf. A1B er enige om at det "vissengrønne" område er en del af indvindingsoplandet, det vil sige, der er både blå (A1B) 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 i et fremtidigt klima. Omvendt betyder blå grids, at disse ligger udenfor indvindingsoplandet i det nuværende klima, men indenfor indvindingsoplandet i et fremtidigt klima jf. A1B.

Der er generelt meget små forskelle så klimaændringer jf. A1B scenariet som har en svagere CO₂ udvikling end A2 scenariet giver for de fleste oplande ret ubetydelige ændringer.

Endelig er på det sidste tema vist transporttider vurderet ud modellen (der er benyttet en effektiv porøsitet på 0,1). Det fremgår af Fig. 13.11 at der for et større område tæt på indvindingsboringerne er transporttider på blot 0-10 år. Det fremgår ligeledes, at der fra områder i relativ stor afstand (> 4 km mod nordøst for kildepladsen), er simuleret transporttider til kildepladsen på 10-25 år, tilmed fra et område hvor op til 80-100 % af grundvandsdannelsen infiltrerer til det dybere grundvand. Dette område er derfor særligt sårbart og vigtigt at beskytte. En stor del af de vurderede grundvandsdannende oplande ses at ligge udenfor det kendt Regionplan 2005 indvindingsopland.

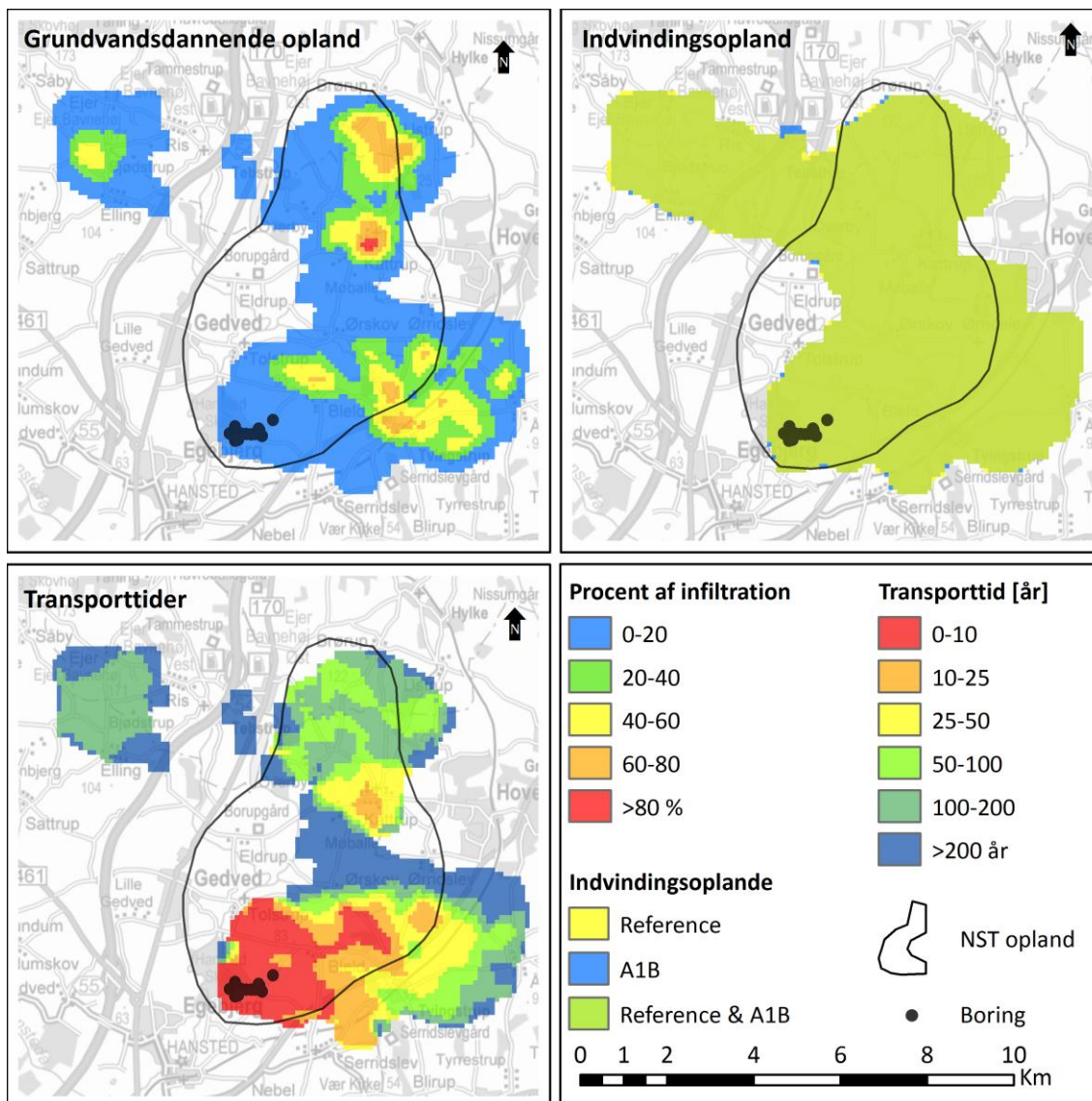


Fig. 13.11 Simuleret grundvandsdannende opland, indvindingsopland og transporttider for Højballegårdværket. "Procent infiltration" (0-20, 20-40 osv.) er relateret til det grundvandsdannende opland og viser hvor stor en del af infiltrationen der udtrykkes ved antal partikler i forhold til de 100 der initialt blev frigivet i hver kasse, der havner i kildepladsens indvindingsboringer (resultatet vist på figuren referer til referencekørslen 2A). Det er dermed et relativt mål for grundvandsdannelsens størrelse indenfor det afgrænsede grundvandsdannende opland. For indvindingsoplandet er vist hhv. fællesmængden (Reference & A1B af nuværende og fremtidigt klima, vist med vissegrøn). Blå grids er her områder der vil blive en del af indvindingsoplandet i et fremtidigt klima, mens gule grids er områder der indgår i oplandet i dag, men ikke vil gøre det i et fremtidigt klima. Transporttiden er vist i intervaller hhv. 0-1, 10-25, 25-30, 50-100, 100-200 og >200 år med en farveskala hvor røde-gule farver har kort transporttid, mens grønne-blå farver har lange transporttider på op til 500 år. Det viste NST opland er det "tidligere" indvindingsopland der kendes fra Regionplan 2005, i legende betegnet "NST opland" (sammenligningsgrundlag)

Da der er relativt små forskelle på indvindingsoplande ved nuværende og fremtidigt klima jf. A1B scenariet for Egebjerg området, er det valgt kun at vise klimaændringens betydning på temaet der viser indvindingsoplandet i (Fig. 13.11-13.15). En illustration af forskelle på grundvandsdannende oplande er beskrevet i Appendix A for det kraftigere A2 klimascenarie.

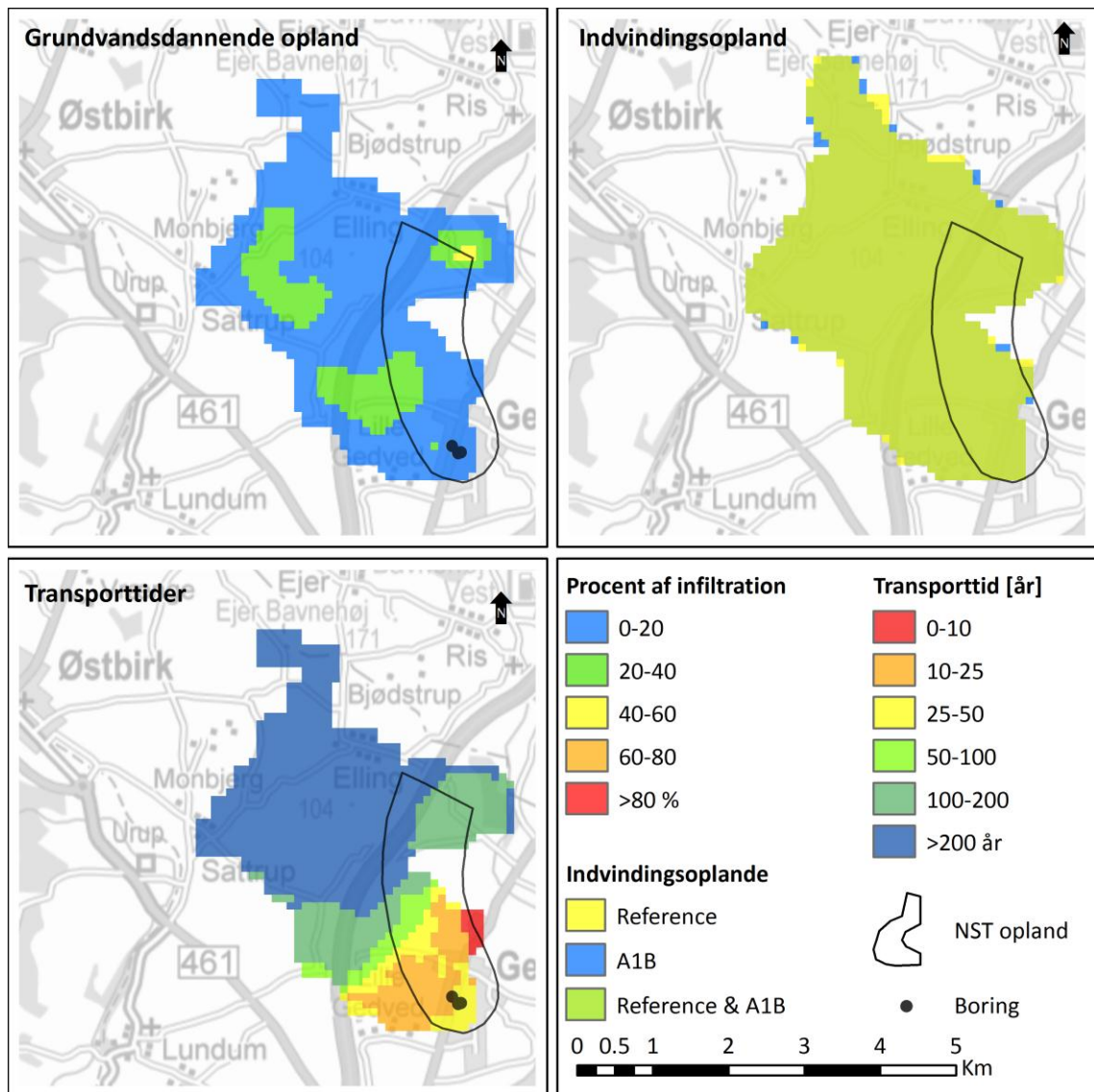


Fig. 13.12 Simuleret grundvandsdannende opland, indvindingsopland og transporttider for Gedved VV.

Resultatet for Gedved VV (Fig. 13.12) viser, at det grundvandsdannende opland overvejende er beliggende noget vest for NST tidligere opland. Infiltrationsgraden er mindre og havner typisk i klassen 0-20 % infiltration til vandværkets borer. Lokalt er der lidt større infiltration - % med 20-40 % og et enkelt sted 40-60 % af infiltrationen der havner i vandværkets borer.

Indvindingsoplandet er relativt upåvirket af klimaændringer. Til gengæld, bl.a. som følge af den relativt lave infiltrations - % for det grundvandsdannende opland, er indvindingsoplandet væsentlig større end hidtil vurderet i Regionplan 2005 (NST opland).

Transporttider er relativt store indenfor et par kilometer fra borerne til Gedved VV, enkelte steder 0-10 år, og i et større område 10-25 år (Fig. 13.12).

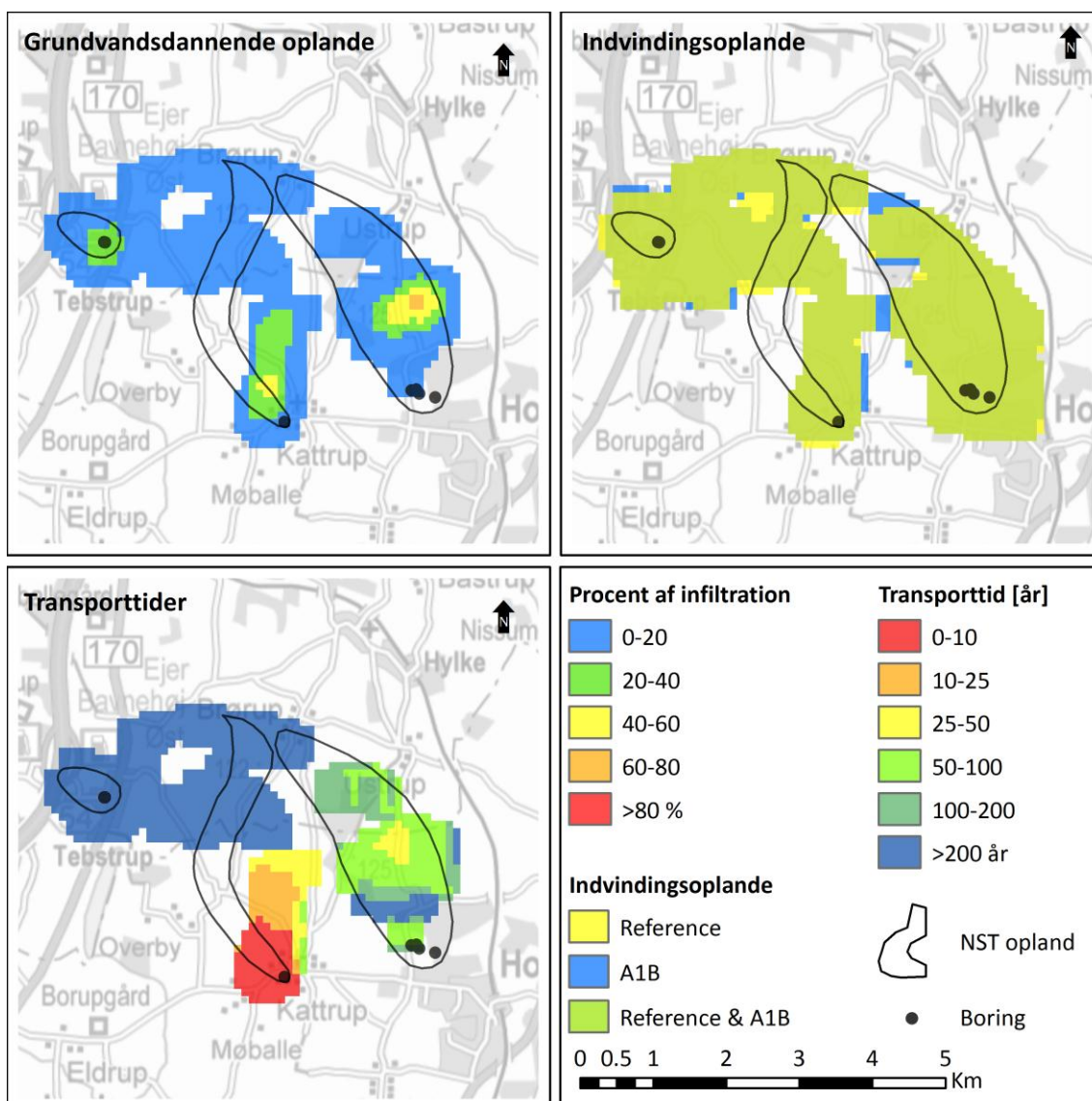


Fig. 13.13 Simuleret grundvandsdannende opland, indvindingsopland og transporttider for Tebstrup, Kattrup og Hovedgård VV (beliggende i nævnte rækkefølge fra vest mod øst).

Resultaterne for Tebstrup VV og Kattrup VV smelter lidt sammen. De væsentligste områder der bidrager til grundvandsdannelsen for Tebstrup VV og Kattrup VV (med infiltration hhv. 20-40 % og 20-60 % der havner i borerne) sker fra et par mindre områder relativt tæt på borerne til Tebstrup VV og Kattrup VV. Hovedgård VV har størst infiltrations - % for det grundvandsdannende opland "til vandværket" specielt fra et sammenhængende område ca. 1- 1.5 km nord for borerne (Fig. 13.13).

Der er lidt større usikkerhed på indvindingsoplandet for klimaændringer for dette nordlige område, op til 200 m's usikkerhed i enkelte områder. Transporttiden er især lille for Kattrup

VV, hvor et større område indenfor 1 km fra boringen har transporttider på kun 0-10 år, og den resterende del blot 10-25 år. Tebstrup har generelt store transporttider (> 200 år). Hovedgård VV har transporttider på 25-50 år fra det område hvor størstedelen af grundvandet dannes (Fig. 13.13).

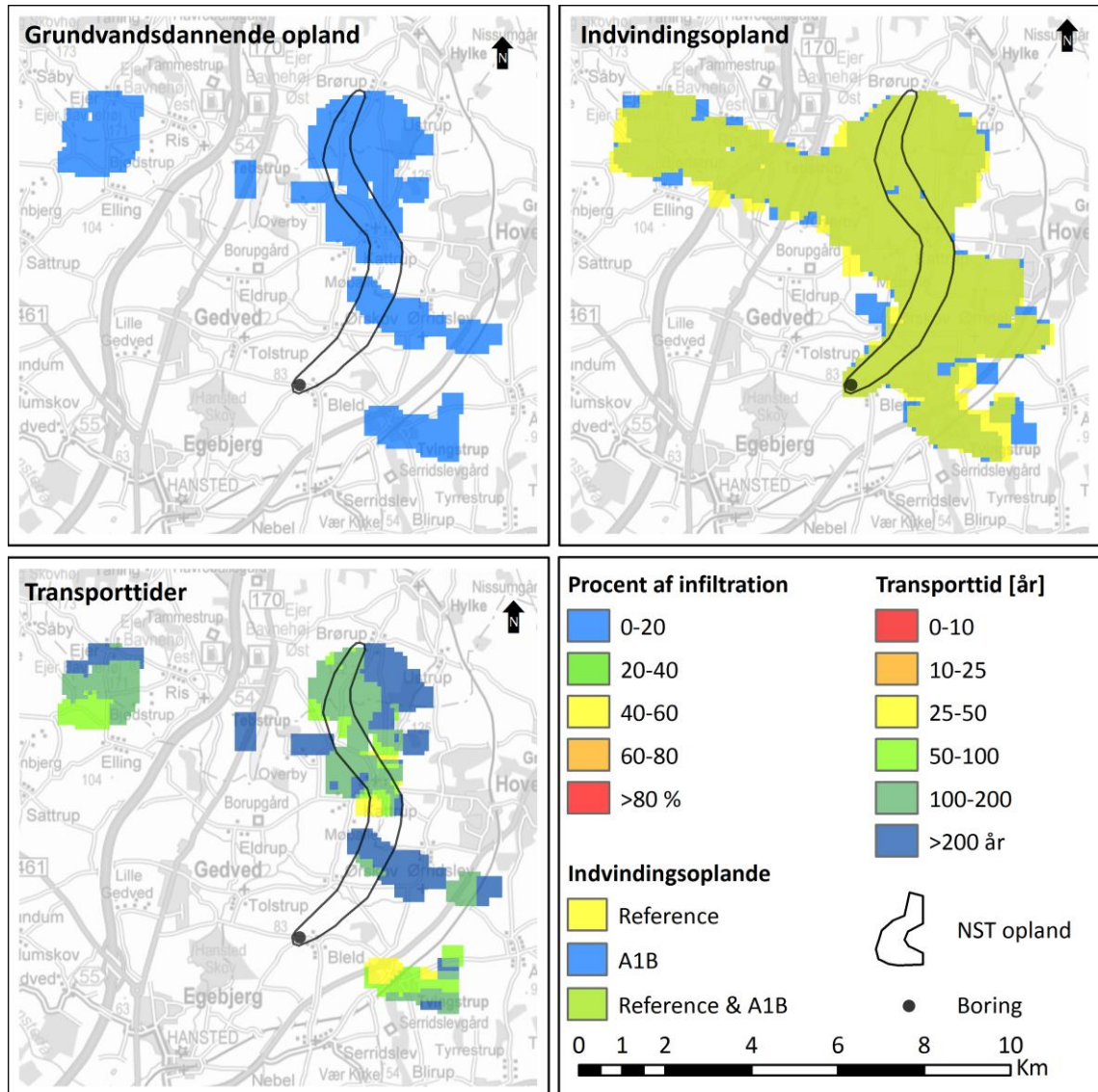


Fig. 13.14 Simuleret grundvandsdannende opland, indvindingsoplånd og transporttider for Bleid VV.

Resultaterne for Bleid VV er vist i Fig. 13.14. Bleid VV er beliggende indenfor det meget større opland til Højballegårdværket (Fig. 13.11). Det betyder at de partikler der udgør grundlaget for afgrænsningen af grundvandsdannende opland og indvindingsoplånd for Bleid VV (se Fig. 13.10, de røde partikler) er relativt fragmenterede. Det kommer så til udtryk på Fig. 13.14 i form af et ret spredt grundvandsdannende opland, som samtidig har relativt begrænset indvindings - % (i intervallet 0 – 20 %). Beliggenheden af det grundvandsdannende opland er samtidig meget usikkert og afhængig af hvilken indvinding der er fra Højballegårdværkets boringer. De to vandværker Bleid og Højballegårdværket så at

sige 'deler' indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande i den nordlige og østlige del af modelområdet.

Der er nogen forskel på indvindingsoplande ved nuværende og fremtidigt klima. Transporttider har stor variation indenfor det grundvandsdannende opland, og er måske det bedste grundlag til en differentiering i forhold til de umiddelbart mest sårbare områder (Fig. 13.14). En indsatsplanlægning der isoleret betragter Bleld VV's oplande giver ikke mening, der er som minimum behov for en integreret plan der omfatter Bleld og Højballegårdværket.

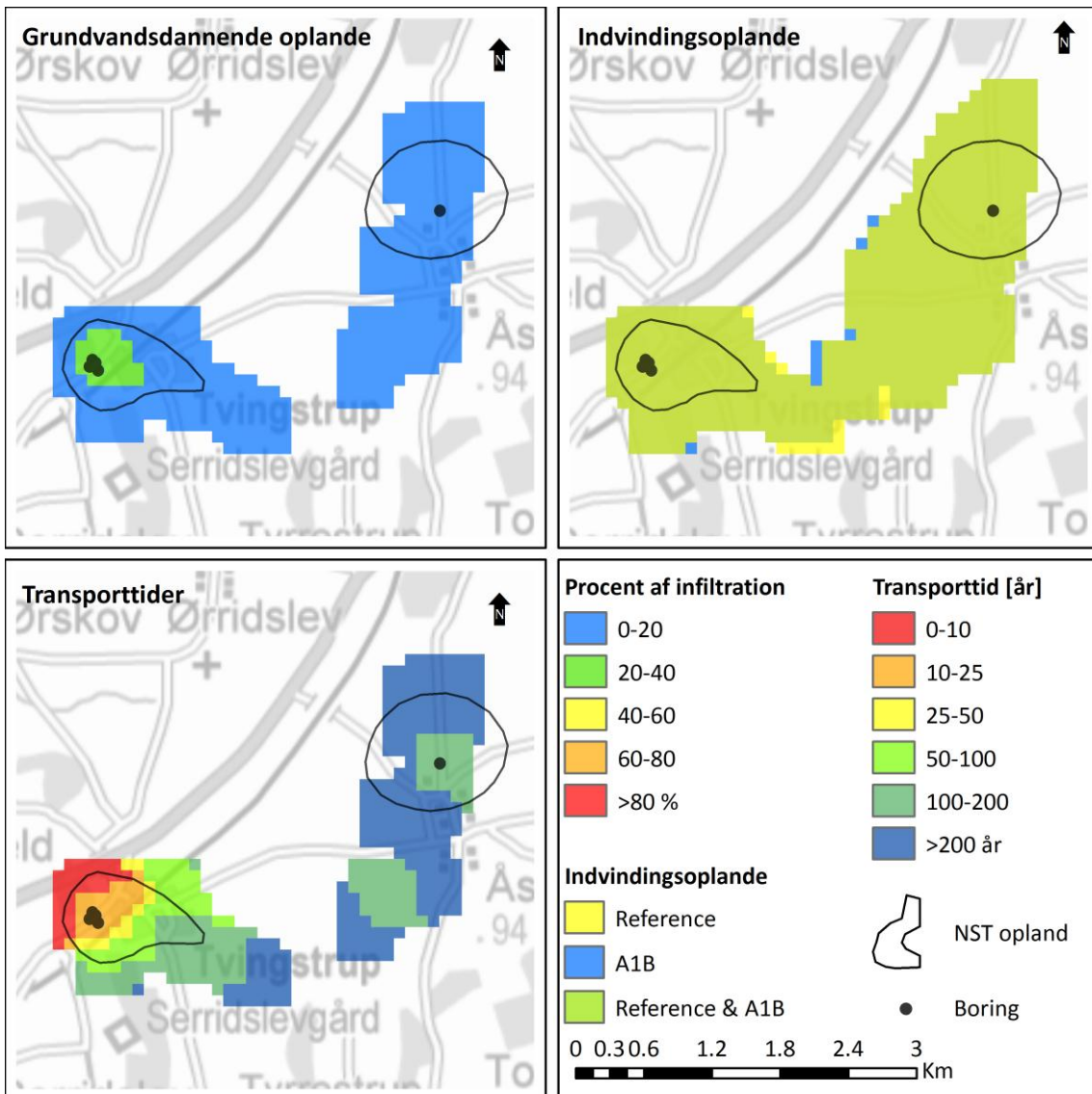


Fig. 13.15 Simuleret grundvandsdannende opland, indvindingsoplande og transporttider for Tvingstrup og Åes VV.

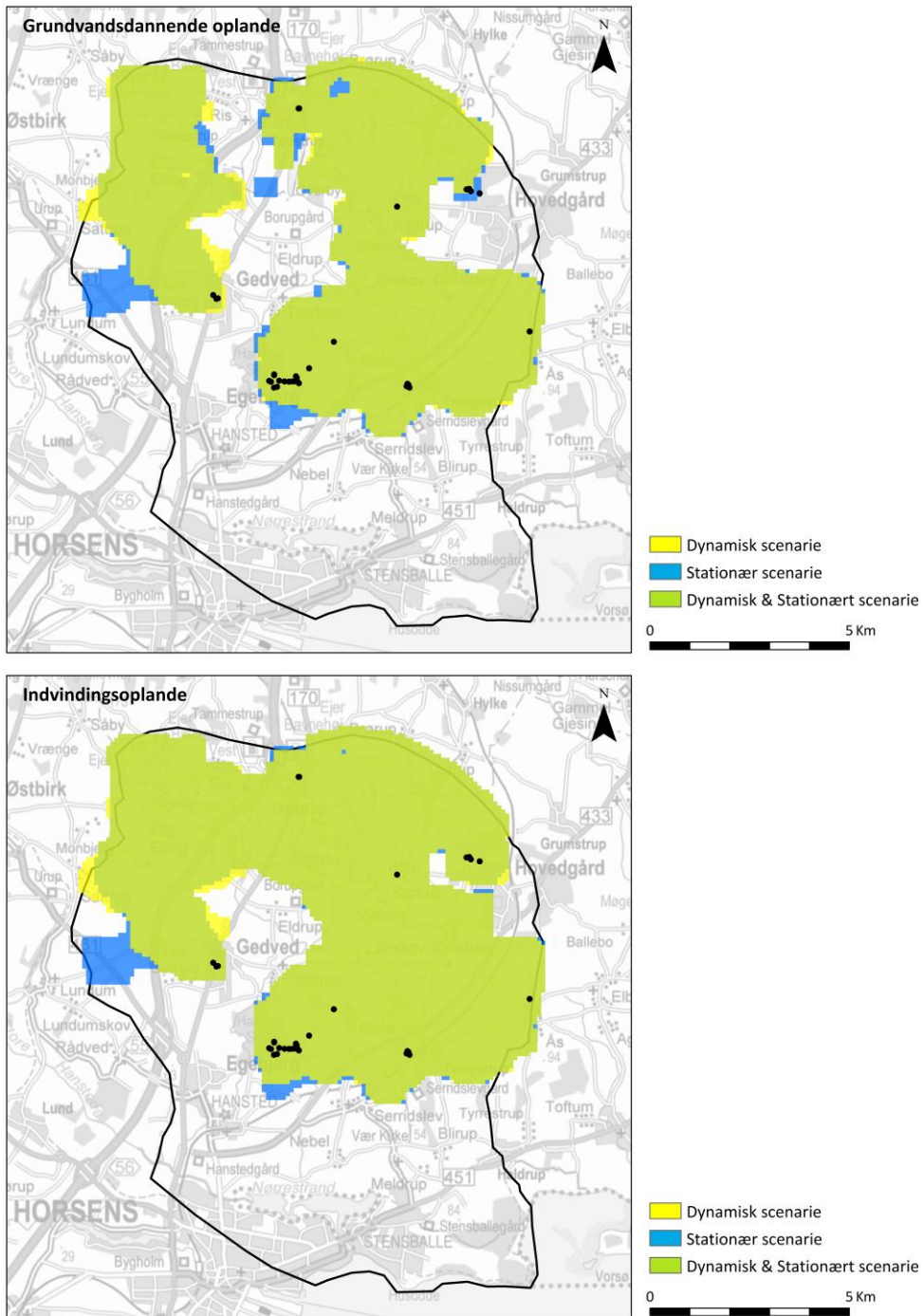
Tvingstrup VV og Åes VV er vist på Fig. 13.15. Tvingstrup VV har relativ stor grundvandsdannelse i et nærområde til kildepladsens boringer og øst herfor (med 20-40 % af infiltrationen der havner i kildepladsens boringer). Åes har lav infiltrationsprocent.

Indvindingsoplandet for de to vandværker smelter sammen mod sydøst, og er specielt for Åes VV større end NST oplandet jf. Regionplan 2005. Klimaændringer giver kun relativt små forskelle på beliggenheden af indvindingsoplande (Fig. 13.15).

Med hensyn til transporttider har Tvingstrup VV meget små transporttider tæt på boringerne (10-25 år) og specielt lige nordvest herfor (0-10 år). Åes VV har noget større transporttider på omkring 100-200 år omkring boringen og et lokalt område ca. 1 km SSV for boringen (Fig. 13.15).

13.5 Stationær versus dynamisk simulering

Fig. 13.16 viser resultatet for grundvandsdannende oplande til samtlige 8 kildepladser der er undersøgt belyst på baggrund af hhv. en stationær model og en dynamisk model.



Figur 13.16 Sammenligning af afgrænsning af grundvandsdannende oplande med stationær og dynamisk kørsel. Det grøngrønne område illustrerer fællesmængden hvor stationær og dynamisk model begge udpeger de pågældende grids som en del af det grundvandsdannende opland. Gule område er kun en del af indvindingsoplandet for den dynamiske model, mens blå områder kun er del af oplandet i den stationære model.

Der ses af Fig. 13.16 at være forskelle på dynamisk og stationær model. Forskellene fremkommer bl.a. omkring Gedved kildeplads, omkring den sydvestlige afgrænsning til Højballegårdværket, samt omkring Tebstrup og Hovedgård vandværker. Der er ikke nogen entydig sammenhæng mellem de afgrænsede områder og fx transporttiden til vandværker. Højballegård området har meget små transporttider (0-10 år) i det pågældende område. Gedved har herimod meget store transporttider (200-500 år). De øvrige områder ligger imellem disse yderpunkter.

Hensigten med sammenligningen har været, at få afvigelser frem mellem en dynamisk og en stationær bestemmelse grundet tidlige variationer i nettonedbørsinputtet over året og fra år til år. De forskelle der ses af Fig. 13.16 vurderes imidlertid primært at skyldes den meget store hukommelse i systemet, og at den stationære model og systemet endnu ikke er kommet i en stationær tilstand. Derfor viser sammenligningen af den stationære og dynamiske model ikke det som egentlig har været hensigten, men er primært et udtryk på nogen forskelle i vandbalanceforhold mellem de to modeller, der giver de fundne forskelle.

En rapport udarbejdet til Geovejledning 2 (Iversen et al., 2010) har kigget nærmere på denne problemstilling, og vurderer, at årstidsvariationen i nettonedbøren kun har ringe betydning for beliggenheden af de beregnede oplande, og at det derfor er underordnet isoleret set for beregning af grundvandsdannende oplande og indvindingsoplande, at der tages højde for årstidsvariationer i nettonedbøren (Iversen et al., 2010).

Det forhold at der er nogen forskelle på stationær og dynamisk models vandbalance, gør at undersøgelsen ikke bidrager med væsentlige resultater, da de fundne afvigelser i Fig. 13.16 sandsynligvis må tilskrives forskelle i vandbalancen og ikke effekter af dynamisk beskrivelse af nettoendbøren i tid. I tabel 13.3 er udvalgte led i vandbalancen sammenlignet for oplandet til 27.01. Resultaterne dokumenterer at forskellene i oplande meget vel kan hænge sammen med generelle forskelle i vandbalancen vurderet i tabellen, mere end at det er et udtryk for variationen i nettonedbør over tid.

Tabel 13.3 Udvalgte vandbalancestørrelser for stationær model og dynamisk model (1991-2009)

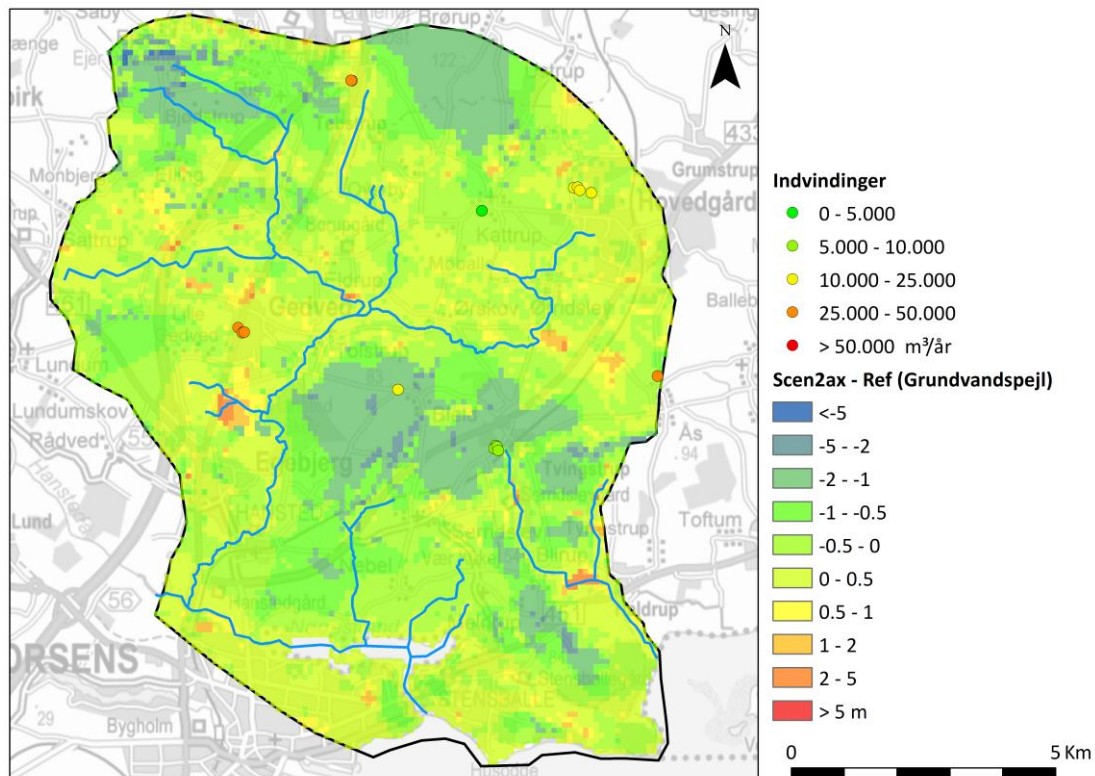
Vandbalancestørrelse	Stationær mm/år 1991-2009	Dynamisk mm/år 1991-2009
Infiltration til beregningslag 1	311	324
Grundvandsafstrømning til dræn & vandløb	181	196
Grundvandsdannelse til lag 2	98	84
Grundvandsdannelse til lag 10	60	70
Grundvandsdannelse til lag 20	13	18

Ideen om at forsøge at sammenligne betydning af dynamisk versus stationært nedbørsinput er velment, men der vil altid være nogen forskelle i vandbalancen, som gør sammenligningen vanskelig at gennemføre. Da ny viden (Iversen et al., 2010) samtidig maner betydningen at den tidlige variation i nettonedbøren i jorden, og i stedet peger på at variationer i oppumpningen i tid og sted kunne være en mere relevant størrelse at kigge på i et varmere

klima, herunder indflydelse på indvindingsoplande, så vurderes det at sammenligninger med stationær og dynamisk model for fx A2 scenariet heller ikke vil give meget konstruktiv ny viden.

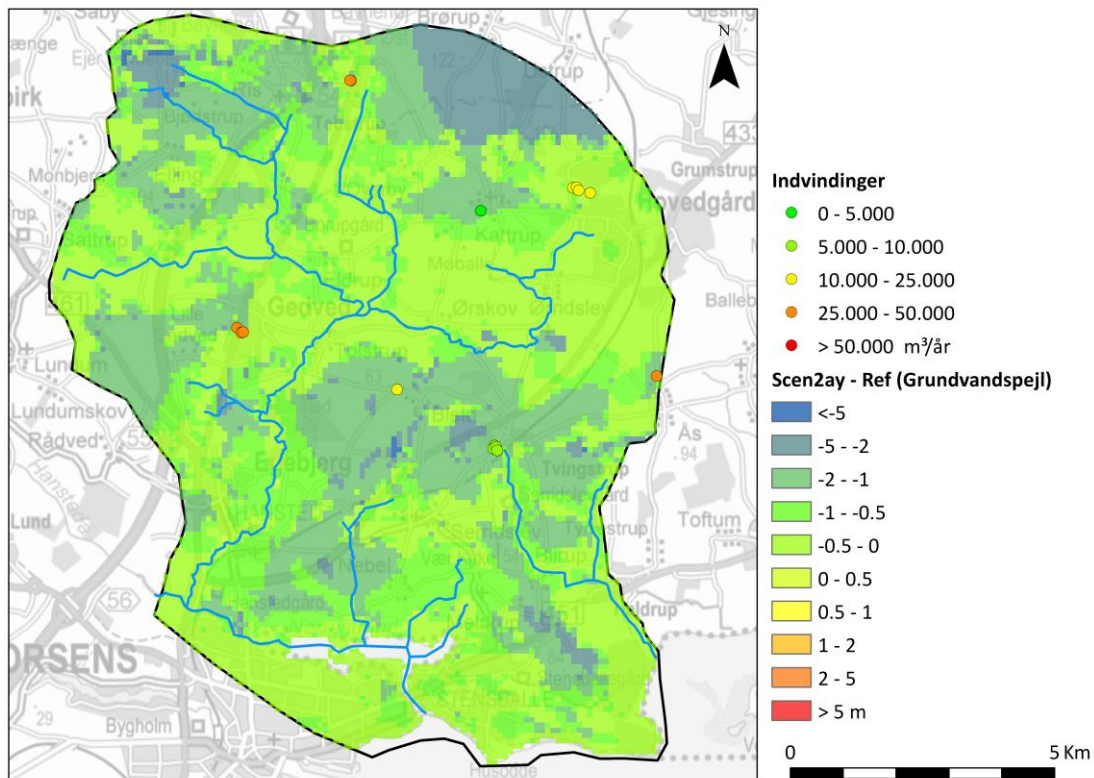
13.6 Sensitivitetsanalyser

Der er som nævnt lavet sensitivitetsskørsler med henholdsvis lav og høj dræntidskonstant jf. det estimerede konfidensinterval for denne parametre. Resultatet af denne analyse er vist i Fig. 13.17 for scenarie 2AX, hvor det øverste grundvandspejl er sammenlignet med reference kørslen for en lav dræntidskonstant.



Figur 13.17 Ændret terrænnært grundvandspejl ved antagelse af lav dræntidskonstant (scenarie 2AX) sammenlignet med referencekørslen (2A)

Det fremgår, at dræntidskonstanten giver markante ændringer i det øverste grundvandspejl hvor den lave dræntidskonstant typisk vil hæve grundvandspejlet med 0.5-1 meter i de lavest liggende områder omkring vandløb. At grundvandspejlet ser ud til at falde i andre områder er umiddelbart vanskeligt at finde nogen helt klar forklaring på. Resultatet understreger måske kompleksiteten i forhold til at benytte 'dræntidskonstanten' som metodik og at der er tale om gennemsnitsværdier af trykniveauet for perioden 1991-2009.



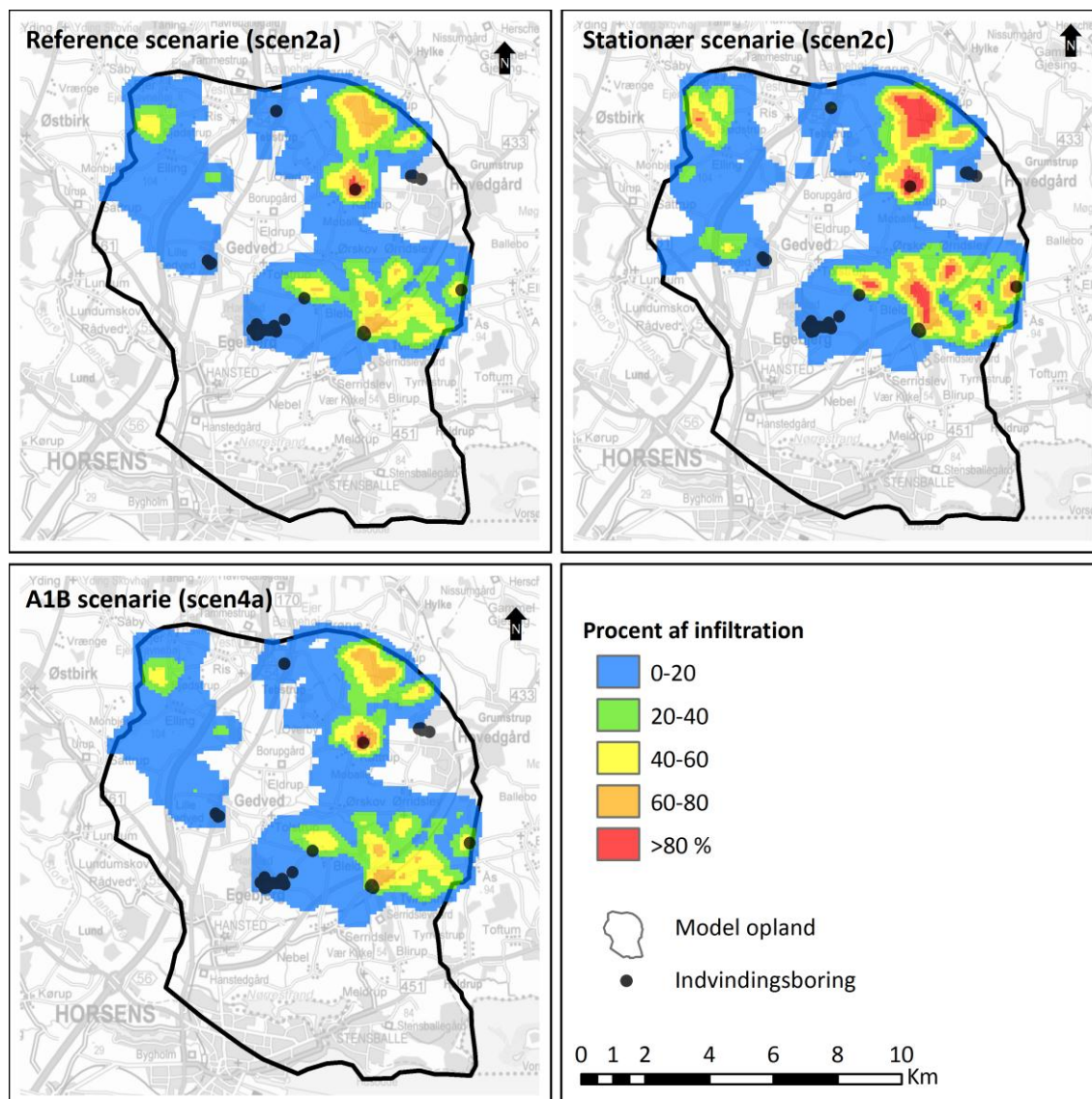
Figur 13.18 Ændret terrænnært grundvandspejl ved antagelse af høj dræntidskonstant (scenarie 1AY) sammenlignet med referencekørslen (2A)

Fig. 13.18 med en høj dræntidskonstant (2A sammenlignet med 2A) svarer til at dræningen er effektiviseret. Lokalt omkring vandløb ses fald i trykniveauet på 0.5 – 1 meter på mange strækninger, mens et større område omkring Højballegårdværket har fald i det øverste vandspejl på 1 – 2 meter, og et område langs nordøstlige rand har fald i vandspejlet på 2 - 5 meter. Resultatet på Fig. 13.18 virker intuitivt bedømt mere logisk end resultatet på Fig. 13.17. Metodikken siger noget om dræningens betydning og at modellen er meget sensitiv overfor ændringer i fx dræning. Det vil sige, at der kan være nogen indirekte effekter af klimaændringer som man skal være opmærksom på. Hvis vi får mere våde sommerperioder og eller vækstsæsoner med behov for mere effektiv dræning, så vil ændringer i dræningen kunne give meget markante ændringer i vandbalancen og i grundvandspejlet. Ikke på grund af de direkte virkninger af ændret nedbør, fordampning og temperatur i gennemsnit, men som følge af ændringer i dræningsforhold.

Det vurderes sammenfattende, af de foretagne følsomhedskørsler med ændrede drænkoster svarende til konfidensgrænser bestemt ved den inverse optimering, ikke udgør en tilstrækkelig brugbar metode til vurdering af ændrede dræningsforhold i et fremtidigt klima. Resultaterne af hhv. 4AX og 4AY (samt tilsvarende resultater for nuværende klima 2AX og 2AY) udgør dermed ikke et godt grundlag til vurdering af disse forhold. I stedet er der formentlig behov for at udvikle en scenarieudviklingsbaseret metodik, der bygger på en opskalering fra mindre skala af dræn og grøfter, til effektive parametre for dræntidskonstant og vandløbslækage, der kan benyttes til sensitivitetanalyse. Sensitivitetkørsler vil derfor ikke blive yderligere omtalt i nærværende rapport.

13.7 Syntese af stationære scenarier og klimaændringer

I dette afsnit gives en kort sammenstilling af resultater af stationære kørsler (Scenarie 2C) og resultater af klimaændringer (Scenarie 4A på basis af klimascenarie A1B) i forhold til referencescenariet (Scenarie 2A). I Fig. 13.19 er vist grundvandsdannende oplande for samtlige 8 vandværker samt % infiltration der havner i et vandværk.



Figur 13.19 Sammenligning af grundvandsdannende oplande for referencekørsel (2A), stationær kørsel (2C) og klimaændring (4A)

Det fremgår af Fig. 13.19 at der er meget små forskelle for grundvandsdannende oplande og infiltrations procenter mellem reference kørsel (2A) og fremtidigt klima (4A). De direkte effekter af klimaændringer har ingen væsentlig betydning for beliggenheden af de grundvandsdannende områder. Den stationære model (Fig. 13.19) giver ændringer i afgrænsning og i procent af infiltration. Disse forskelle skyldes primært vandbalanceforskelle grun-

det vanskeligheder ved at opsætte en stationær og dynamisk model, der har samme vandbalanceforhold. Ny rapport (Iversen et al., 2010) understøtter vurderingen af at ændringer i nettonedbøren har lille betydning. I Fig. 13.20 er vist forskelle i transporttider.

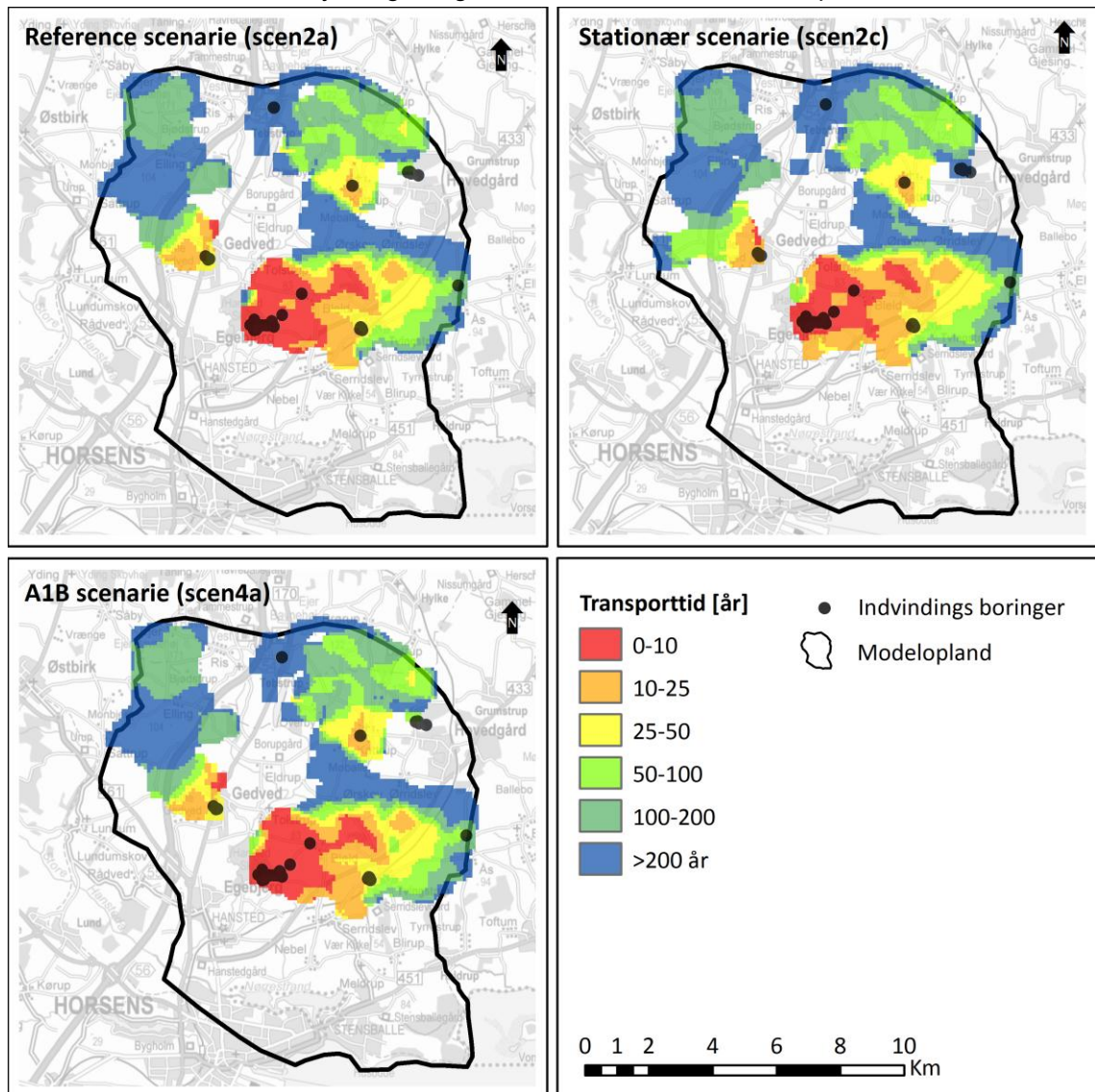


Fig. 13.20 Forskelle i simulerede transporttider (aldre) for Scenarie 2A (Referencekørsel), 2C (stationær kørsel) og 4A (klimaændringer jf. A1B)

Resultatet illustrerer og underbygger vurderinger til Fig. 13.19. Syntesen udtrykker dermed at klimaændringer for et område som Egebjerg, hvor man med en god antagelse kan forudsætte, at beliggenheden af hovedvandskel ikke flytter sig væsentligt som følge af klimaændringer, ja der har klimaændringer ikke nogen væsentlig betydning for afgræsning af grundvandsdannende områder eller for vurdering af transporttider. Ændringer i grundvandsbalancen, ved fx at benytte en stationær model der ikke svarer 100 % til den dynamiske model i den dybere vandbalance, det kan give markante forskelle. Som anbefalet i Iversen et al. (2010) er det derfor vigtigt at vandbalancen er godt modelleret, og at ændringer i vandindvinding i tid og sted er beskrevet i simuleringerne. I de simuleringer der er gennemført er der antaget en 'konstant indvinding' jf. aktuel indvinding (2006-2008). Ind-

vindingen har ikke været konstant siden Højballegårdværket blev idriftsat i 1968. Klimaændringer har stor betydning, men primært som følge af indirekte effekter der ændrer op-pumpning (tidslig variation, fordeling og evt. ændrede hovedvandskel som følge af større ændringer i den regionale vandindvinding) og ændrede vandbalanceforhold (fx ændret dræning).

14. Konklusioner og anbefalinger

14.1 Konklusioner

Der er opstillet en numerisk grundvands- og overfladevandsmodel for Egebjerg området med 30 vertikale lag og en diskretisering i 100x100 m i MIKE SHE/MIKE 11. Randbetingelser er baseret på overordnede grundvandskel fastlagt på baggrund af potentialekort, synkronpejlinger samt den geologiske model i Geoscene. Modellen har input i form af daglig nedbør, temperatur og fordampning for 1990-2009. GEUS vurderer, at modellen for Egebjerg udgør det med foreliggende kortlægningsgrundlag bedst mulige grundlag for 1) afgrænsning af indvindings- og grundvandsdannende oplande, 2) detaljeret vurdering af vandbalanceforhold, grundvandsdannelse, udbredelse af sænkninger og vandløbspåvirkning og dermed bæredygtig udnyttelse samt 3) vurdering af klimaeffekter på grundvandsforhold i et område i nogen afstand fra kysten præget af forekomst af et komplekst system af begravede dale.

Hovedresultatet af undersøgelsen viser, at for et område som Egebjerg præget af dybe begravede dalsystemer og som ikke er nævneværdigt påvirket af ændringer i havstigninger, har klimaændringer ikke nogen nævneværdi betydning for afgrænsningen af indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande. Afgrænsning af de mest sårbare dele af de grundvandsdannende oplande i forhold til hvorfra den største del af infiltration havner i kildepladsernes borer og i forhold til transporttider fra terræn til vandboringer er heller ikke meget forskellige. Undersøgelsen bygger på klimascenarie A1B som er et mellemkraftigt klimascenarie i forhold til CO₂ og temperatur ændringer. Det vurderes, at et voldsomere scenarie fx A2 vil give lidt større ændringer, men at ændringerne fortsat vil være meget marginale selv med A2 scenariet. Mere markante ændringer vil der dog ske i forhold til øvrige vandbalanceparametre, fx vil max. afstrømningen stige i et fremtidigt klima, ligesom at grundvandsspejlet i mange områder vurderes at kunne stige med 0 – 0.5 meter. Klimaændringer vil derfor kunne give ændret behov for dræning eller vandindvinding, og det vil i givet fald påvirke vandbalancen og indvindingsoplande langt mere markant, end direkte effekter af ændret nedbør, ændret fordampning og ændret temperatur.

Der er gennemført vurderinger af vandløbspåvirkning og ændret grundvandsdannelse ved nul indvinding. Undersøgelsen viste at to vandløb hhv. Ørskov bæk og nedre del af Ll. Hansted å har meget markante reduktioner i minimumsvandføringen som følge af vandindvinding hhv. ca. 20 % og ca. 30 % i forhold til en tænkt nulindvinding. For øvrige vandløbsstrækninger er påvirkninger noget mere moderate med max. reduktion i minimumsvandføringen på ca. 5 %.

Det er vurderet at det ikke er muligt at vurdere bæredygtighed ud fra simple indikatorer i forhold til grundvandsdannelsen, men at bæredygtighed kræver nogle vurderinger af sammenhænge mellem vandindvinding, afsænkning og påvirkning af vandkvalitet og evt. vådområder, der ikke er foretaget inden for rammerne i nærværende undersøgelse.

Modellen er kalibreret ud fra perioden 2000-2004 med en række inverse modelleringer i forhold til trykniveau i grundvand fra ca. 100 observationspunkter og daglige vandføringer fra en fast målestation i lille Hansted å (27.01). Kalibreringsresultatet viser at modellen opfylder kravene til detailmodellering for vandbalancekravene (Fbal for året og for sommerperioden). Kravene til middelfejl på trykniveau (ME) er ligeledes opfyldt på detailmodelniveau, såfremt der frasorteres 15 boringer (hvoraf nogle er med observationer fra 70'erne, andre har tvivlsomme observationer der tyder på kotefejl mm.). RMS værdien kan dog ikke opfyldes på detailmodelniveau, selvom værdien virker rimeligt godt bestemt på det foreliggende datagrundlag.

Kvalitativt vurderet ud fra estimeret sænkingsdata ved Højballegårdværket for 2004, giver modellen en god beskrivelse af sænkningstragten. Modellen kan ikke opfylde kravet til R2 ved den ene station der findes i oplandet (St. 27.01 Ll. Hansted å), men modellen giver dog en god beskrivelse af minimumsvandføringen ved stationen, der er vigtig, da modellen skal bruges til at analysere vandløbspåvirkning. Kvalitativt vurderet ud fra synkronmålinger af vandføringen fra 1974, har modellen en god performance i forhold til beskrivelsen af den geografiske fordeling af grundvandsafstrømningen til vandløb ved minimum. Der er opstillet en usikkerhedsmatrice som karakteriserer modellens kilder til usikkerhed.

Det har ikke været muligt at opnå realistiske parametre for smeltevandsleren. Modellen simulerer dette lerlag med parametre der tyder på, at smeltevandsleren ikke udgør noget sammenhængende dæklag, dvs. med en hydraulisk ledningsevne der svarer til sand. Smeltevandsleren som bl.a. adskiller mellemste og dybere grundvandsmagasiner i de begravede dalsystemer kan derfor ikke indregnes som et sammenhængende beskyttende dæklag i relation til grundvandskortlægningen.

14.2 anbefalinger

Beregninger af oplande er baseret på aktuelle indvindinger 2006-2008. Det anbefales at foretage en simulering af grundvandsdannende oplande og indvindingsoplande i forhold til tilladelser. Højballegårdværket er i vurderingerne analyseret med en indvinding der overstiger tilladelsen, mens øvrige vandværker har indvindinger under tilladelsen. Med 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 har på oplandsvurderingerne. Samlet vurderes det ikke at give ændringer, men i vurderingen af de mindre vandværkers oplande, kan det ikke udelukkes, at der kunne være væsentlige ændringer i fx indvindingsoplande ved en kørsel ud fra tilladelser. En kørsel med tilladelser vil derfor kunne belyse dette forhold.

En væsentlig forklaring på at RMS ikke er opfyldt vurderes at være de kraftige fluktuationer i oppumpningen som ikke er indbygget i modellen, idet modellen som input benytter årlig oppumpning. En nærmere validering og dokumentation af modellen vil kræve at indvindingsdata indbygges med daglige/ugentlige/eller månedlige værdier for oppumpningen ved

specielt Højballegårdværkets boringer. Her er det desuden i modelleringen antaget at indvindinger er jævnt fordelt over kildepladsens boringer, og der er anvendt årlige indvindings-tal. På sigt kunne en validering af modellen der går helt tilbage til starten af 1960'erne med dynamisk simulering af ændrede indvindingsforhold frem til i dag være relevant, men der foreligger i øjeblikket ikke de nødvendige klimadata fra før 1990, ligesom det er et åbent spørgsmål om man vil kunne tilvejebringe de detaljerede indvindingsdata der er brug for til en grundig analyse og dokumentation af modellen i forhold til tidlige variationer mm.

En ordentlig dokumentation og validering af modellen kan ikke gennemføres baseret på en enkelt vandføringsstation og baseret på så gamle synkronmålingsestimater som dem der foreligger baseret på synkronmålinger helt tilbage fra 1974. Det vurderes at der som minimum er behov for to nye vandføringsstationer i oplandet (hvor en station i Ørskov bæk har høj prioritet), hvis modellen skal kunne valideres i forhold til afstrømningskriteriet R2, og valideres i forhold til vandløbspåvirkning fra vandindvinding. Der vil dog kræves mindst 4-5 års dataserie, før der vil kunne foretages en nærmere validering af modellen. En ny synkronmåling i oplandet vil kunne indsamles i løbet af et par år, og bør prioriteres. Der er samtidig behov for en revurdering og styrkelse af pejlestationsnettet, idet alt for mange pejledata er kraftigt påvirkede af start og stop af boringer. Der er især behov for nogle gode reference pejlestationer strategisk placeret i oplandet i forhold til den nye viden om grundvandsstrømningsforhold i de begravede dalsystemer der er tilvejebragt med den unikke voxelmodel.

Der er behov for at kigge nærmere på den geologiske model for lerlagene, sådan at sandvinduer og tynde sandlag repræsenteres bedre, end kortlægningen med SkyTEM og Paces har muliggjort. Det anbefales at kigge nærmere på såvel smeltevandsleren, glimmerleren og moræneleren. Opstilling af alternative konceptuelle modeller kunne være en relevant indgangsvinkel såfremt der ønskes en nærmere kvantificering af usikkerheder.

Efter GEUS's vurdering er det en styrke ved Egebjergmodellen, at den tvinger modellør såvel som vandforvalter til at prøve at forstå helheden, og blive skarpere på de væsentligste usikkerheder, og hvilke delelementer man kunne overveje at give et 'serviceeftersyn'. Hermed kan modellen bidrage til det videre arbejde med indsatsplanlægning og nye vandindvindingstilladelser, ved at den giver feedback til en bedre afbalancering af kortlægningsdata, og konkret feedback til hvor mere specifikke data vil kunne forbedre simuleringerne.

Resultater for A2 scenariet til brug for CLIWAT projektet (Appendix A) giver dog ikke væsentlige forskelle, i forhold til de resultater der er beskrevet indgående i nærværende rapport baseret på A1B scenariet. I Appendix A er de rå udtræk vedhæftet for A2 scenariet uden videre kommentering.

15. Referencer

- Ambo, K (2005) Højballegårdværket. Gennemgang af historiske pejleserier. KANmiljø. 37 pp.
- Andersen, LJ and Haman, Z (1970) Pumping tests and hydrogeological investigations of an artesian aquifer near Horsens. *Nordic Hydrology* 2, 69-110.
- Andersen, B. (2011). Personlig kommunikation 11. juli 2011. Oplysninger om målinger i Hansted å systemet (bl.a. ved Tolstrup og Viten dambrug mm.) og udløb i Nørre strand af vandføringen (Fiskebæk å og Værbæk).
- DGU (1976) Langtidsprøvepumpninger i Egebjergområdet som følge af oppumpninger fra Højballegårdværket, Horsens Vandforsyning. Nils Bull, Rolf Kallesøe og Henrik Kærgaard udført for Horsens Vandforsyning april 1976. 16 pp.
- DHI (2004/2005) Modelrapporter for Indsatsområde Århus Nord 02 og Århus Syd. Udført for Århus amt.
- Doherty, J. (2004) Model independent parameter estimation (PEST). Manual. Watermark Numerical Computing. <http://www.sspa.com/pest>.
- Henriksen, HJ, Iversen, CH og Wernberg, T (2010) Usikkerheder på indvindings- og grundvandsdannende oplande. (Delprojekt 3 om oplande). De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS. 77 pp.
- Iversen, CH, Troldborg, L, Møller, RR og Christensen, S. (2010) Dynamiske og stationære oplandsberegninger udført med tre semi-syntetiske modeller (Delprojekt 2 om oplande). GEUS.
- Jørgensen, F, Møller, RR, Sandersen, BE and Nebel, L (2010) 3-D geological modelling of the Egebjerg area, Denmark, based on hydrogeophysical data. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin* 20, 27-30. Open access: www.geus.dk/publications/bull .
- Keur, P van der, Rosenbom, AE, Iversen, BV, Sonnenborg, T, Olesen, JE, Jørgensen, LN, Kjær, J, Christensen, OB og Henriksen, HJ (2011) Vurdering af klimaændringens konsekvenser for udvaskning af pesticider i lerområder ved brug af en oplandsskala hydrologisk model. ATV vintermøde. Vingsted 2011.
- Kærgaard, H (1978) The physics of long term drawdowns in pumping from artesian aquifers. *Nordic Hydrology*, 9, 249-262.
- Mucha, I and Kærgaard, H (1982) A numerical model of aquifer tests in multi-layered aquifer/aquitard systems. *Nordic Hydrology*, 27-38.

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

NST (2011) Teknisk baggrundsnotat til Vandplan 1.9 Horsens Fjord. Bilag 3. 13 pp.

Refsgaard, JC, Trolborg, L, Henriksen, HJ, Højberg, AL, Møller, RR, Nielsen, AM (2010) God praksis i hydrologisk modellering. GEO – VEJLEDNING 7. De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS. 56 pp.

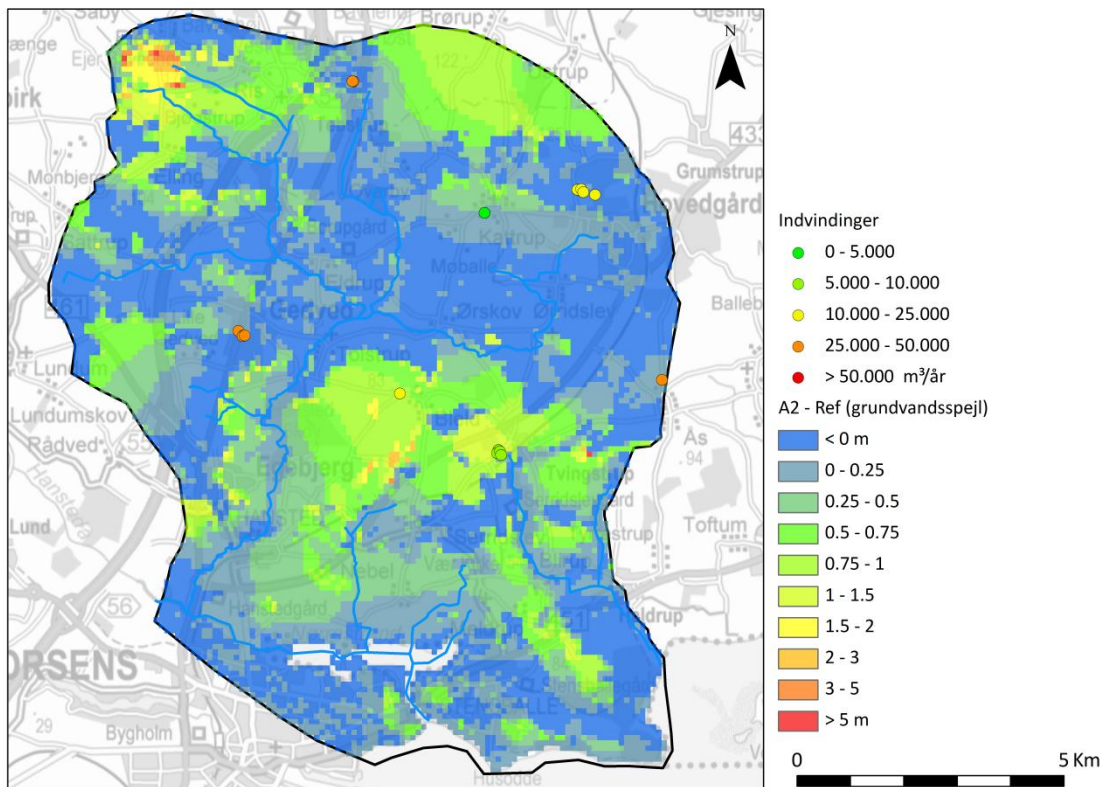
Refsgaard, JC, Stisen, S, Højberg, AL, Olsen, M, Henriksen, HJ, Børgesen, CD, Vejen, F, Kern-Hansen, C og Blicher-Mathiesen, G (2011) Vandbalance i Danmark. Vejledning i opgørelsen af vandbalance ud fra hydrologiske data for perioden 1990-2010.

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.

Schlüsen, K. (2011) Enkeltmålinger af vandføringen fra Hansted Å systemet. Orbicon. Personlig kommunikation.

Sonnenborg, TO og Henriksen, HJ (2005) Håndbog i grundvandsmodellering. GEUS rapport 2005/80. GEUS.

APPENDIX A Resultater for A2 klimascenariet

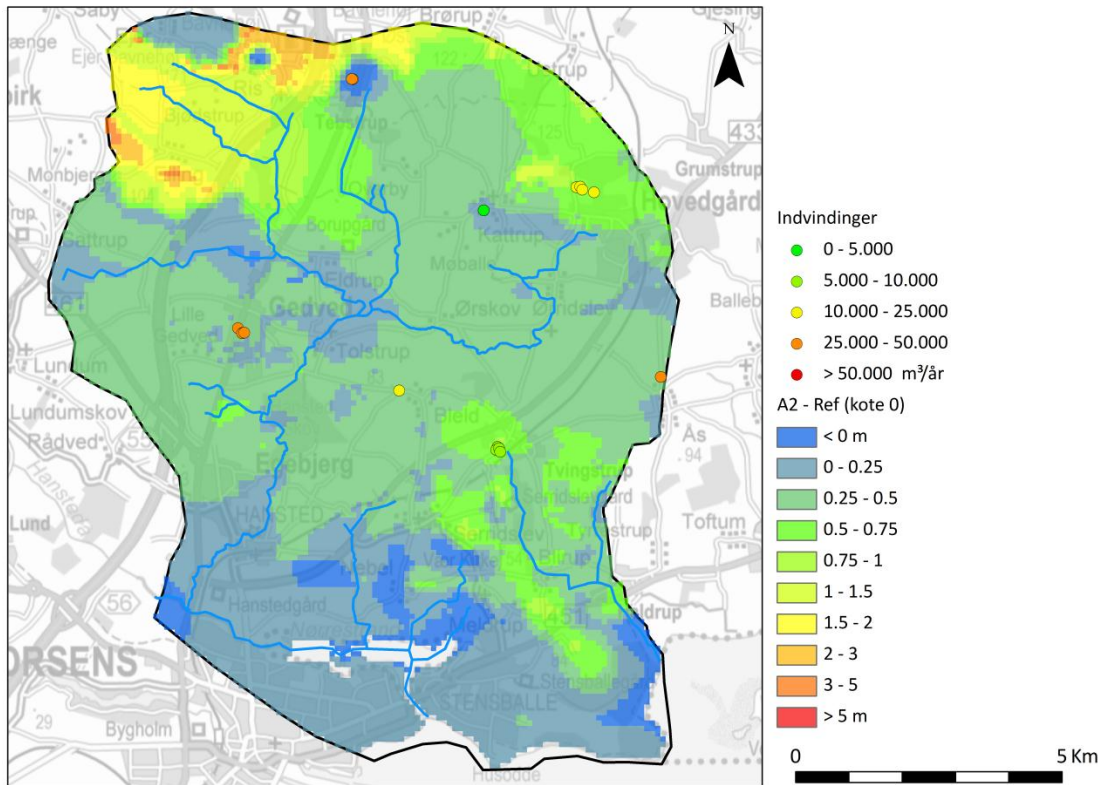


Figur A1 Ændret grundvandsspejl for A2 klimascenariet sammenlignet med referencekørslen

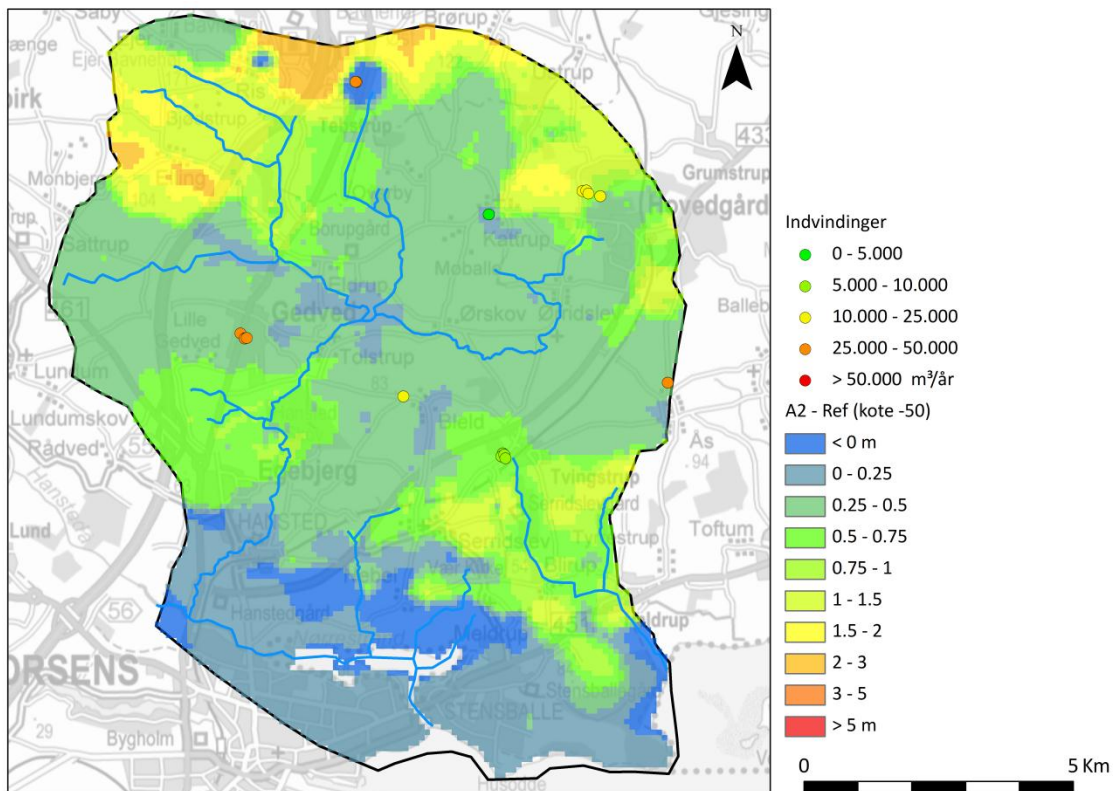
Figur A1 svarer til rapportens figur 13.5 for A1B scenariet. Det fremgår at der er ganske markante forskelle på klimascenarie A2 sammenlignet med A1B. Det er også forventet, idet der som nævnt i rapporten er en forøgelse i nedbøren på 30 % for A2 scenariet for vintermånederne, sammenlignet med 15 % for A1B scenariet.

Hvor der i A1B scenariet kun blev noteret ændringer i grundvandsspejlet 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 grundvandsspejl. 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. A2) ses mere markante ændringer i grundvandsspejlet 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.

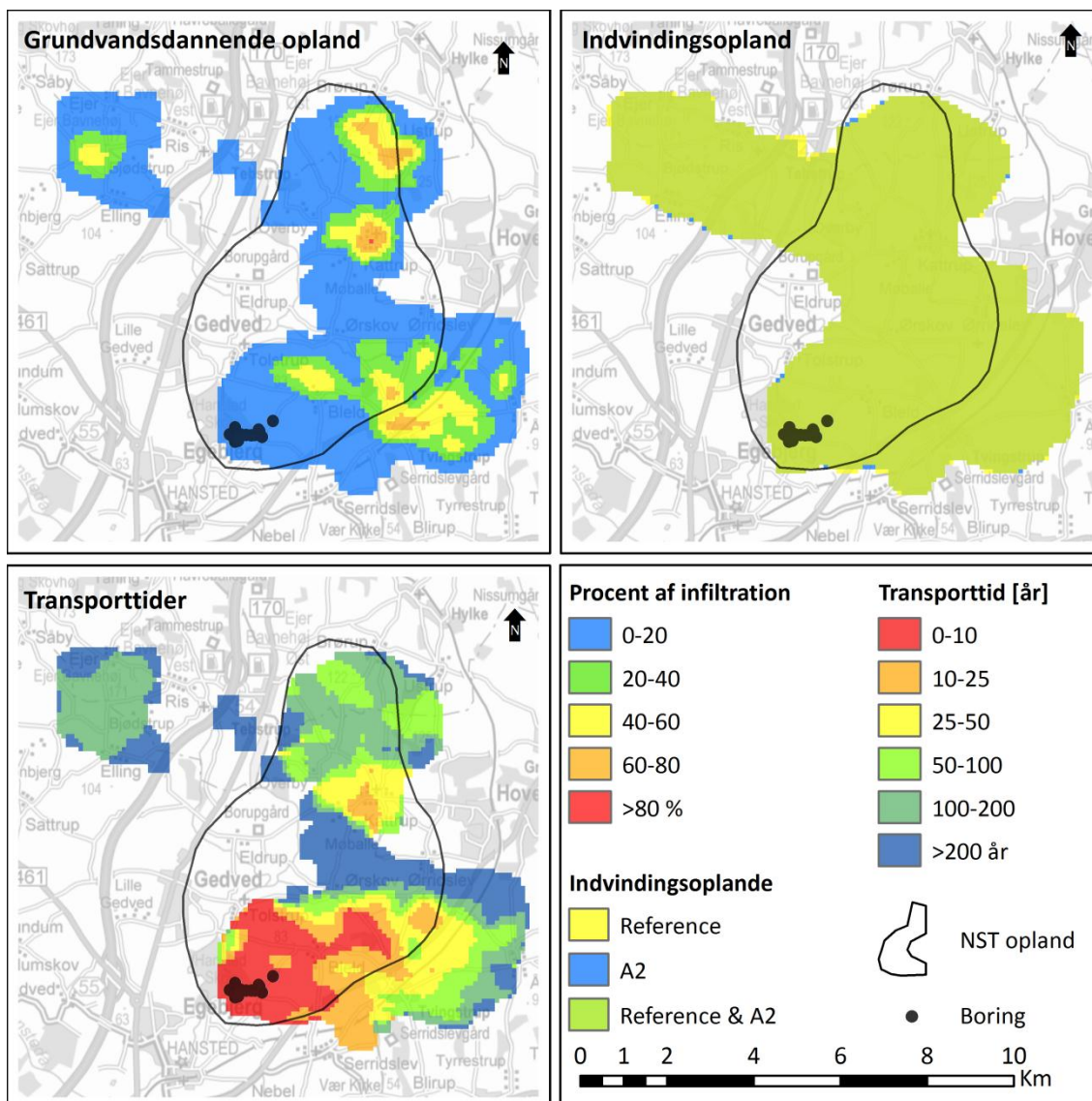
I stor dybde (Fig. A3) ses tilsvarende større ændringer i trykniveauet mange steder på 1-3 meter eller mere.



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



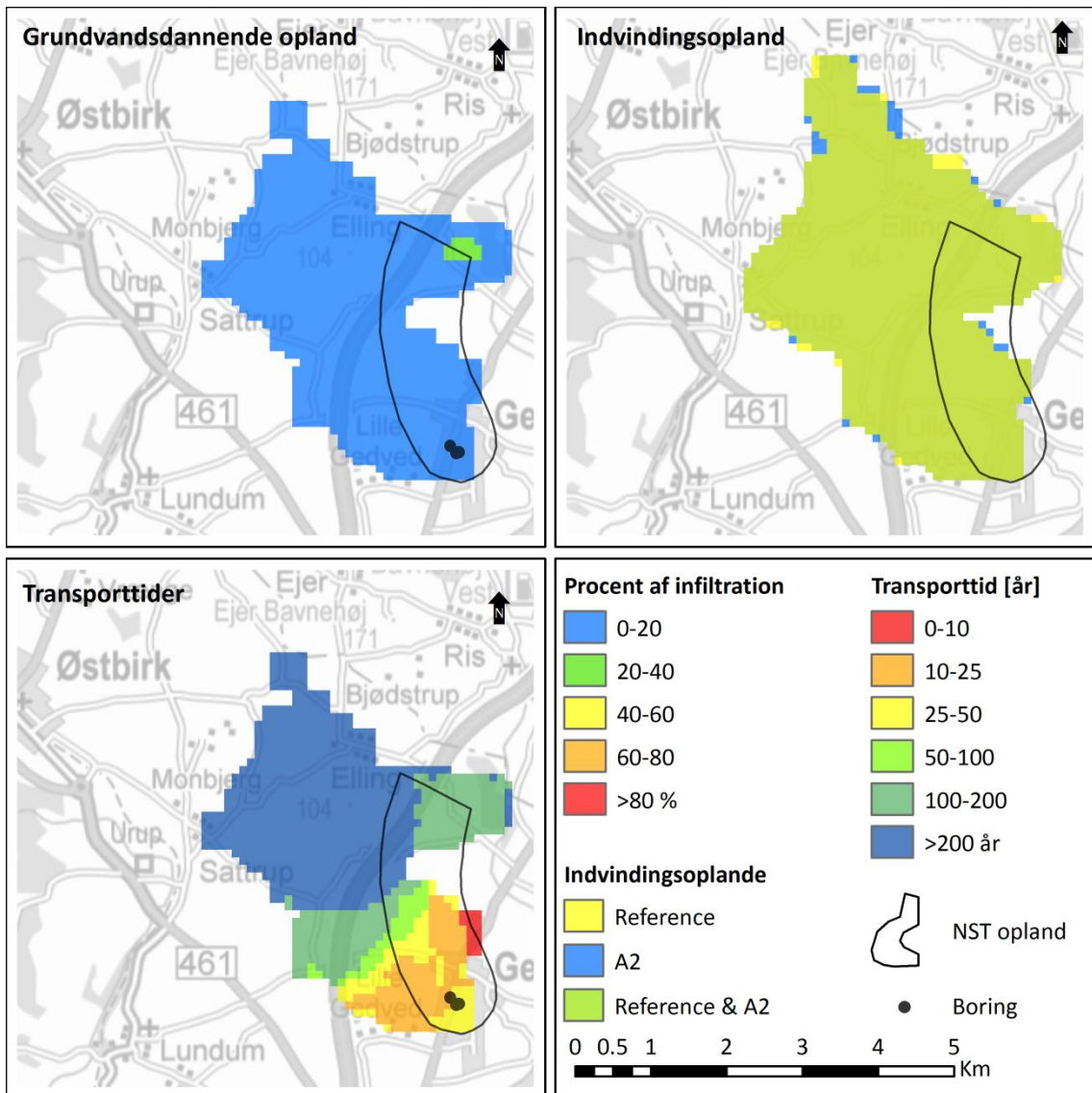
Figur A3 Ændret grundvandspejl ved A2 scenariet i forhold til referencen svarende til en dybde kote -50 meter.



Figur A4 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 figur A4 til figur A8. Der er flere lighedspunkter end forskelle, hvis man sammenligner med reference-scenariet vist i rapporten (Kapitel 13, figur 13.11 til figur 13.15).

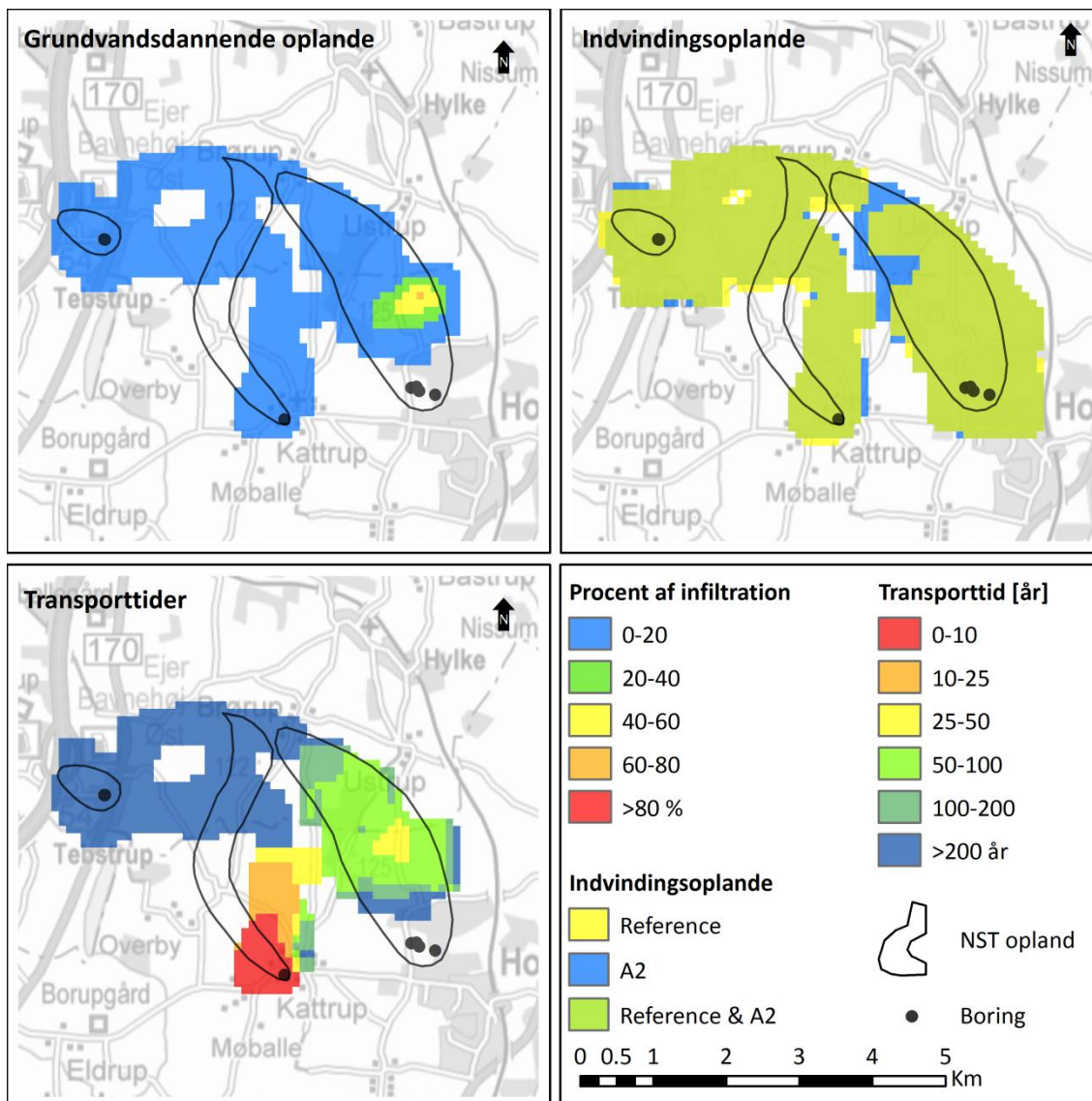
Det fremgår af figur A4, at der er meget begrænset forskel på indvindingsoplandet til Højballegård for A2 klimascenariet sammenlignet med referencekørsel (2A).



Figur A5 Resultater for A2 scenariet for Gedved VV.

Det fremgår af figur A5, at der er forskelle på indvindingsoplande på max 200 meter for oplandet til Gedved VV ved A2 scenariet, i store træk i lighed med de fundne ændringer ved A1B scenariet beskrevet i rapporten.

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

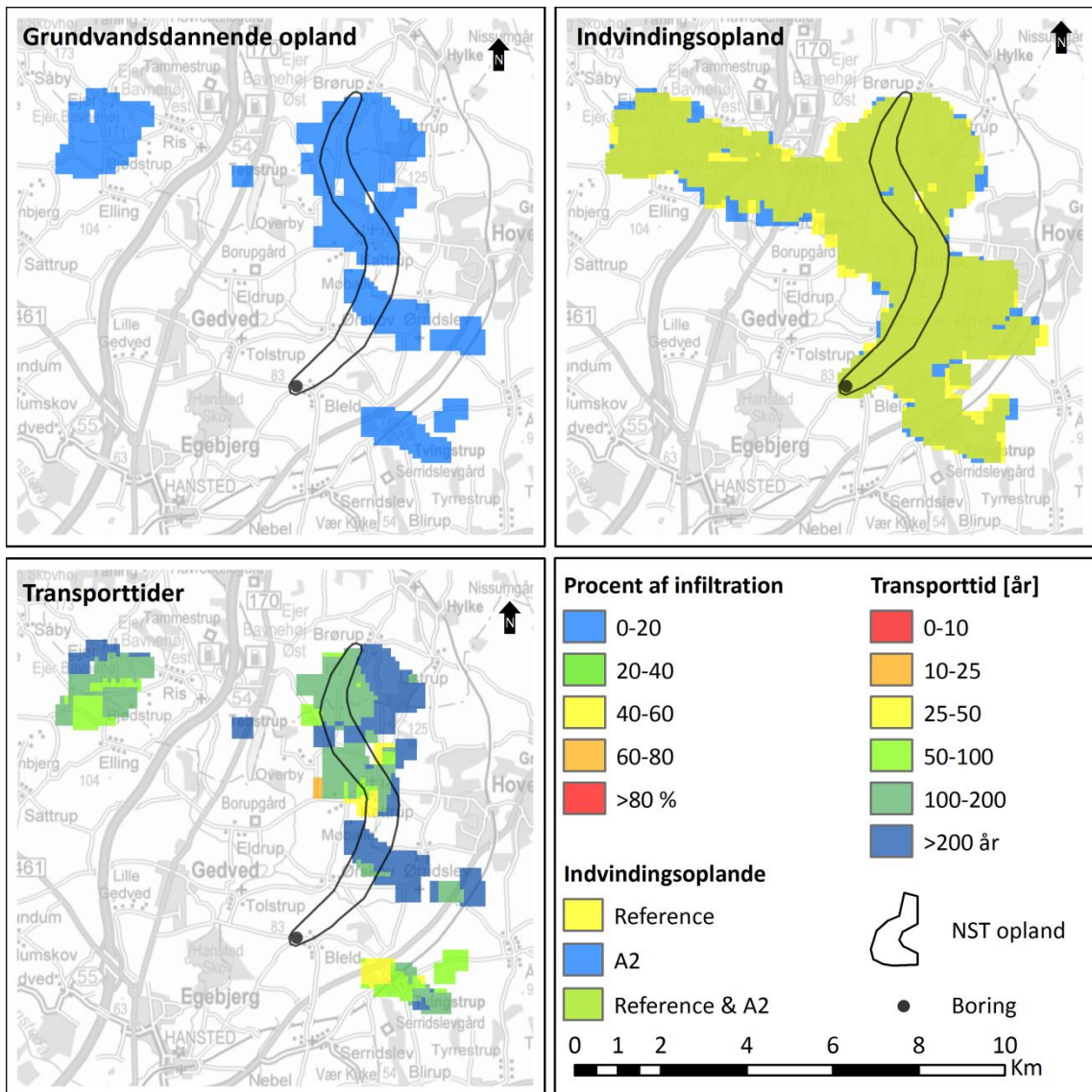


Figur A6 Resultater for A2 scenariet for Tebstrup, Katstrup og Hovedgård vandværker.

Resultaterne for A2 scenariet for indvindingsoplande til Tebstup, Katstrup og Hovedgaard (Figur A6) 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 gridkolloner 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 referencescenariescenariet, så giver A2 infiltrations-%'er på 20-40 % for et område tæt på kildepladsen ved A1B, hvorimod referencen scenariet overalt har max 0-20 % infiltration.

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

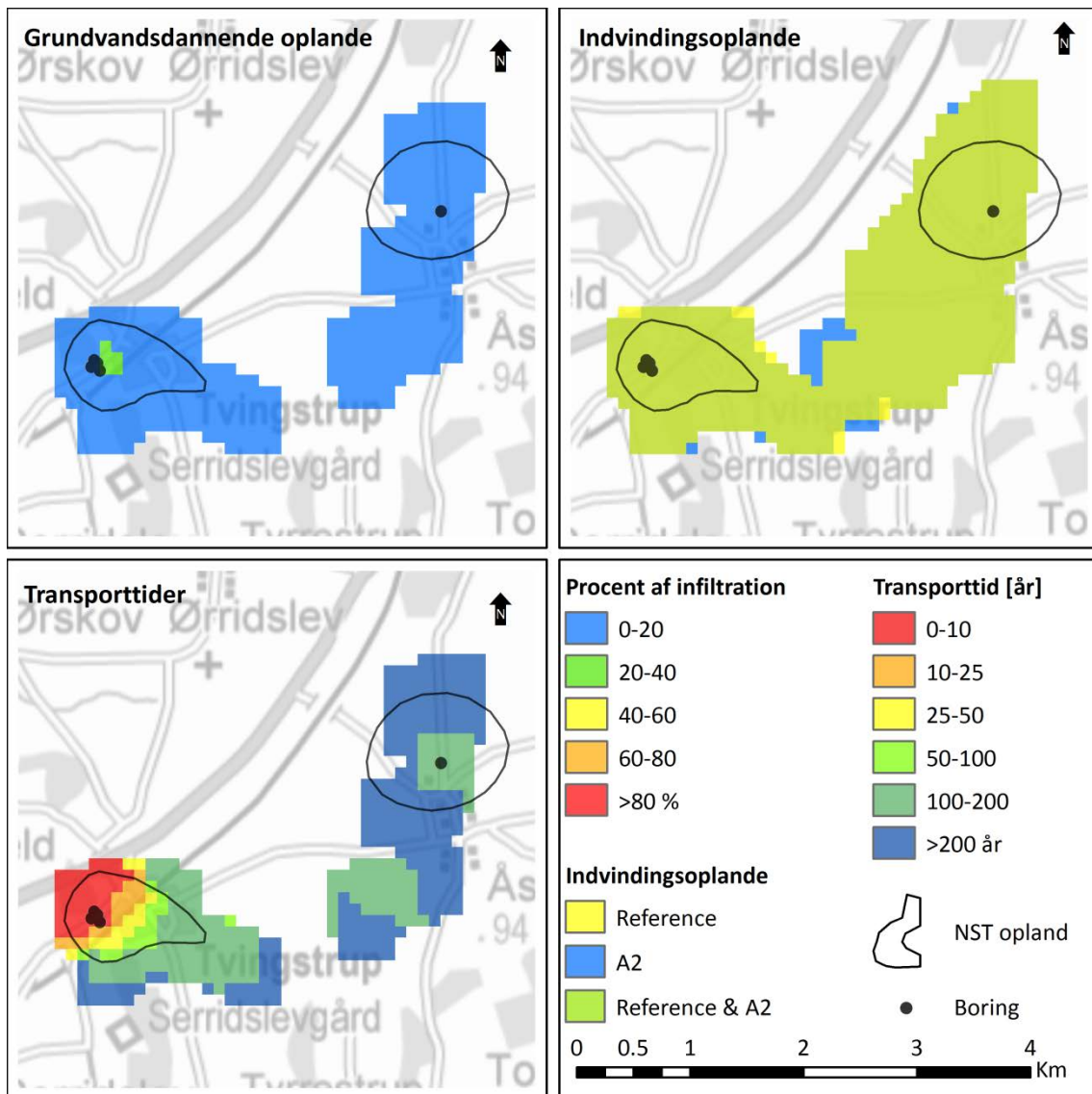


Figur A7 Resultater for A2 scenariet for Bleid vandværk. Bemærk at resultater for grundvandsdannende opland og transporttider i denne og følgende figurer er baseret på A2 scenariet, og ikke er baseret på referencescenariet

Af figur A7 ses at A2 scenariet giver sammenlignet med reference scenariet max. forskelle på afgrænsningen af indvindingsoplande svarende til lokalt ca. 3 grids (~ 300 meter), men lokalt. For Bleid VV ses ikke nogen systematiske forskelle på indvindingsoplande, hvis man sammenligner A2 og A1B (vist i rapporten). Det er ikke helt de samme grids der giver 'blåt' hhv. 'gult' på den tilsvarende figur for A1B vist i rapporten, men der er nogen små forskelle i randzonen.

De sammen små forskelle giver nogen 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 A8 viser et 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 A8 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

Konklusion: A2 scenariet giver væsentligt mere markante ændringer i grundvandsspejlet end A1B scenariet, men det har kun meget marginale betydninger for indvindingsoplande mm.

BILAG 1 Oversigt over lithologier i voxelmodellen

2_DS_FIN_01_Smeltevandssand, mindre legemer
5_DV_01_Smeltevandssand, vekslende små lag
7_DL_01_Smeltevandsler
8_ML_01_Moræneler
10_JS_01_Interglacial ferskvandssand
11_ID_01_Interglacial ferskvandsliatom+gytje, kiselgur
15_GS_01_Miocæn glimmersand
17_GL_01_Glimmerler
20_LL_01_Tertiær plastisk ler
21_K_01_Kalk, kridt, kalksten
22_DS_01_Smeltevandssand
23_DS_02_Smeltevandssand
24_DS_03_Smeltevandssand
25_DS_04_Smeltevandssand
26_DS_05_Smeltevandssand
27_DS_06_Smeltevandssand
28_DS_07_Smeltevandssand
29_DS_08_Smeltevandssand
31_DS_10_Smeltevandssand
32_DS_11_Smeltevandssand
33_DS_12_Smeltevandssand
34_DS_13_Smeltevandssand
35_DS_14_Smeltevandssand
36_DS_15_Smeltevandssand
37_DS_16_Smeltevandssand
38_DS_17_Smeltevandssand
39_DS_18_Smeltevandssand
40_DS_19_Smeltevandssand
41_DS_20_Smeltevandssand
42_DS_21_Smeltevandssand
43_DS_22_Smeltevandssand
44_DS_23_Smeltevandssand
45_DS_24_Smeltevandssand
46_DS_25_Smeltevandssand
47_DS_26_Smeltevandssand
48_DS_27_Smeltevandssand
49_DS_28_Smeltevandssand
50_DS_29_Smeltevandssand
51_DS_30_Smeltevandssand
53_DV_02_Smeltevandssand, vekslende små lag
55_DV_04_Smeltevandssand, vekslende små lag
56_DV_05_Smeltevandssand, vekslende små lag
57_DV_06_Smeltevandssand, vekslende små lag
59_DS_32_Smeltevandssand
60_DS_33_Smeltevandssand
61_DS_34_Smeltevandssand
62_DS_35_Smeltevandssand
63_DS_36_Smeltevandssand
64_DS_37_Smeltevandssand
65_DS_38_Smeltevandssand
66_DS_39_Smeltevandssand
67_DL_3_Smeltevandsler
68_DS_40_Sand
69_DS_41_Smeltevandssand
70_DL_4_Smeltevandsler
71_GT_S_Sand_GlacialTektonik
72_GT_L_Ler_GlacialTektonik
73_HX_Postglaciale saltv/ferskv afl.
74_FORKZ_Forkastningszone_fyld_vekslende lag
75_DS_FSV_TERR_Smeltevandssand_FyldSydVest_terræn nær
76_DS_FSV_ML_Smeltevandssand_FyldSydVest_mellem
77_DS_FSV_DYB_Smeltevandssand_FyldSydVest_dyb
203_DS_OVF_ds_ovf: res > 55 ohm mangelag SkyTEM
207_DL_01_Smeltevandsler
210_DV_01_Smeltevandssand, vekslende små lag
225_DS_04_Smeltevandssand
226_DS_05_Smeltevandssand
229_DS_08_Smeltevandssand
230_DS_09_Smeltevandssand
232_DS_11_Smeltevandssand
233_DS_12_Smeltevandssand
234_DS_13_Smeltevandssand
236_DS_15_Smeltevandssand
237_DS_16_Smeltevandssand
250_DL_29_Smeltevandsler
253_DV_301_Smeltevandssand, vekslende små lag
254_DV_302_Smeltevandssand, vekslende små lag

Navngivning af lithologier samt initialparameter skøn

kode	Navn	kh	Kv	sy	ss	Por
2	DS_FIN_01 – Smeltevandssand, mindre legemet	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
5	DV_01 – Smeltevandssand, vekslende små lag	1.00E-05	1.00E-07	0.1	1.00E-04	0.1
7	DL_01 – Smeltevandsler	1.00E-08	1.00E-09	0.1	1.00E-04	0.1
8	ML_01 – Moræneler	1.00E-07	1.00E-08	0.1	1.00E-04	0.1
10	IS_01 – Interglacial ferskvandssand	1.00E-04	1.00E-05	0.1	1.00E-04	0.1
11	ID_01 – Interglacial ferskvandsdiatom+gytje, kiselgur	1.00E-05	1.00E-06	0.1	1.00E-04	0.1
15	GS_01 – Miocæn glimmersand	8.00E-05	8.00E-06	0.1	1.00E-04	0.1
17	GL_01 – Glimmerler	5.00E-08	5.00E-09	0.1	1.00E-04	0.1
20	LL_01 – Tertiær plastisk ler	1.00E-08	1.00E-09	0.1	1.00E-04	0.1
21	K_01 – Kalk, kridt, kalksten	1.00E-04	1.00E-05	0.1	1.00E-04	0.1
22	DS_01 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
23	DS_02 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
24	DS_03 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
25	DS_04 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
26	DS_05 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
27	DS_06 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
28	DS_07 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
29	DS_08 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
31	DS_10 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
32	DS_11 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
33	DS_12 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
34	DS_13 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
35	DS_14 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
36	DS_15 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
37	DS_16 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
38	DS_17 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
39	DS_18 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
40	DS_19 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
41	DS_20 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
42	DS_21 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1

43	DS_22 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
44	DS_23 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
45	DS_24 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
46	DS_25 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
47	DS_26 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
48	DS_27 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
49	DS_28 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
50	DS_29 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
51	DS_30 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
53	DV_02 – Smeltevandssand, vekslende små lag	1.00E-05	1.00E-07	0.1	1.00E-04	0.1
55	DV_04 – Smeltevandssand, vekslende små lag	1.00E-05	1.00E-07	0.1	1.00E-04	0.1
56	DV_05 – Smeltevandssand, vekslende små lag	1.00E-05	1.00E-07	0.1	1.00E-04	0.1
57	DV_06 – Smeltevandssand, vekslende små lag	1.00E-05	1.00E-07	0.1	1.00E-04	0.1
59	DS_32 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
60	DS_33 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
61	DS_34 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
62	DS_35 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
63	DS_36 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
64	DS_37 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
65	DS_38 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
66	DS_39 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
68	DS_40 – Sand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
69	DS_41 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
71	GT_S – Sand glacialteknik	1.00E-05	1.00E-05	0.1	1.00E-04	0.1
72	GT_L – Ler glacialteknik	1.00E-06	1.00E-06	0.1	1.00E-04	0.1
73	HX – postglaciale saltv./ferkskv. aflejninger	1.00E-05	1.00E-06	0.1	1.00E-04	0.1
74	FORKZ – Forkastningszone fyld vekslende lag	1.00E-05	1.00E-05	0.1	1.00E-04	0.1
75	DS_FSV_TERR - Smeltevandssand fyld sydvest ter.nær.	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
76	DS_FSV_ML – Smeltevandssand fyld sydvest mellem	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
77	DS_FSV_DYB – Smeltevandssand fyld syd vest dyb	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
78	DS_OVF – ds overflade: res > 55 ohm mangelag SkyTEM	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
79	DV_07 – Smeltevandssand, vekslende små lag	1.00E-05	1.00E-07	0.1	1.00E-04	0.1

80	DV_08 – Smeltevandssand, vekslende små lag	1.00E-05	1.00E-07	0.1	1.00E-04	0.1
81	DV_09 – Smeltevandssand, vekslende små lag	1.00E-05	1.00E-07	0.1	1.00E-04	0.1
82	DS_42 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
83	DS_43 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
84	DS_44 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
85	DS_45 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
86	DS_46 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
87	DS_47 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
88	DS_48 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
89	DS_49 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
90	DS_50 – Smeltevandssand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
99	Hav	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
111	j25_sand	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1
112	j25_ler	1.00E-05	1.00E-07	0.1	1.00E-04	0.1
113	j25_toerv	1.00E-05	1.00E-06	0.1	1.00E-04	0.1
999	Dummy	1.00E-03	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1

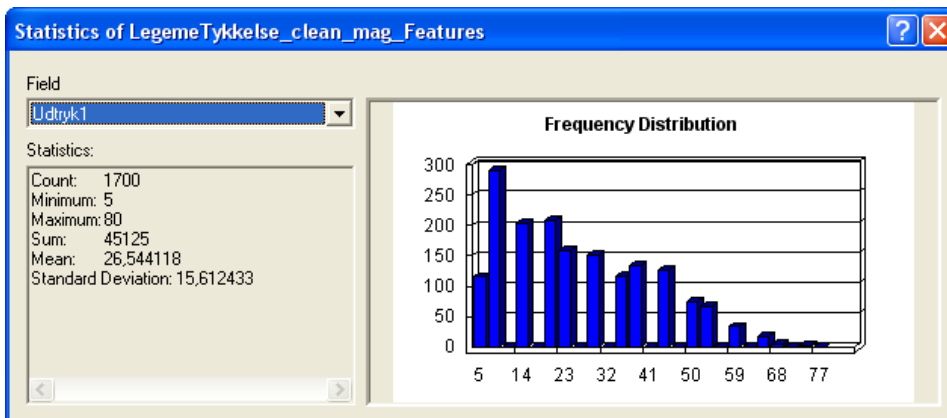
BILAG 2 INDVINDINGSDATA

Fordeling af indvindinger ved kildepladser på enkeltboringer boringer i m³/år (2005-07)

novana_id	x	y	z	wellfield	koteTop	koteBund	no	Navn	I alt	m3/år
72296_98.628_1	558926	6201496	92,5	72296	40,5	28	774	Hovedgaard	120000	30000
72296_98.629_1	558996	6201507	94	72296	37	17	775			30000
72296_98.746_1	559255	6201398	82,5	72296	-12,5	-23	776			30000
72296_98.974_1	559036	6201451	90	72296	34	22	777			30000
72297_98.1226_1	557189	6201063	77,5	72297	53,5	49,5	1028	Gl. Katrupvej	27000	9000
72297_98.571_1	557189	6201063	77,5	72297	52,5	48,5	1026			9000
72297_98.572_1	557189	6201063	77,5	72297	53	49	1027			9000
72322_107.1367_1	554182	6196557	58,2	72322	-20,3	-44	814	Højballegaard	3000000	176470
72322_107.1443_1	554106	6196536	58	72322	-28,2	-52	815			176470
72322_107.1455_1	554234	6196709	57	72322	-2	-35	816			176470
72322_107.1467_1	554672	6196781	64,2	72322	-55,8	-68	817			176470
72322_107.1473_1	554031	6196680	56,2	72322	4,2	-20	818			176470
72322_107.1492_1	554108	6196865	58,9	72322	6,9	-5,1	819			176470
72322_107.590_1	553984	6196704	56,84	72322	3,84	-6,2	803	Bor. 60		176470
72322_107.591_1	554234	6196709	55,44	72322	-10,6	-31	804	Bor. 63		176470
72322_107.654_1	554686	6196699	62	72322	-56,5	-80	805	Bor. 64		176470
72322_107.655_1	554480	6196687	62,14	72322	-1,86	-32	806	Bor. 65		176470
72322_107.688_1	554110	6196847	57,5	72322	8	-4	807			176470
72322_107.704_1	554651	6196693	62,24	72322	2,74	-20	808	Bor. 68		176470
72322_107.719_1	554367	6196688	58,74	72322	-6,26	-35	809	Bor. 69		176470
72322_107.733_1	554571	6196689	61,44	72322	-5,56	-31	810	Bor. 70		176470
72322_107.738_1	554654	6196818	64,14	72322	-55,9	-68	811	Bor. 71		176470
72322_107.800_1	554984	6197018	60	72322	-69	-89	812	Bor. 73		176470
72322_107.873_1	554730	6196647	64,73	72322	-55,3	-90	813	Bor. 74		176470
72329_107.1216_1	553242	6195282	8,44	72329	-55,1	-76	690	Hansted-Egebjerg	23000	23000
72376_107.1199_1	557449	6196629	55,44	72376	16,9	12,9	1831	Tvingstrup	30000	7500
72376_107.180_1	557423	6196571	55	72376	15,5	11	1828			7500
72376_107.895_1	557476	6196603	57	72376	-4	-18	1829			7500
72376_107.929_1	557499	6196537	56,19	72376	18,7	12,7	1830			7500
72377_107.874_1	560507	6197940	67,5	72377	25,5	19,5	1976	Åes	29000	29000
73937_107.701_1	555605	6197683	75	73937	8	-21	199	Bled	22000	22000
74466_107.1210_1	552583	6198853	65	74466	28	10	574	Gedved	160000	40000
74466_107.427_1	552669	6198767	66	74466	22	17	571			40000
74466_107.784_1	552662	6198759	66	74466	20	12	572			40000
74466_107.915_1	552700	6198770	64,72	74466	21,2	13,2	573			40000
80207_98.101_1	552934	6203898	123	80207	105	100	1480	Riis og Ejer	70000	14000
80207_98.537_1	552973	6203869	126	80207	105	100	1481			14000
80207_98.667_1	552801	6203929	127,5	80207	102	97,8	1482			14000
80207_98.942_1	552989	6203886	125	80207	53	41	1484			14000
80207_98.942_2	552989	6203886	125	80207	81	69	1483			14000
80210_98.482_1	554736	6203520	82	80210	-2	-10	1677	Tebstrup	65000	32500
80210_98.528_1	554720	6203522	82	80210	3	-2	1678			32500

BILAG 3 Gruppering af k-værdier for vandførende lag

T-værdier fra området er bearbejdet ved i Geoscene at bestemme gennemsnitstykkelsen på de lithologiske enheder (magasiner, Fig. B1) der er lavet prøvepumpning i og herudfra at vurdere hydraulisk ledningsevne (k-værdi) for hver enkelt af de vandførende lithologier, i forhold til fem klasser: Lav, Lav til middel, Middel, Middel til høj og Høj. Desuden er der på boringsjournaler foretaget en vurdering af filterbeskaffenhed (mest længde), samt sænking i det pågældende filter. Det har ført til en endelig indplacering i de fem forskellige k-værdi klasser, hhv. Lav, Lav til middel, Middel, Høj og Meget høj (Tabel B1).

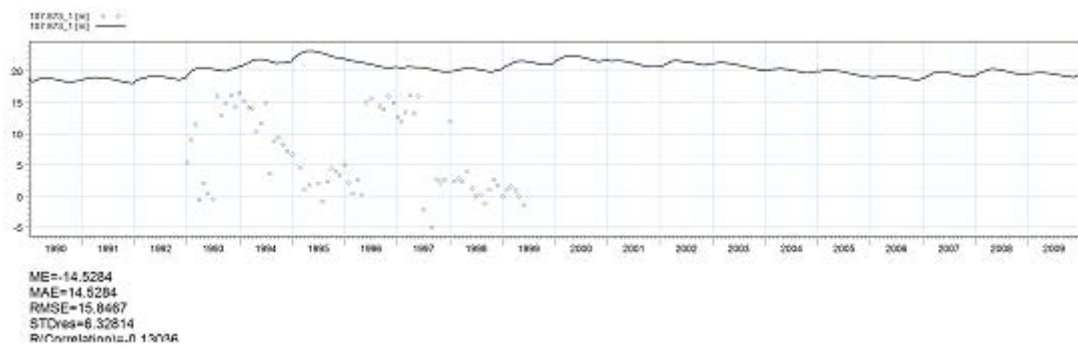
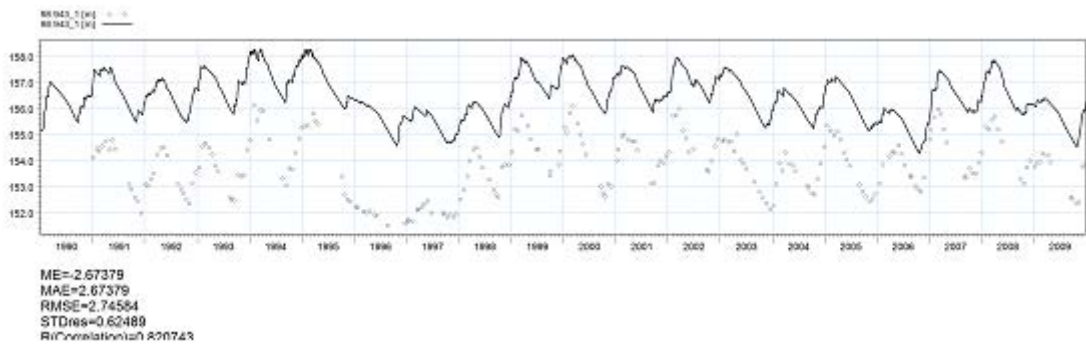
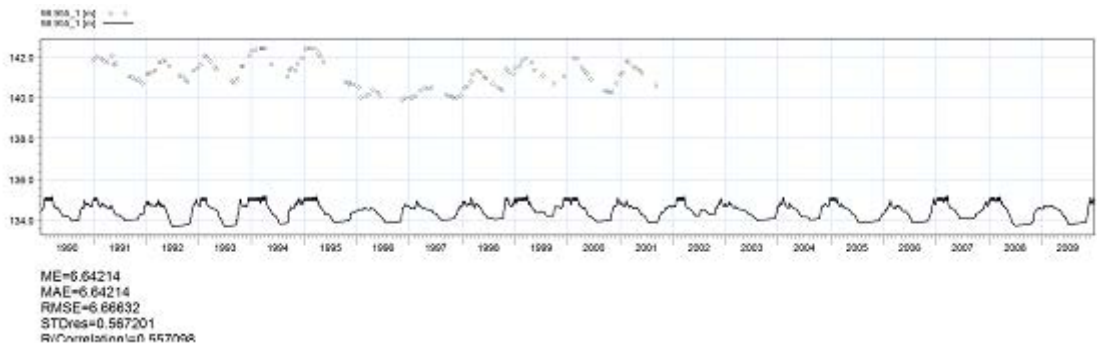
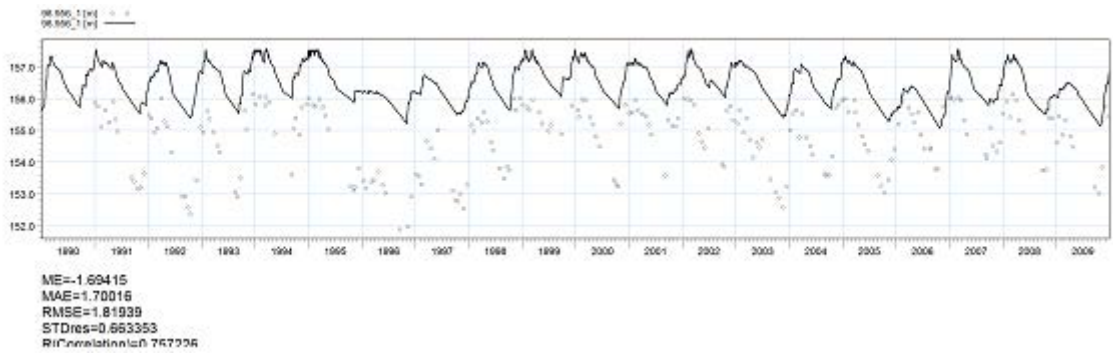


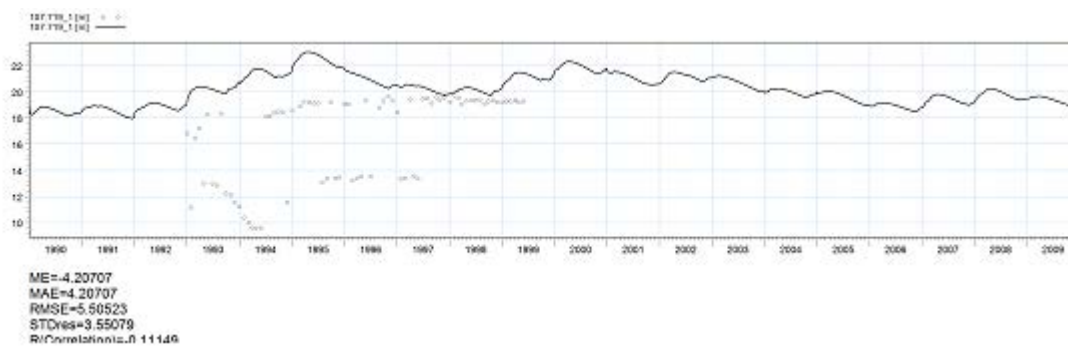
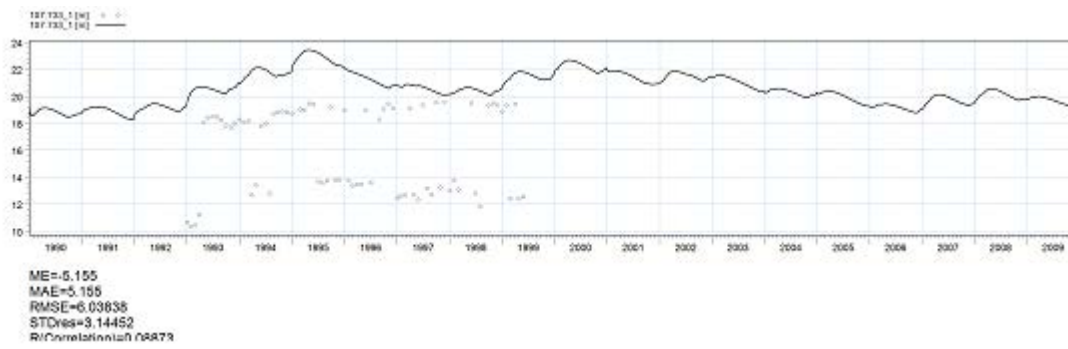
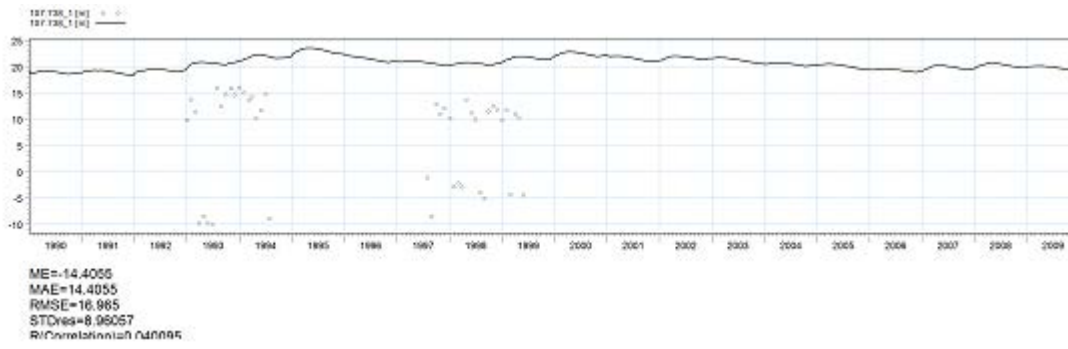
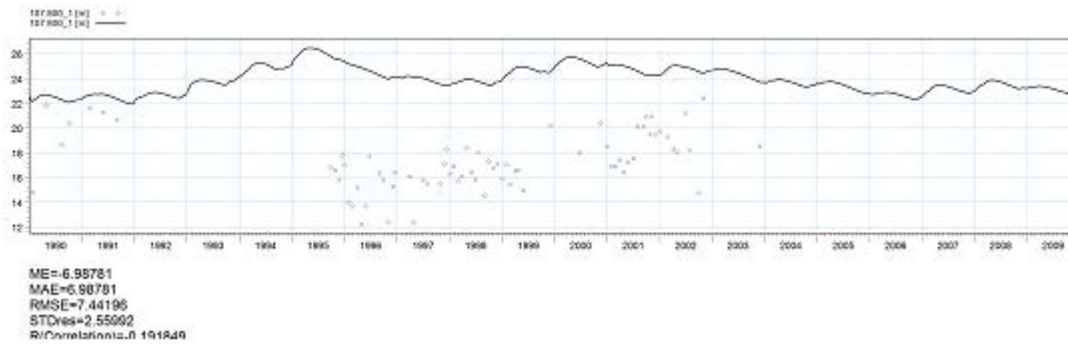
Figur B1 Eksempel på analyse af tykkelse af lithologi nr. 32 (gennemsnitstykkelse 27 meter)

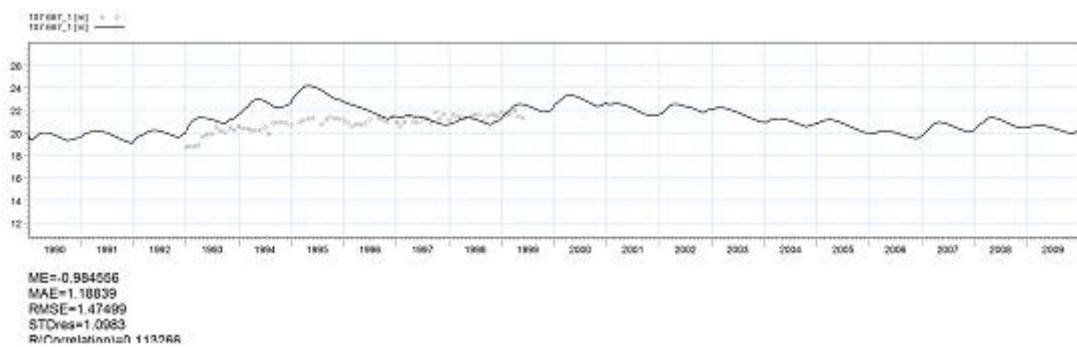
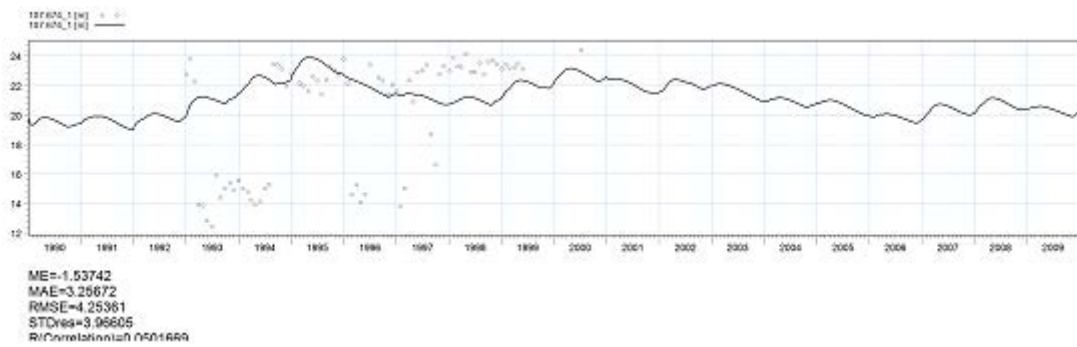
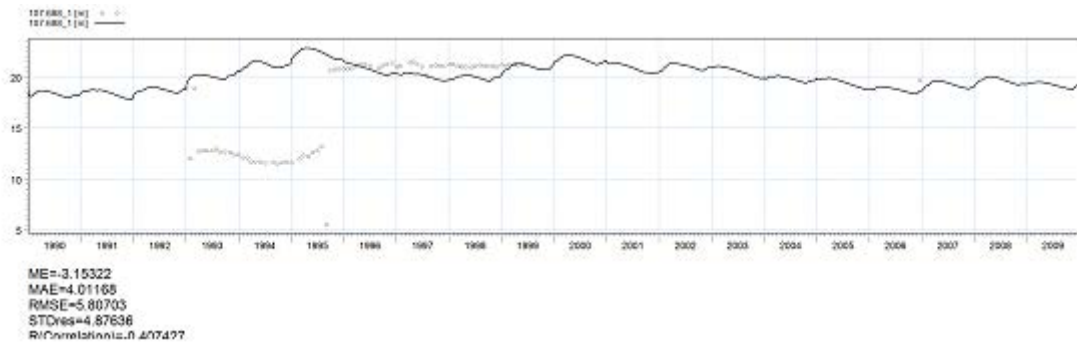
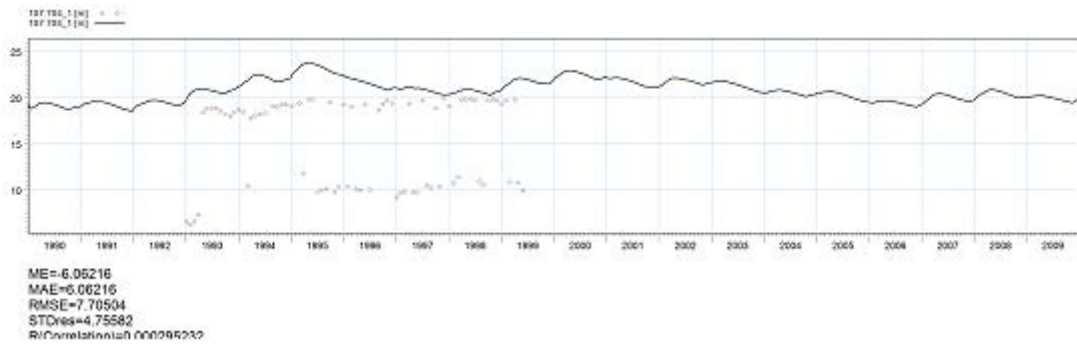
GEUS har ud fra denne analyse foretaget en klassificering af hydrauliske ledningsevner som vist i tabel B1 Klassificering af hydraulisk ledningsevne for vandførende lag magasiner (lithologier) på basis af T-værdier (m^2/s) analyse og vurdering af hydrauliske egenskaber samt lavtykkelser i voxelmodellen.

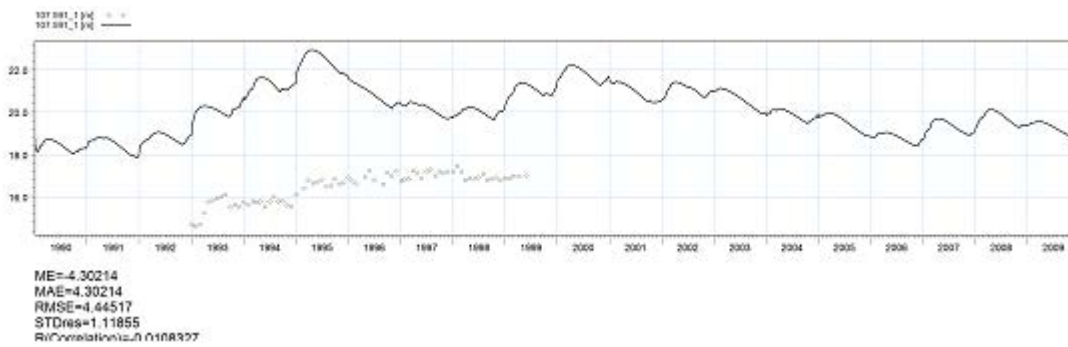
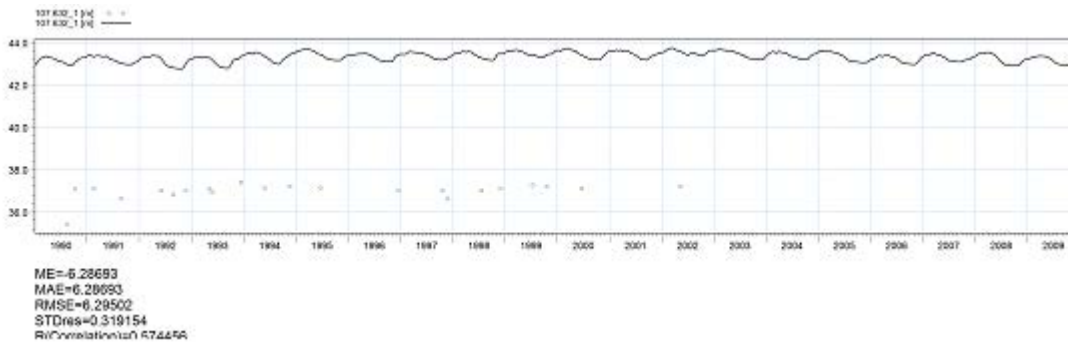
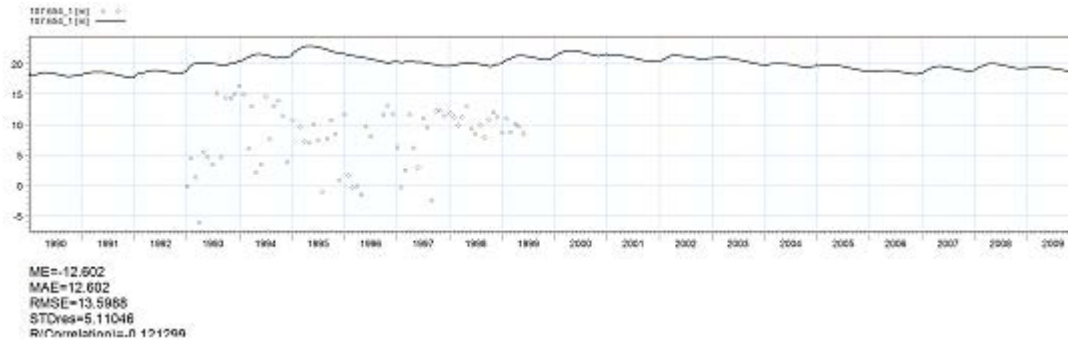
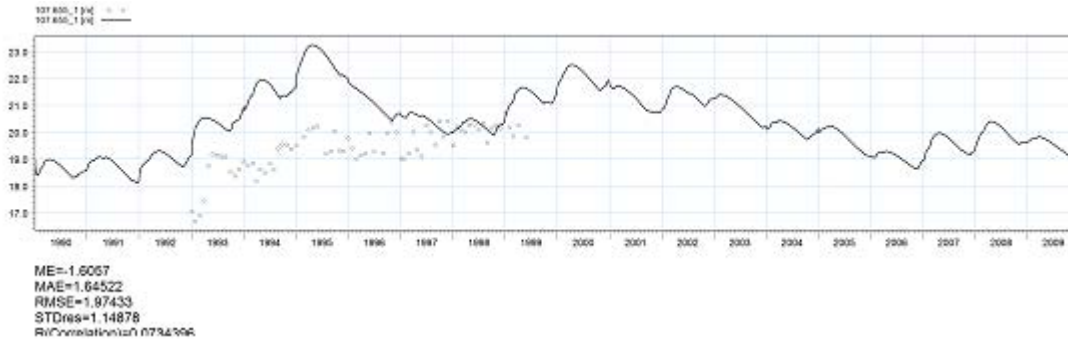
Tabel B1 Klassificering af hydrauliske ledningsevner for vandførende enheder

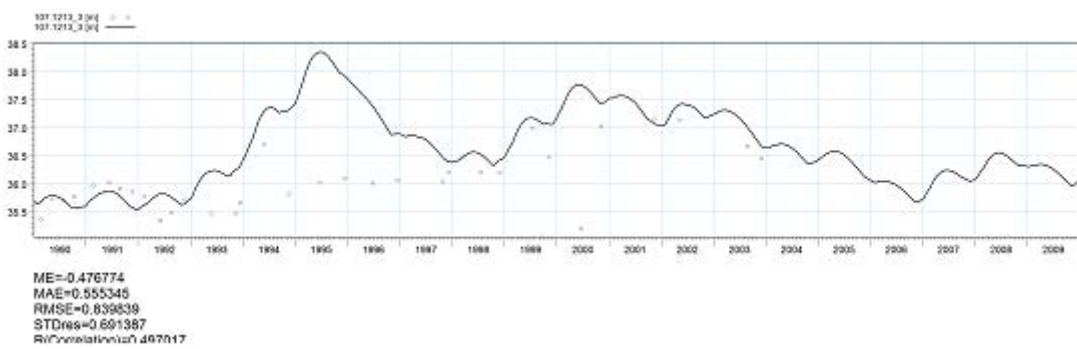
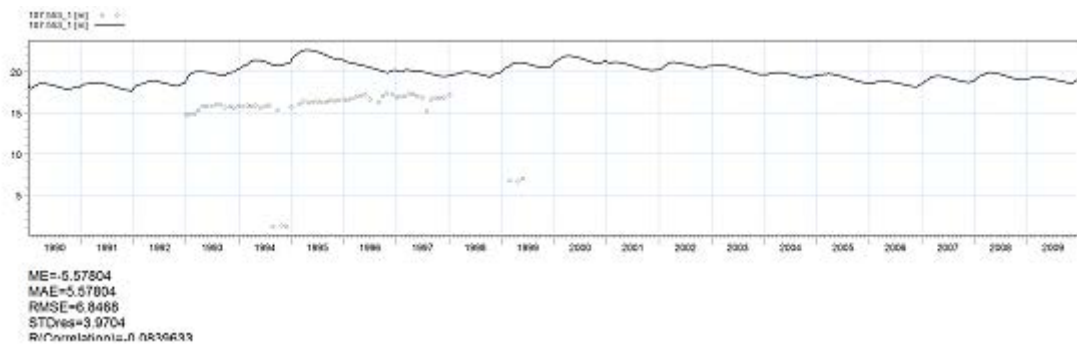
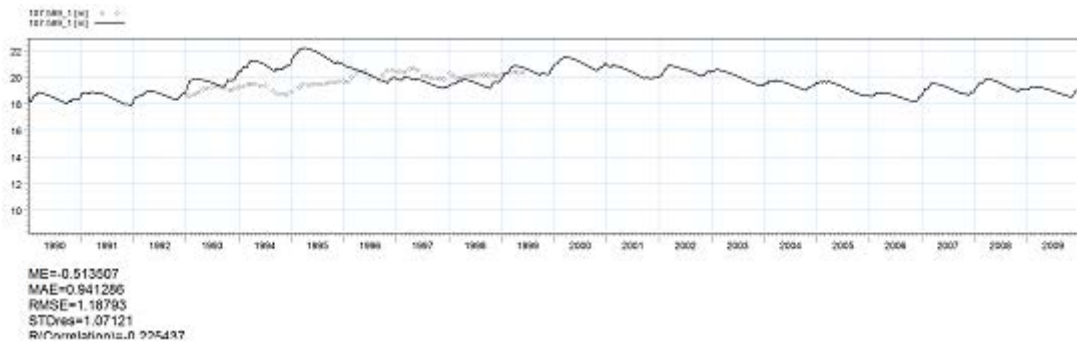
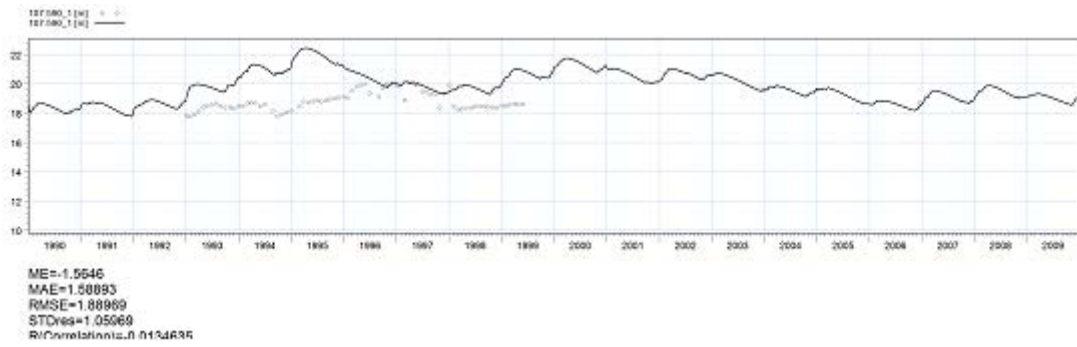
Enheder som vurderes at kunne slås sammen mht. in- vers kalibrering	Vurderet strømning	T-værdi grunddata
74, 78 til 81, 83, 86 til 90	Lav	
22, 25, 26, 28, 29, 31, 36, 37, 38, 47 til 51, 53, 55, 56, 57	Lav til middel	
27, 35, 39 til 46, 59 til 69, 71, 72, 75, 78 til 90,	Middel	
23, 24, 77	Middel til høj	
33, 82, 84, 85	Høj	33: $6,2 \cdot 10^{-3}$
32, 34, 76	Meget høj	32: $1,6 \cdot 10^{-2}$ 34: $1,5 \cdot 10^{-2}$

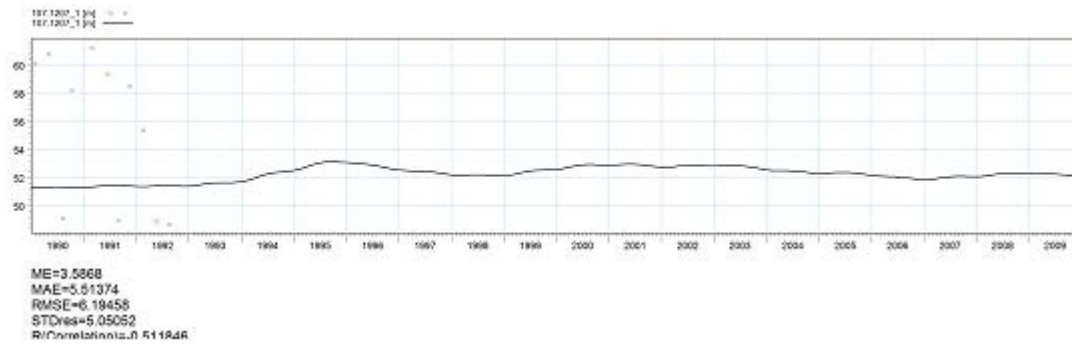
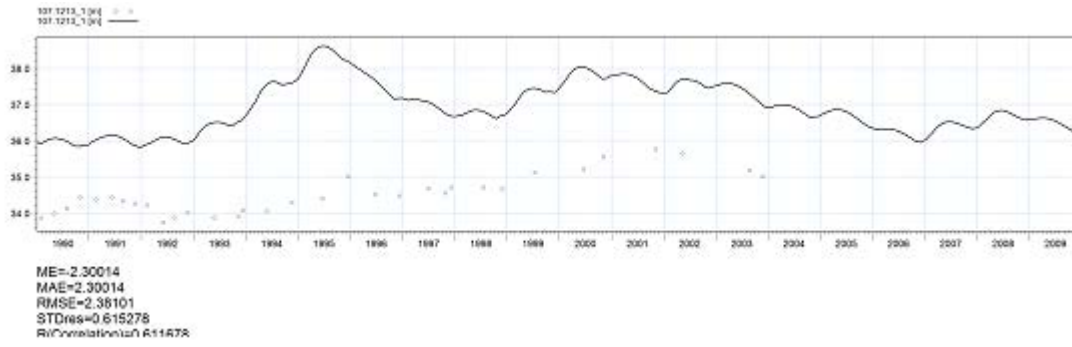
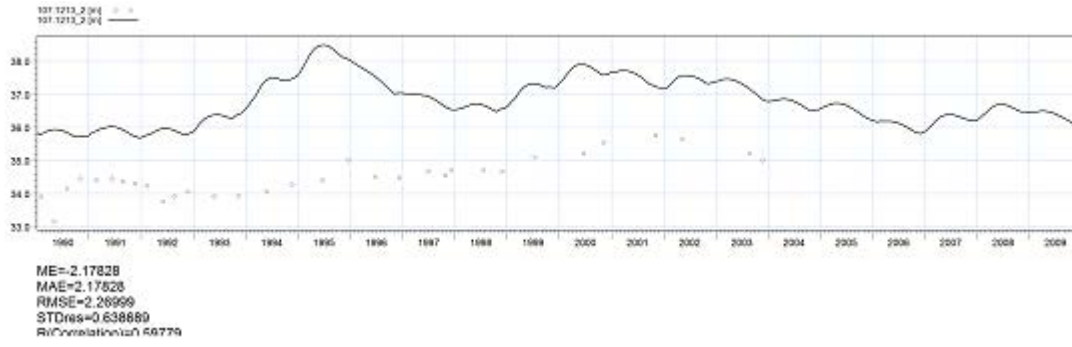












BILAG 5 Kalibrerings parameter

OPTIMISATION RESULTS

Adjustable parameters ----->

Parameter	Estimated value	95% percent confidence limits	
		lower limit	upper limit
ds00_kh	3.872006E-05	1.758720E-05	8.524625E-05
gl100_kh	7.992278E-07	3.320061E-08	1.923956E-05
ml100_kh	1.000000E-08	4.406670E-09	2.269287E-08
dl100_kh	1.000000E-04	2.099356E-05	4.763365E-04
drain_const	7.858419E-08	1.107515E-08	5.575974E-07
leak1	3.801520E-08	1.922508E-09	7.517032E-07

Tied parameters ----->

Parameter	Estimated value
ds12_kh	3.872006E-05
ds21_kh	1.163920E-04
ds22_kh	1.163920E-04
ds23_kh	1.163920E-04
ds31_kh	2.323203E-04
ds32_kh	2.323203E-04
ds33_kh	2.323203E-04
ds34_kh	2.323203E-04
ds35_kh	2.323203E-04
ds36_kh	2.323203E-04
ds41_kh	3.487124E-04
ds42_kh	3.487124E-04
ds51_kh	4.637133E-04
ds52_kh	4.637133E-04
ds61_kh	5.796416E-04
ds62_kh	5.796416E-04
ds63_kh	5.796416E-04
dv21_kh	4.229065E-05
dv22_kh	4.229065E-05
gs00_kh	7.992278E-05
j25l_kh	1.000000E-06
j25s_kh	3.872006E-05
ml101_kh	1.000000E-08
fz21_kh	1.582524E-07
fz31_kh	1.582524E-06
fz41_kh	1.582524E-05
ds00_kv	3.872006E-06
ds12_kv	3.872006E-06
ds21_kv	1.163920E-05
ds22_kv	1.163920E-05
ds23_kv	1.163920E-05
ds31_kv	2.323203E-05
ds32_kv	2.323203E-05
ds33_kv	2.323203E-05
ds34_kv	2.323203E-05
ds35_kv	2.323203E-05
ds36_kv	2.323203E-05

ds41_kv	3.487124E-05
ds42_kv	3.487124E-05
ds51_kv	4.637133E-05
ds52_kv	4.637133E-05
ds61_kv	5.796416E-05
ds62_kv	5.796416E-05
ds63_kv	5.796416E-05
dv21_kv	4.229065E-06
dv22_kv	4.229065E-06
gl00_kv	7.992278E-08
gs00_kv	7.992278E-06
j251_kv	1.000000E-08
j25s_kv	3.872006E-06
m100_kv	1.000000E-09
m101_kv	1.000000E-09
fz21_kv	1.582524E-08
fz31_kv	1.582524E-07
fz41_kv	1.582524E-06
dl00_kv	1.000000E-05

Fixed parameters ----->

Parameter	Fixed value
hx00_kh	1.470000E-05
ik00_kh	1.000000E-05
j25t_kh	1.470000E-05
l100_kh	1.000000E-10
hx00_kv	1.470000E-06
ik00_kv	1.000000E-06
j25t_kv	1.470000E-06
l100_kv	1.000000E-10
ds_sy	0.100000
gl_sy	0.100000
gs_sy	0.100000
j251_sy	0.100000
j25s_sy	0.100000
j25t_sy	0.100000
m1_sy	0.100000
oa_sy	0.100000
ds_ss	1.000000E-04
gl_ss	1.000000E-04
gs_ss	1.000000E-04
j251_ss	1.000000E-04
j25s_ss	1.000000E-04
j25t_ss	1.000000E-04
m1_ss	1.000000E-04
oa_ss	1.000000E-04
ds_por	0.100000
gl_por	0.100000
gs_por	0.100000
j251_por	0.100000
j25s_por	0.100000
j25t_por	0.100000
m1_por	0.100000
oa_por	0.100000
drain_level	-0.500000
det_stor	11.0000
et_surf_dept	0.100000
ol_manning	5.00000

BILAG 6 Analyse af korrelation mellem parametre (invers 08)

Frie parameter:

ds00_kh: smeltevandssand
gl00_kh: glimmerler
ml00_kh: moræneler
dl00_kh: smeltevandsler
drain_const: dræn tidsskonstant
leak_1: vandløbslækage

Resultat er korrelationsanalysen:

Inv08optim	ds00_kh	gl00_kh	ml00_kh	dl00_kh	drain_const	leak1
ds00_kh	1	0.4096	0.6078	7.16E-02	-0.3333	-0.5134
gl00_kh	0.4096	1	0.4188	0.3355	-0.5555	-0.7885
ml00_kh	0.6078	0.4188	1	0.2862	-0.2594	-0.5682
dl00_kh	7.16E-02	0.3355	0.2862	1	0.4511	-7.89E-02
drain_const	-0.3333	-0.5555	-0.2594	0.4511	1	0.8425
leak1	-0.5134	-0.7885	-0.5682	-7.89E-02	0.8425	1

Kravværdi:

Korrelationen skal være < -0.95

BILAG 7 Kalibreringsresultat

	Station	R2	Fbal	MFbal_060708
inv08optim	270004	0.46	5.13	11.51

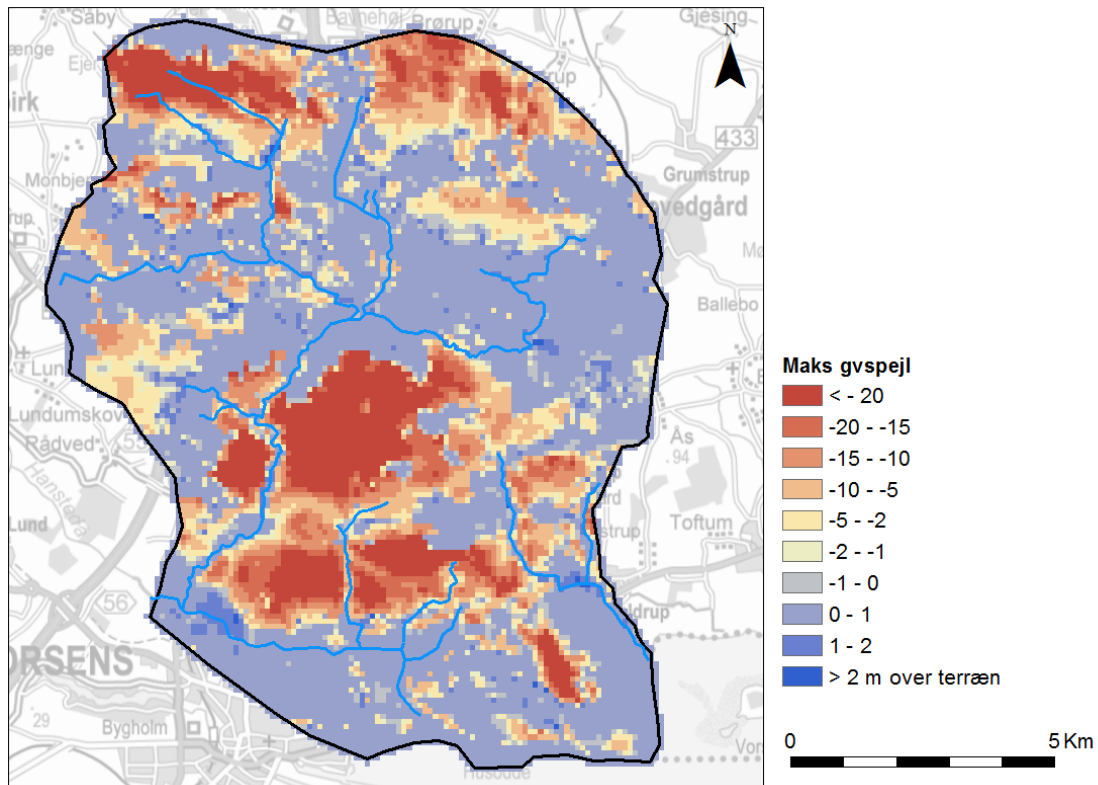
Kalibreringsresultat (invers08opim)

Layer	#obs used	obs total	Inv01optim RMSE	inv08optim RMS
1	14	14	3.63	3.38
2	12	12	5.57	7.39
3	17	17	9.82	9.85
4	11	11	9.76	7.66
5	10	10	5.08	6.18
6	8	8	9.22	15.78
7	7	7	7.34	11.15
8	2	2	2.81	10.32
9	4	4	17.99	11.10
10	3	3	3.99	2.81
11	2	2	3.05	4.49
12	4	4	14.73	22.15
15	1	1	5.62	4.24
16	2	2	3.94	3.11
18		0		
19	1	1	2.09	2.13
20	1	1	2.39	1.83
23	1	1	5.49	6.90
24	1	1	1.31	3.38
			7.40	8.41

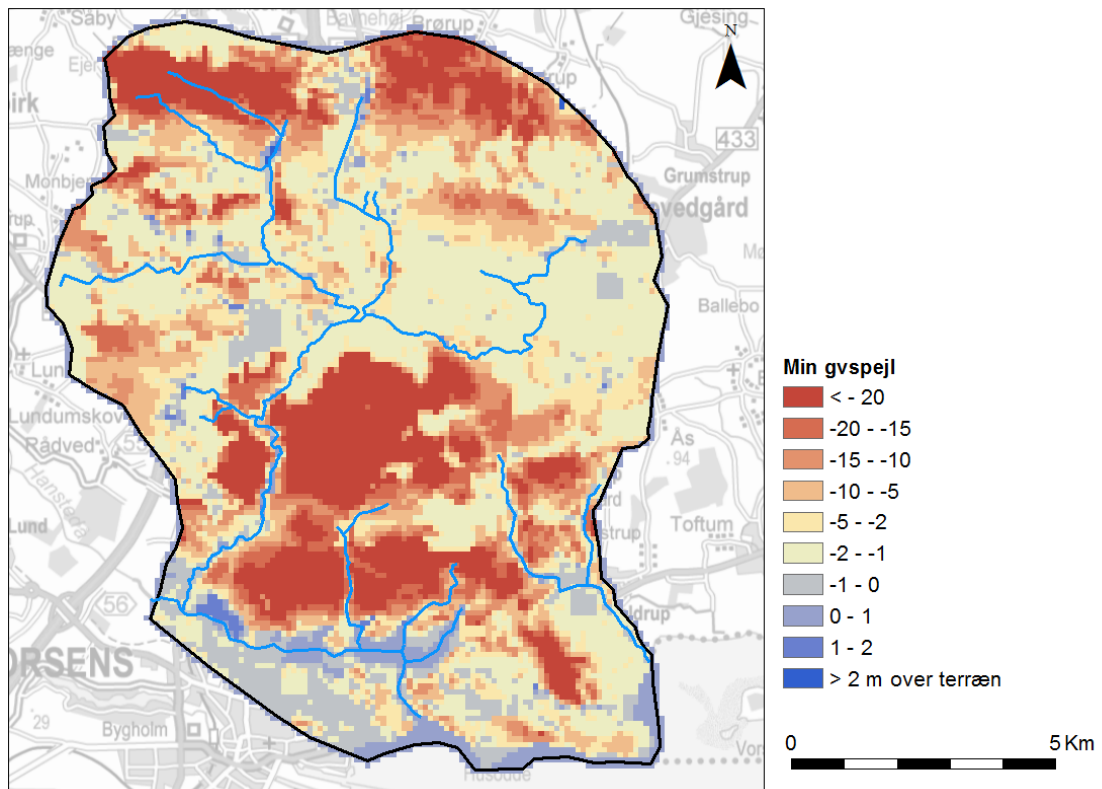
RMS,synkp	9.47	8.27
RMS,Alle	8.64	9.54
ME:	0.3	-3.3

BILAG 9 Ændret dybde til grundvandsstand (max og min ændringer)

På figur B9.1 er vist den maksimale og figur B9.2 den minimale dybde til grundvandspejlet i perioden 1991-2009. Ved maksimalt grundvandspejl står grundvandet i en stor del af modelområdet lidt over terrænniveau (0-1 m) ved maksimal grundvandstand, og (1-2 m) under terræn ved minimumssituationen.



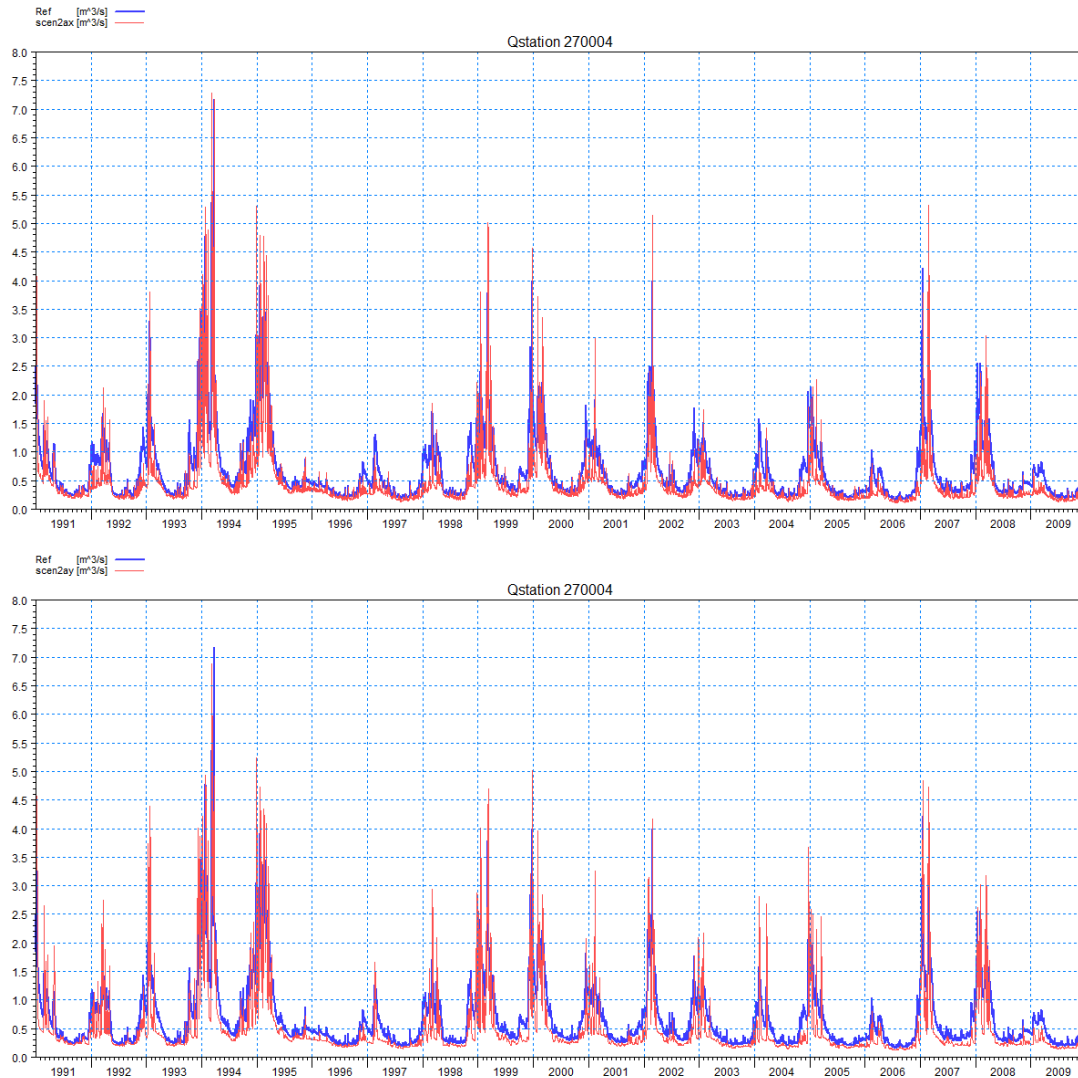
Figur B9.1 Maksimum grundvandspejl (reference scenarie)



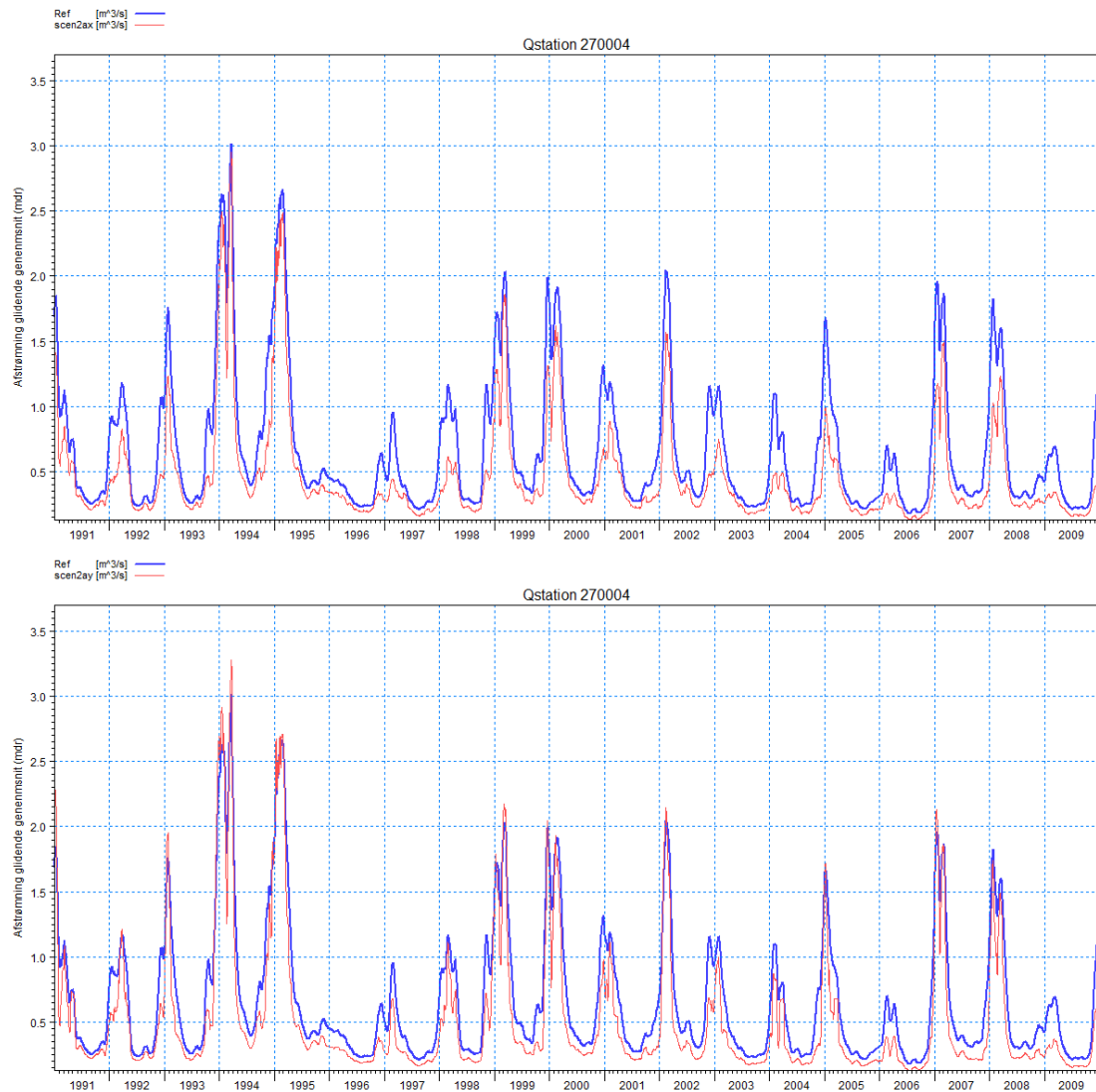
Figur B9.2 Minimum grundvandsspejl (reference scenarie)

BILAG 10 Følsomhedsanalyser dræn

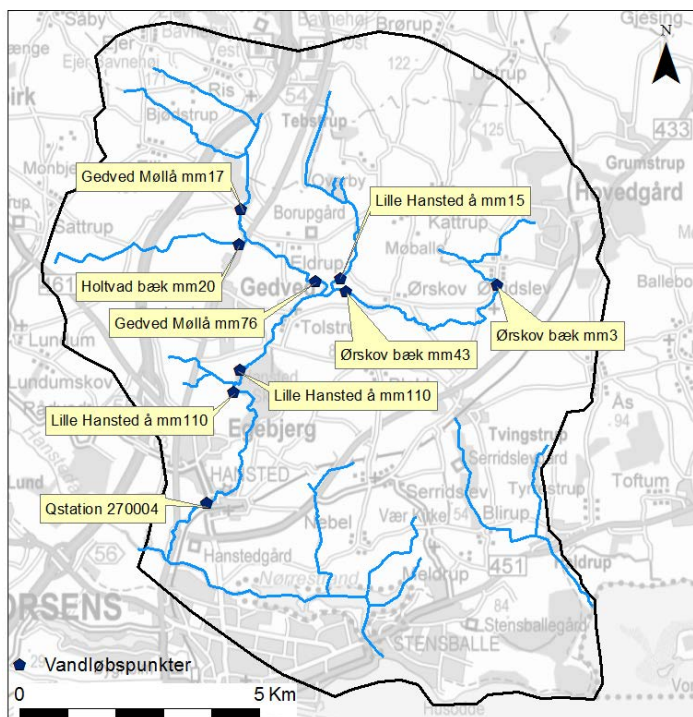
Alternative dræningsopsætninger



Figur B10.1 Simulerede daglige vandføringer for referencekørsel (blå) sammenlignet og med hhv. lav dræntidskonstant (rød/øverst, scenarie 2AX) og høj dræntidskonstant (rød/nederst, scenarie 2AY)



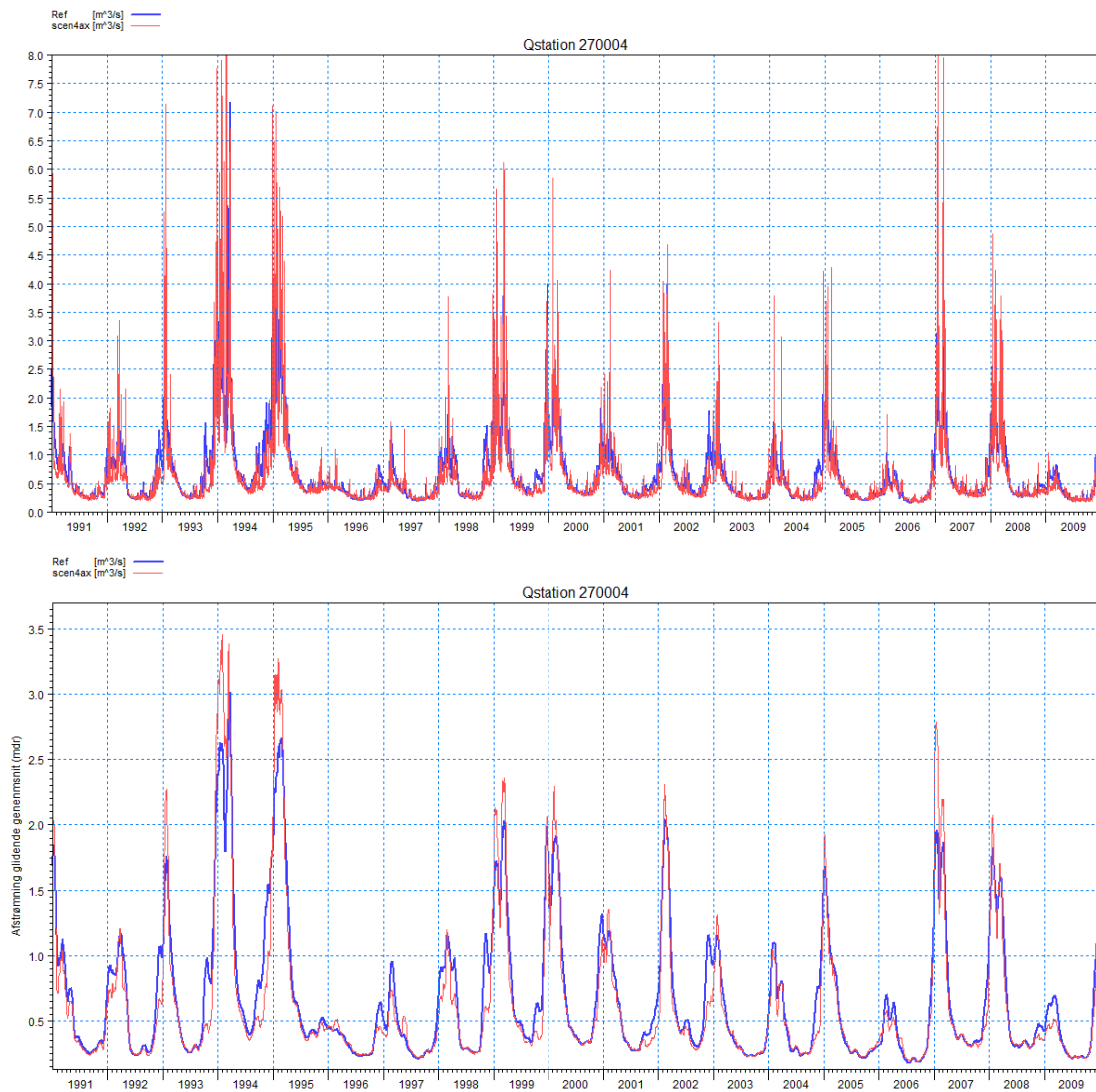
Figur B10.2 Simulerede glidende månedsvandføringer for referencekørsel (blå) sammenlignet og med hhv. lav dræntidskonstant (rød/øverst, scenarie 2AX) og høj dræntidskonstant (rød/nederst, scenarie 2AY)



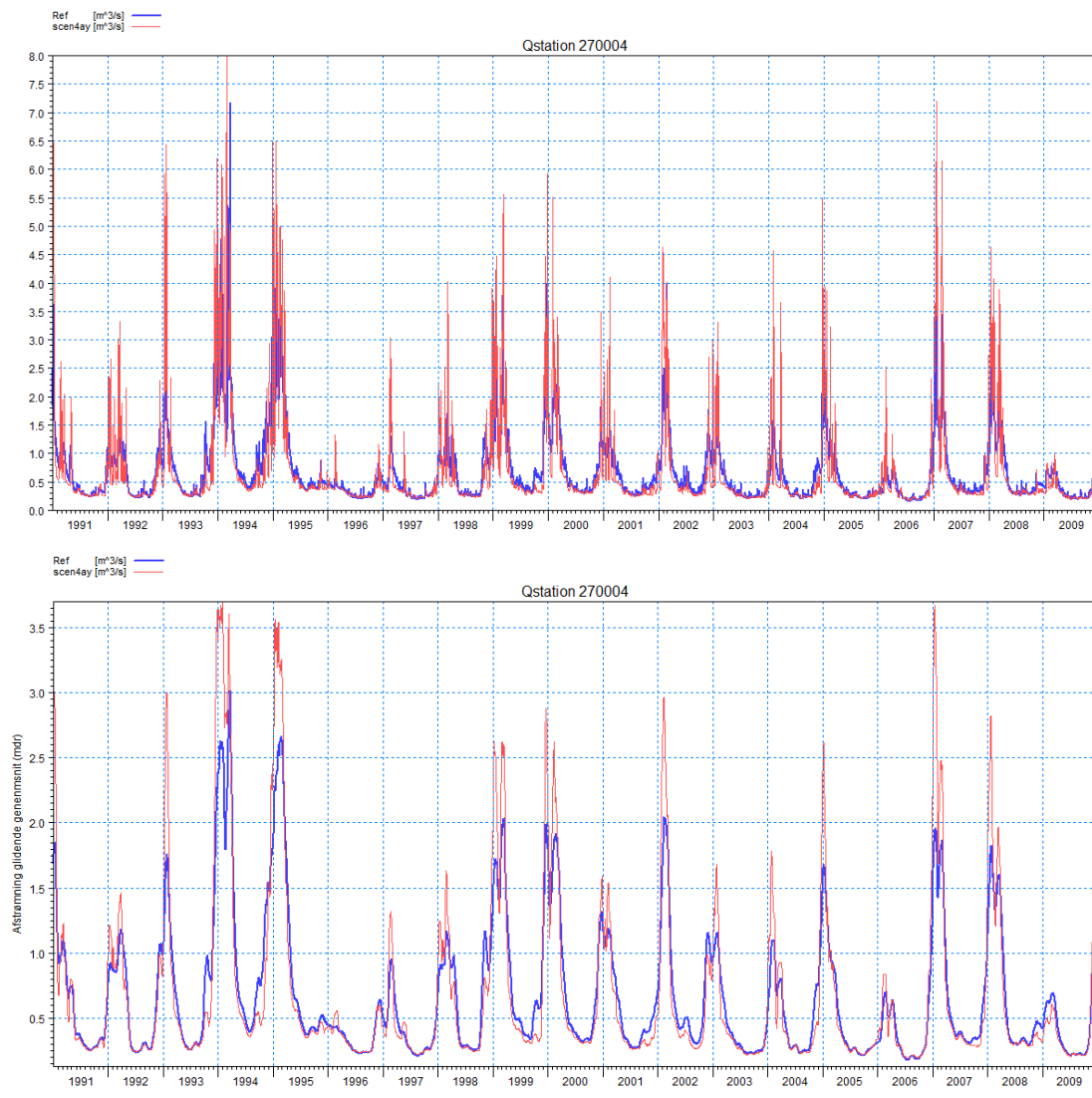
		Lille	Lille	Lille	Gedved	Gedved	Ørskov	Ørskov	Holtvad	Fiske-
SCE-	Qstati-	Han-	Han-	Han-	Gedved	Gedved	Ørskov	Ørskov	Holtvad	Fiske-
NARIE	on	sted	sted	sted	Mølleå	Mølleå	bæk	bæk	bæk	bæk
2AX	270004	mm110	mm111	mm15	mm17	mm76	mm3	mm43	mm20	udløb
middel	459	355	375	74	66	138	55	106	56	4
99%	3001	2729	2821	450	223	748	497	1182	418	21
95%	1273	1085	1131	206	134	355	206	419	176	12
90%	796	635	675	134	105	242	116	200	109	9
50%	308	213	228	49	55	99	25	42	33	2
10%	186	122	129	28	38	60	11	18	15	1
5%	167	108	114	25	34	53	9	15	14	1
1%	139	90	94	21	28	44	7	12	12	1

		Lille	Lille	Lille	Gedved	Gedved	Ørskov	Ørskov	Holtvad	Fiske-
SCE-	Qstati-	Han-	Han-	Han-	Gedved	Gedved	Ørskov	Ørskov	Holtvad	Fiske-
NARIE	on	sted	sted	sted	Mølleå	Mølleå	bæk	bæk	bæk	bæk
2AY	270004	mm110	mm111	mm15	mm17	mm76	mm3	mm43	mm20	udløb
middel	517	407	438	89	70	159	69	124	70	11
99%	3487	3165	3331	602	297	969	695	1311	538	98
95%	1952	1722	1823	340	171	536	376	707	286	49
90%	1097	935	997	193	115	319	189	343	158	24
50%	294	199	220	50	54	100	19	32	35	5
10%	187	123	134	31	40	66	8	13	21	3
5%	170	111	121	27	37	61	7	12	19	3
1%	145	95	103	22	34	53	6	9	17	3

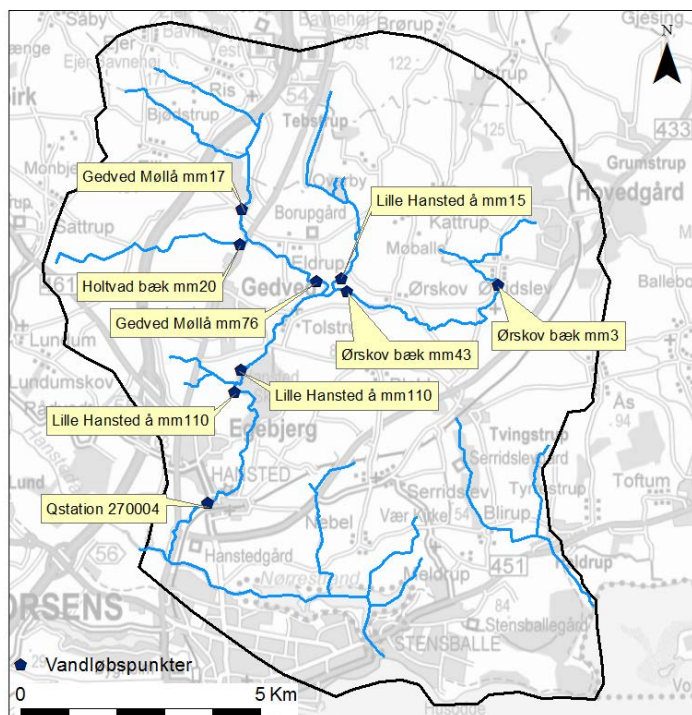
Figur B10.3 Simulerede fraktilværdier for hhv. lav (scenarie 2AX) og høj (scenarie 2AY) dræntidskonstant for 1991-2009 for nuværende klima



Figur B10.4 Simulerede daglige og glidende månedsvandføringer for referencekørsel (blå) sammenlignet med lav dræntidskonstant for et fremtidigt klima (scenarie 4AX)



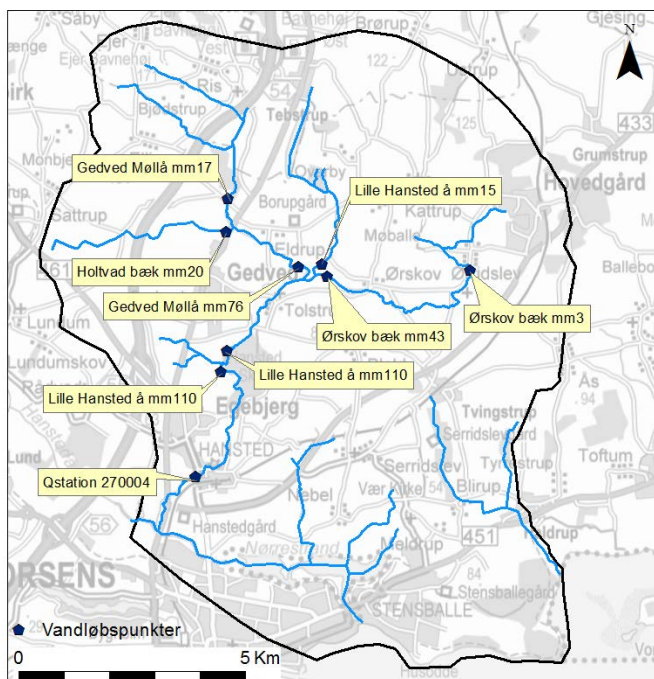
Figur B10.5 Simulerede daglige og glidende månedsvandføringer for referencekørsel (blå) sammenlignet med lav dræntidskonstant for et fremtidigt klima (scenarie 4AY)



		Lille Hansted å mm110	Lille Hansted å mm111	Lille Hansted å mm15	Gedved Mølleå mm17	Gedved Mølleå mm76	Ørskov bæk mm3	Ørskov bæk mm43	Holtvad bæk mm20	Fiskebæk udløb
SCE-NARIE 4AX	Qstation 270004									
middel	633	496	526	100	85	184	79	161	78	6
99%	4188	3819	3928	634	315	1068	676	1665	591	47
95%	1943	1697	1777	300	181	516	339	712	260	17
90%	1172	970	1028	190	135	336	183	349	158	13
50%	399	274	297	65	69	126	33	57	44	3
10%	239	154	165	36	47	74	16	28	19	1
5%	223	143	151	33	42	67	14	25	17	1
1%	195	123	130	28	36	57	11	20	15	1

		Lille Hansted å mm110	Lille Hansted å mm111	Lille Hansted å mm15	Gedved Mølleå mm17	Gedved Mølleå mm76	Ørskov bæk mm3	Ørskov bæk mm43	Holtvad bæk mm20	Fiskebæk udløb
SCE-NARIE 4AY	Qstation 270004									
middel	700	557	600	123	91	211	96	178	95	16
99%	4566	4198	4399	797	386	1275	926	1762	696	136
95%	2653	2361	2487	468	241	758	506	969	402	73
90%	1695	1466	1557	297	165	476	298	559	244	43
50%	375	251	280	67	67	123	25	44	43	7
10%	240	154	172	41	50	81	10	19	25	4
5%	224	144	160	38	47	76	9	18	24	4
1%	203	129	144	33	44	69	8	15	21	4

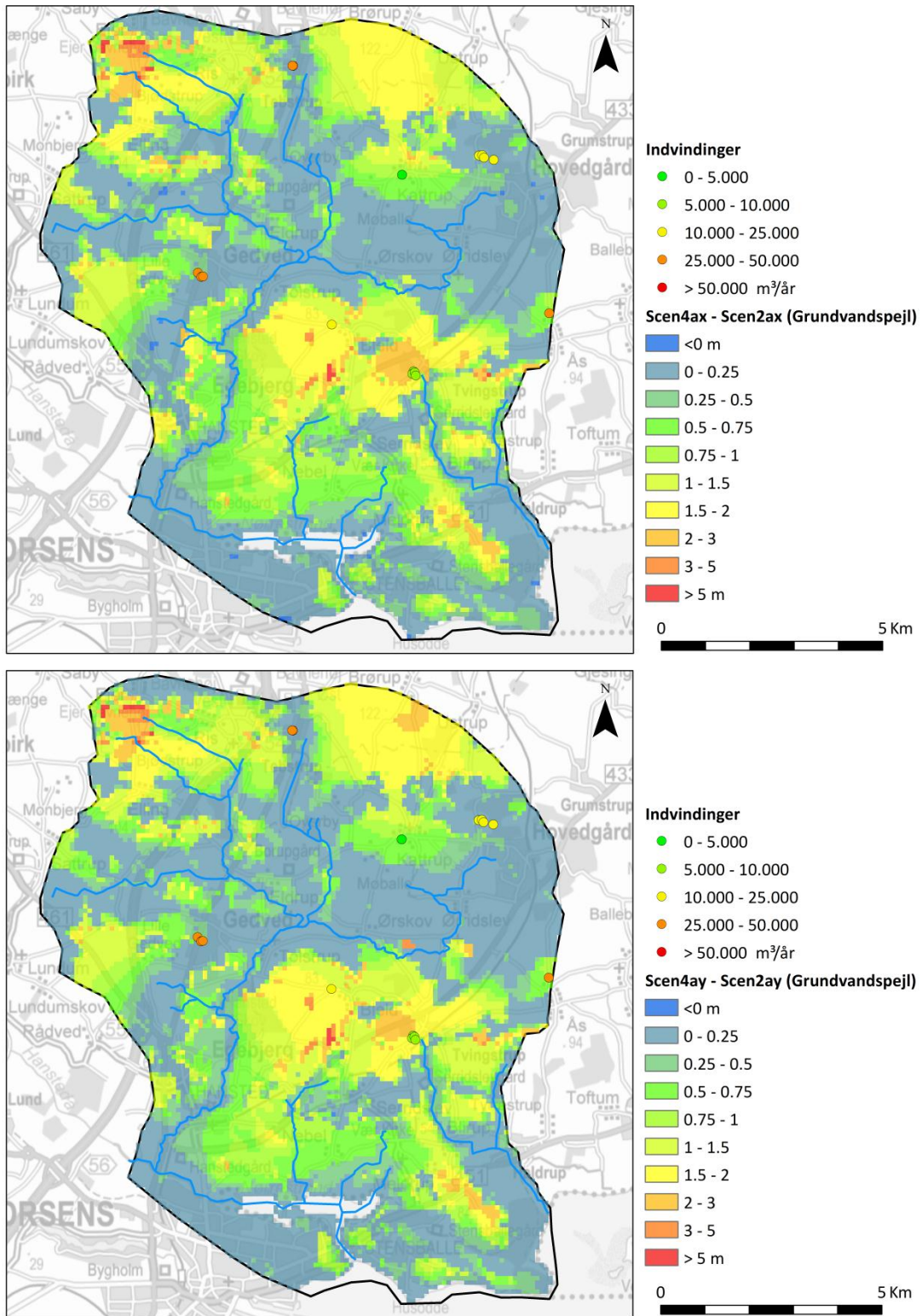
Figur B10.6 Simulerede fraktilverdier for hhv. lav (scenarie 4AX) og høj (scenarie 4AY) dræntidskonstant for 1991-2009 for fremtidigt klima



% ændring	Lille Hansted å mm110	Lille Hansted å mm111	Lille Hansted å mm15	Gedved Mølleå mm17	Gedved Mølleå mm76	Ørskov bæk mm3	Ørskov bæk mm43	Holtvad bæk mm20	Fiskebæk udløb	
4AX i forhold til 2A	Qstation 270004									
middel	-5	-6	-7	-13	-3	-9	-12	-5	-14	-48
99%	58	63	59	35	19	38	50	85	47	-27
95%	6	6	5	-6	-1	-1	3	14	-2	-61
90%	-18	-20	-20	-23	-9	-18	-26	-25	-21	-60
50%	-9	-12	-13	-15	-4	-11	-20	-19	-19	-35
10%	-1	-2	-4	-16	-3	-10	52	39	-30	-50
5%	0	0	-3	-15	-6	-10	66	46	-27	-57
1%	1	-1	-3	-16	-9	-13	65	46	-25	-59

% ændring	Lille Hansted å mm110	Lille Hansted å mm111	Lille Hansted å mm15	Gedved Mølleå mm17	Gedved Mølleå mm76	Ørskov bæk mm3	Ørskov bæk mm43	Holtvad bæk mm20	Fiskebæk udløb	
4AY i forhold til 2A	Qstation 270004									
middel	5	5	6	6	4	5	6	6	41	
99%	72	79	79	69	45	64	105	96	73	114
95%	45	47	47	46	32	45	54	56	51	65
90%	19	21	21	20	11	17	20	21	22	32
50%	-15	-19	-18	-12	-6	-13	-39	-38	-20	44
10%	0	-2	0	-3	3	-1	-3	-4	-8	85
5%	1	1	2	-2	5	1	7	3	-1	82
1%	5	5	7	-1	10	5	18	11	6	74

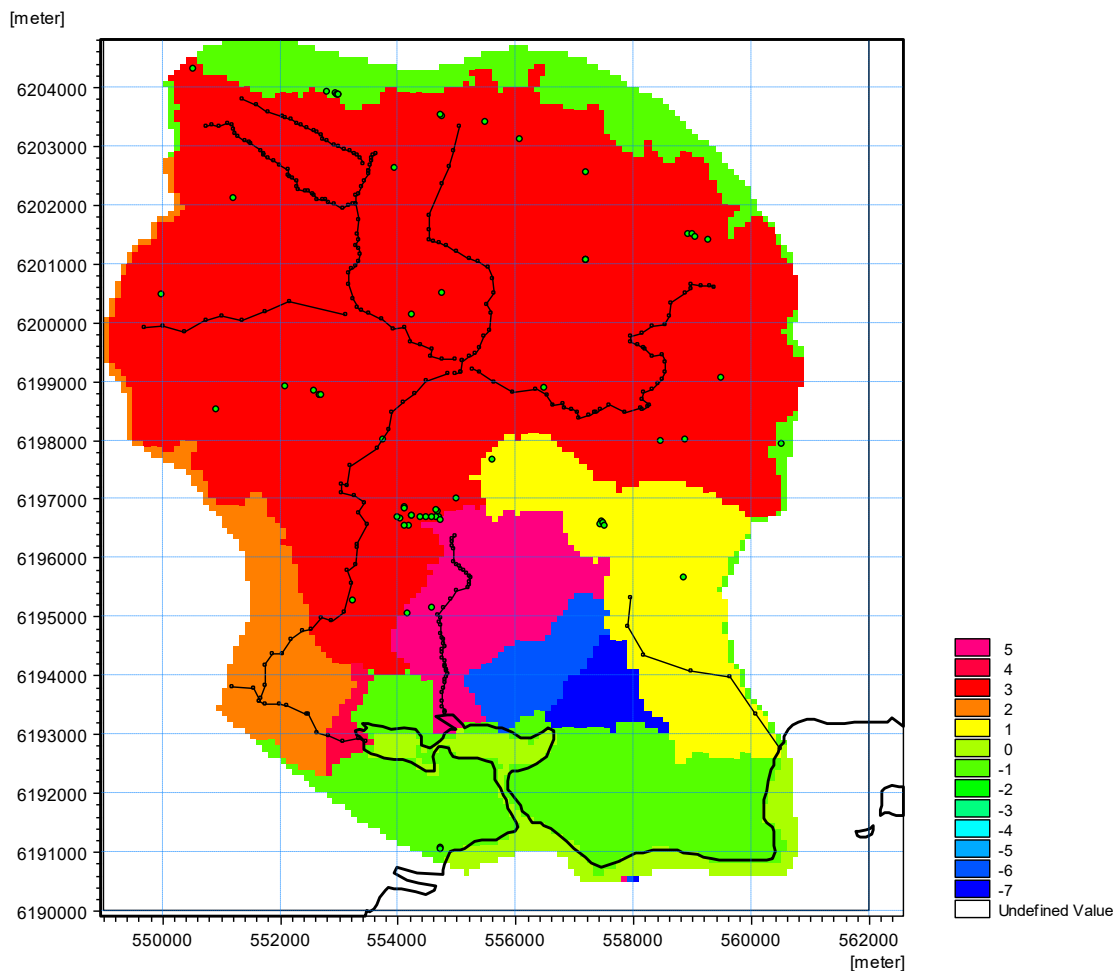
Figur B10.7 % - vise ændringer i simulerede fraktilværdier for hhv. lav (scenarie 4AX) og høj (scenarie 4AY) dræntidskonstant for 1991-2009 for fremtidigt klima i forhold til scenarie 2A.



Figur B10.8 Ændret øvre grundvandspejl ved hhv. lav og høj drænkostant (scenario 4AX og 4AY) i et fremtidigt klima i forhold til lav og høj drænkostant i nuværende klima (scenario 2AX og 2AY)

BILAG 11 Drænoplande

Figur B11.1 viser hvordan modellen router drænafstrømning indenfor oplande. Indenfor LI Hansted å's opland (vist med rødt for opland 27.01) router modellen til nærmeste vandløb (= kode 3). Det nordlige opland vist med grøn farve routes til randen. Det lilla opland er oplandet til Fiskebæk (= kode 5), tilløb til Nørrestrand.



Figur B11 Drænkode fordeling