

Dynamiske og stationære oplandsberegninger udført med tre semi-syntetiske modeller

(Delprojekt 2 om oplande)

Claus Holst Iversen, Lars Troldborg,
Rasmus Rønde Møller, GEUS
og Steen Christensen, Aarhus Universitet



Dynamiske og stationære oplandsberegninger udført med tre semi-syntetiske modeller

(Delprojekt 2 om oplande)

**Claus Holst Iversen, GEUS Lars Troldborg, GEUS
Rasmus Rønde Møller, GEUS, og Steen Christensen, Aarhus Universitet**

Dynamiske og stationære oplandsberegninger udført med tre semi-syntetiske modeller

(Delprojekt 2 om oplande)

Særudgivelse

Forsidebillede: Oversvømmet mark ved Mårslet syd for Århus,
Foto: Bente Nedergaard

Omslag: Henrik Klinge
Repro: GEUS
Oplag: 150

Januar 2010
ISBN: 978-87-7871-272-1

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

© De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS
Øster Voldgade 10
DK-1350 København K
Telefon: 38142000
E-post: www@geus.dk

Udarbejdet i samarbejde med By- og Landskabsstyrelsen, Miljøministeriet.

Indholdsfortegnelse

Indholdsfortegnelse	5
1. Baggrund	7
2. Indledning	8
3. Litteraturstudium vedrørende forskelle i indvindingsoplande beregnet under stationære henholdsvis dynamiske betingelser	9
3.1 Indledning	9
3.2 Litteraturgennemgang	9
3.2.1 Forskelle i indvindingsoplande som følge af variationer i grundvandsspejlet	9
3.2.2 Forskelle i indvindingsoplande som følge af manglende stationaritet	15
3.2.3 Litteratur som beskriver stationære og dynamiske forhold men ikke direkte er relateret til oplandsberegninger	17
3.3 Sammenfatning	18
4. Metodevalg og fremgangsmåde	21
4.1 Indledning	21
4.2 Hydro-stratigrafiske modeller	21
4.3 Opstilling af numeriske modeller	26
4.4 Scenarier	31
4.5 Sammenfatning	34
5. Resultater	35
5.1 Indledning	35
5.2 Hedeslette-model	36
5.2.1 Scenarier	36
5.2.2 Vandbalance	36
5.2.3 Beregnede oplande	37
5.2.4 Oplande ved mindre porøsitet	40
5.2.5 Oplande ved formindsket anisotropi (Kv:Kh)	41
5.2.6 Oplande ved lækagelag i lag 4, filter i lag 7	41
5.3 Morænelandskabs-model	43
5.3.1 Scenarier	43
5.3.2 Vandbalance	43
5.3.3 Beregnede oplande	44
5.3.4 Oplande ved ændret porøsitet og filterniveau	46
5.4 Begravet dal-model	48
5.4.1 Scenarier	48
5.4.2 Vandbalance	49
5.4.3 Beregnede oplande	49
5.5 Klimascenarier	51
5.5.1 Scenarier	51

5.5.2	Beregnete oplande.....	51
5.6	Transporttider alle scenarier	53
6.	Diskussion	57
7.	Konklusioner	60
8.	Referencer	62
BILAG 1 Figurer af model scenarie beregninger af grundvandsdannede oplande og aldersfordeling til boring A og B		63
BILAG 2 Tabel af areal opgørelser for model scenarie beregninger af grundvandsdannede oplande til boring A og B		87

1. Baggrund

I forbindelse med en opdateret udgave af Geo-Vejledningen om Indvindings- og grundvandsdannende oplande (Iversen et al., 2008) skal der udarbejdes et afsnit om, hvordan brugen af stationære og dynamiske (tidsafhængige) grundvandsmodeller bør prioriteres i forbindelse med en beregning af indvindings- og grundvandsdannende oplande.

Hidtil har der ikke været klare anbefalinger for, om og hvornår man bør anvende en stationær henholdsvis en dynamisk model, men størstedelen af beregningerne er foretaget ved brug af stationære modeller. Spørgsmålet er, om der under nogle hydrogeologiske forhold kan være væsentlige forskelle i de oplande, som beregnes med en stationær, henholdsvis en dynamisk model? Nærværende rapport er udarbejdet for at bidrage til belysning af dette.

Undersøgelsen er foretaget ved brug af grundvandsmodeller for tre forskellige karakteristiske danske landskabstyper. For hver model begrænses analysen til kun at lade nedsivningen variere som funktion af tiden, mens grundvandsindvinding og øvrige randbetingelser antages at være konstante i tiden.

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

2. Indledning

Formålet med denne undersøgelse er at vurdere, om det i forbindelse med detailkortlægningen er tilstrækkeligt at anvende stationære modeller til beregning af indvindings- og grundvandsdannende oplande, eller om man bør anvende dynamiske modeller til beregning for nogle typer geologiske miljøer, eller for visse typer klimavariationer. Dette gøres på følgende måde.

Med udgangspunkt i en eksisterende MIKE-SHE model for Karup Å oplandet opstilles tre syntetiske hydrostratigrafiske modeller, som hver for sig repræsenterer en typisk dansk geologitype: en hedeslette, et østdansk morænelandskab med og uden vinduer i dæklagene, og henholdsvis en øst- eller vest-dansk geologi indeholdende en begravet dal. Modellerne dækker et areal svarende til den SØ-del af det oprindelige Karup Å modelområde.

For hver hydrostratigrafisk model er der opstillet en grundvandsmodel i MIKE-SHE med otte beregningslag. Grundvandsmodellerne er anvendt til at udføre oplandsberegninger for hver af de to borer, kaldet henholdsvis boring A og boring B, der indvinder med en konstant synkron indvinding på 950.000 m³/år pr. boring. Oplandene er beregnet ved brug af både en stationær og en dynamisk udgave af grundvandsmodellen i kombination med partikelbanesimulering. Beregningerne er foretaget med MIKE-SHE og tilhørende partikelbanemodul. I de dynamiske beregninger tillades nedsivningen at variere som funktion af tiden, mens alle andre variable holdes konstante. I de stationære beregninger anvendes en tilsvarende middelværdi for nedsivningen. En sammenligning af de beregnede oplande for hver geologi vil vise, om der er forskel mellem stationært og dynamisk beregnet opland.

I sammenligningen fokuseres altså alene på betydningen af at inddrage klimatisk betingede variationer i nedsivningen i oplandsberegningen. Tidsskalaer for de undersøgte klimavariationer varierer fra årstidsmæssige variationer til variationer på ca. 2-5 år.

3. Litteraturstudium vedrørende forskelle i indvindingsoplande beregnet under stationære henholdsvis dynamiske betingelser

3.1 Indledning

Det er kun ganske få artikler i internationalt anerkendte videnskabelige tidsskrifter, som har undersøgt forskelle mellem indvindingsoplande beregnet på baggrund af stationære henholdsvis dynamiske betingelser. Det samme gør sig gældende i den danske litteratur. De fleste grundvandsmodeller, som er opstillet i forbindelse med den danske grundvandskortlægning, er stationære modeller. Grundlaget for denne "tradition" synes således at være spinkelt.

Den internationale litteratur om emnet deler sig primært op i to grupper: en gruppe med fokus på tidlige variationer i randbetingelser som nedsivning eller vandstand i vandløb (A. D. Festger and Walter, G.R., 2002; T. W. Rayne et al., 2001; T. E. Reilly and Pollock, D.W., 1995; T. E. Reilly and Pollock, D.W., 1996; G. Rock and Kupfersberger, H., 2002; Troldborg, L. et al., 2008); og en gruppe med fokus på tidlige udvikling i grundvandsindvinding, dvs. situationer ved etablering af nye kildepladser eller lukning af eksisterende kildepladser (F. Barry et al., 2009, C.B. Forster et al., 1997; J.P. Masterson et al., 2004). I det følgende opsummeres hovedresultaterne fra hver af de to grupper undersøgelser.

3.2 Litteraturgennemgang

3.2.1 Forskelle i indvindingsoplande som følge af variationer i grundvandsspejlet

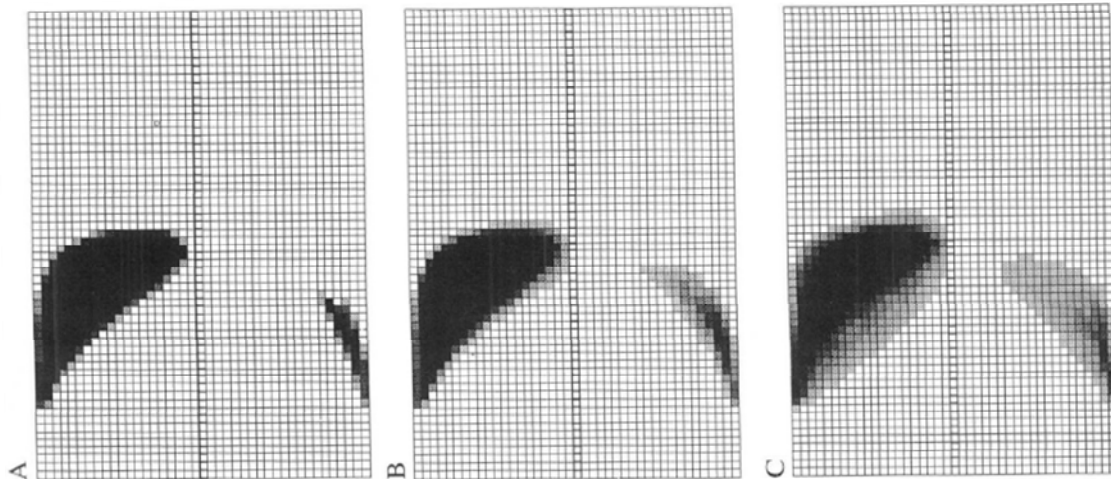
(Reilly og Pollock, 1995 og 1996) præsenterer numeriske undersøgelser med en simpel 3D model (12000*8200*200 ft³) med et homogent magasin gennemskåret af en å på langs. Modellen er opstillet med 40*61*8 celler (x*y*z), med fast anisotropi (Kh/kv; 1:5) på den hydrauliske ledningsevne.

Infiltrationen til modellen er fordelt uniform over hele modeloverfladen, og dels gennem 4*3 celler placeret tæt ved hjørnerne af modellen. I modellen er der placeret tre borer i lag 7 (150-175 ft. under overfladen) med forskellige indvindingsmængder i forskellig afstand fra åen og fra infiltrationscellerne.

Indvindingsoplandene er beregnet med MODFLOW og MODPATH under henholdsvis konstant og tidsvarierende infiltration. Den gennemsnitlige infiltration under den tidsvarierende infiltration er brugt i den stationære model.

Reilly og Pollock var interesseret i at undersøge, om sæson og dekadevariationer i infiltration påvirkede indvindingsoplande til borer signifikant således, at det vil ugyldiggøre stationære simplificeringer.

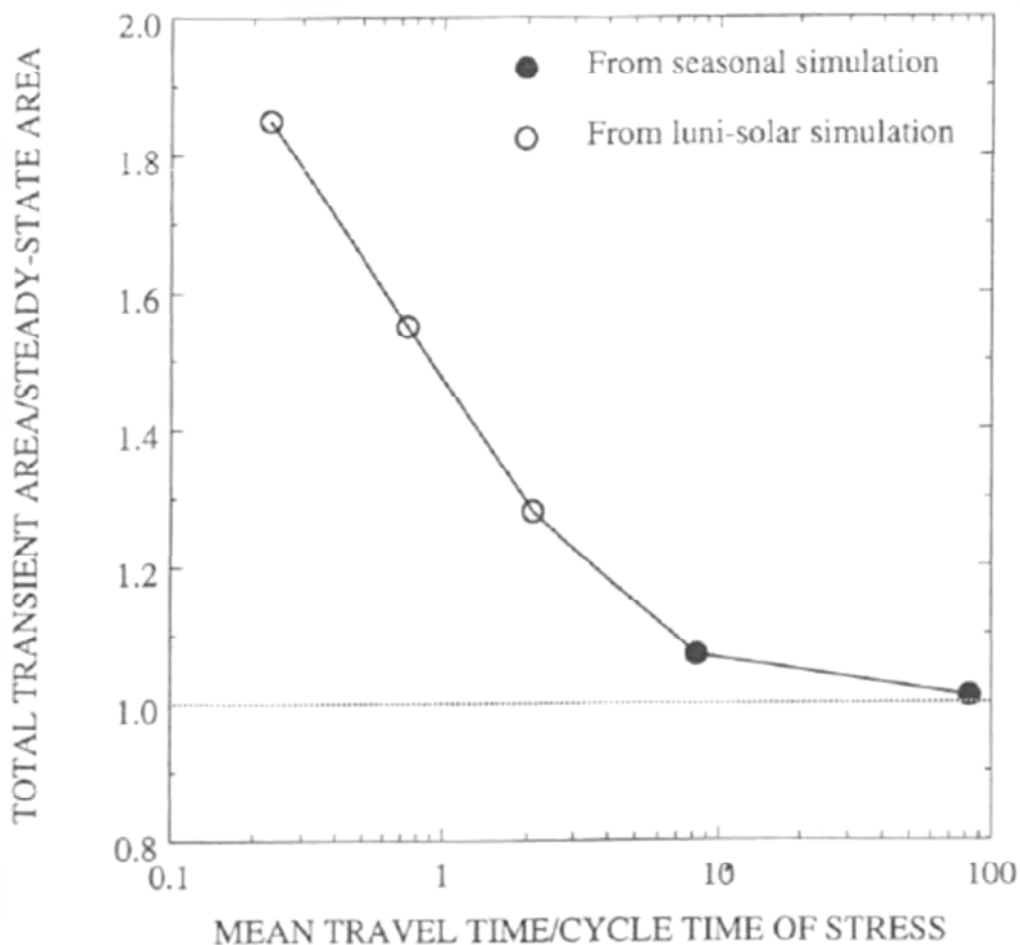
I deres undersøgelse holdes randbetingelser (ydre rande, åer, indvindinger), transmissivitet, magasintal, og geologiske strukturer konstant, mens den homogene porøsitet og dermed partikelhastighederne varieres. Dette påvirker ikke partikelbanerne for stationære beregninger, men kan påvirke dem for dynamiske beregninger. Indvindingsoplandene kan derfor være forskellige som vist i Figur 1.



Figur 1 A. Stationære betingelser, B: dynamiske betingelser og porøsitet på 0,3 C: dynamiske betingelser og porøsitet på 0,03 (T. E. Reilly og Pollock, D.W., 1996)

Reilly og Pollock viser for deres specifikke system, at et forhold på 100:1 imellem transporttid (som afhænger af porøsitet) og infiltrationscyklus giver et oplandsareal, som er 0-1 % større for det dynamisk beregnede opland sammenlignet med det stationære opland. Tilsvarende giver forholdet 10:1 et forøget dynamisk oplandsareal på 5 %, mens forholdet 1:1 forøger det dynamiske oplandsareal med yderligere 50 % sammenlignet med det stationære opland (jf. Figur 2).

I alle tilfælde, hvor indvindingsoplandet er baseret på dynamiske simuleringer, er arealet større end når oplandet er beregnet ud fra stationære simuleringer.



Figur 2 Empirisk sammenhæng mellem ratio gennemsnitstransporttid / infiltrationscyklus og ratio dynamisk-/stationært indvindingsopland (T. E. Reilly og Pollock, D.W., 1996)

Reilly og Pollock konkluderer, at forholdet mellem den gennemsnitlige transporttid (partikel transport fra overflade til indvinding) og infiltrationscykluslængden (f.eks. daglige, sæson, dekade) er styrende for, om der er forskelle mellem dynamiske og stationære simuleringer af indvindingsoplande. De forklarer sammenhængen med, at højfrekvent støj fra infiltrationsvariation bliver udglattet under lange transporttider, hvorimod længerevarende udsving fra f.eks. solar-måne-påvirkninger kan påvirke de dynamiske oplande, hvis transporttiden er relativt kort (f.eks. 20-50 år) (jf. figur 2).

Sammenhænge mellem variationer i indvinding, og simulering af indvindingsoplande er senere undersøgt i enkelte artikler. Disse er generelt ikke i modstrid med Reilly og Pollocks resultater.

Rayne og Bradbury (2001) simulerede dynamiske og stationære indvindingsoplande for et 16*22 km² stort aquiferkompleks domineret af opsprækket dolomit, hvor den ikke opsprækkede del stort set ikke bidrager til strømningen. Tykkelsen af aquiferkomplekset er 100-250 m. Simuleringerne blev udført i MODFLOW og MODPATH med 99*97*12 celler (x*y*z) bestående af 12 beregningslag.

Rayne og Bradbury begrundet det dynamiske valg med kraftig sæsonvariation i de målte trykniveauer, men giver ikke en nærmere analyse af forskelle mellem stationære og dynamiske indvindingsoplande. Rayne og Bradbury har udregnet den gennemsnitlige transport-

tid fra overflade til indvinding til 152 dage (porøsitet 0,0005), og testet med en porøsitet på 0,002 og 0,0003, hvilket giver en middeltransporttid på 416 dage og 127 dage. Relateres deres arbejde til Reilly og Pollock, giver det en transporttid/infiltrations-cyklus forhold på 1:1, 2:1 og 2:3, hvilket således i Reilly og Pollocks tilfælde giver 30-60 % større dynamisk indvindingsopland end stationært beregnet indvindingsopland.

Rayne og Bradbury bemærker endvidere, at baglæns partikeltransport med MODPATH i de dynamiske simuleringer, hvor partikler tilføjes initialt, ikke giver samme resultater som ved forlæns partikeltransportsimuleringer. Dette forhold beskrives dog ikke nærmere i artiklen.

Rock og Kupfersberger (2002) præsenterer en metode for dynamiske simuleringer af partikelbanetransport i programmet FEFLOW, hvor partikler frigives uniformt i modelområdet med faste tidsintervaller. Transporttiden og startpositionerne registreres såfremt partiklerne når inden for en given radius af indvindingen. Der er opstillet en model for et floddal-område på 30*4 km² langs floden Mur. Mægtigheden af modellen og modellagene er ikke angivet direkte, men det beskrives, at området består af en række terrasser, hvor dybden af de enkelte terrasser er 2-10 m. Den rumlige diskritisering af modellen er ikke angivet.

Modellen har en trykvarierende randbetingelse langs den ca. 30 km. lange sydlige rand, som repræsenterer floden, en "noflow-rand" langs øst- og vest randene (hver ca. 4 km lange), og fastholdt strømning/trykniveau langs den nordlige rand. Kalibreringen er fokuseret på konduktivitetfordeling i terrasserne samt indstrømningen over den nordlige rand og lækagen til floden.

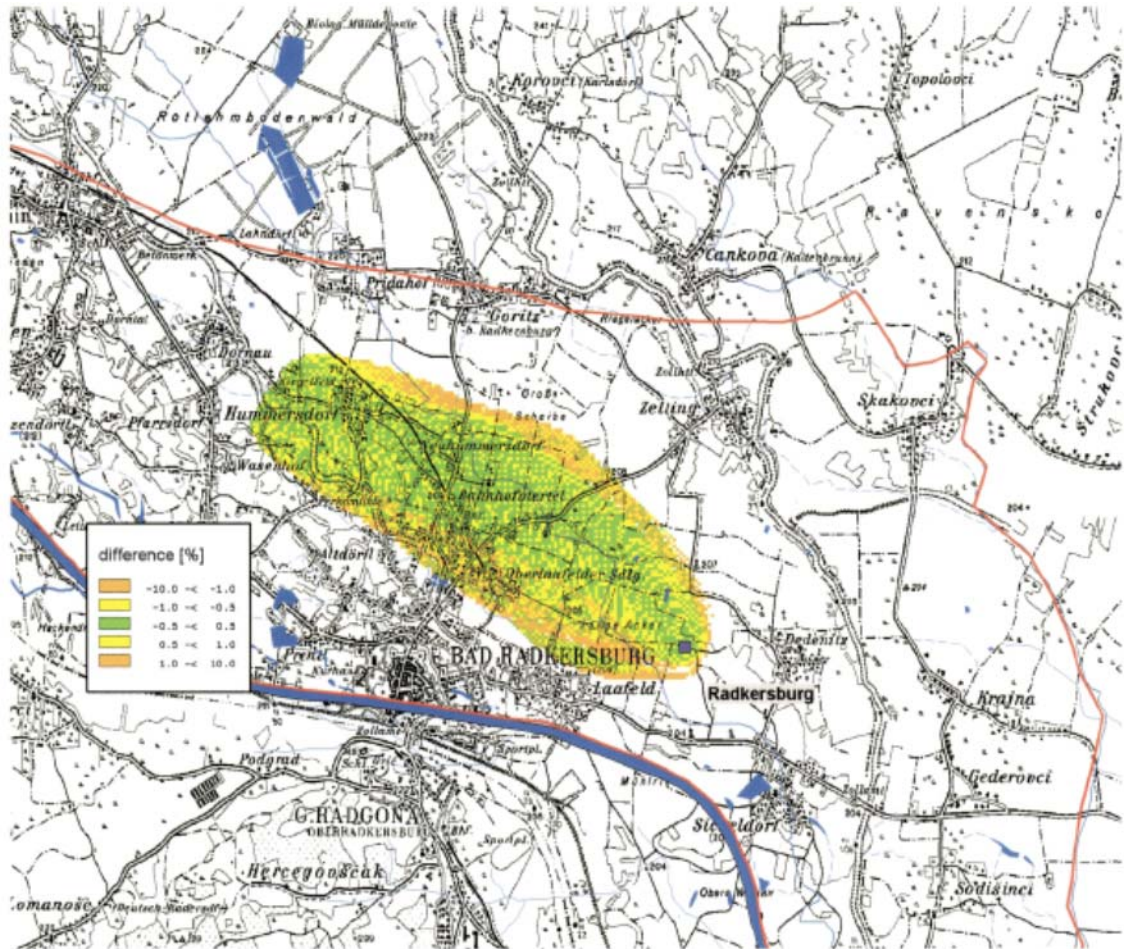
Rock og Kupfersberger fastslår, at den kalibrerede model beskriver de meget dynamiske trykfluktuationer i den nedre terrasse tilfredsstillende. Alle partikelbanesimuleringer er udført i magasinet i den nedre terrasse.

Partikelbanesimuleringerne er dels udført som dynamiske simuleringer over en tre års periode (1993-1995), og dels som stationære simuleringer på baggrund af det maksimale og minimale trykniveau, simuleret inden for samme periode. De konkluderer, at den dynamiske og de to stationære simuleringer (baseret på dels maksimale og dels det minimale trykniveau) giver meget forskellige indvindingsoplande. Endvidere konkluderes det, at stationære partikelbanesimuleringer vil overestimere indvindingsoplandene, hvilket er i direkte modstrid med Reilly og Pollock (1995 og 1996), der angiver at de dynamiske indvindingsoplande altid er større end de stationære indvindingsoplande. De stationære og dynamiske oplande er ikke umiddelbart sammenlignelige, da de stationære oplande beregnes til modelranden, hvilket ikke er tilfældet for det dynamiske opland.

Rock og Kupfersberger (2002) undersøger desuden betydningen af, hvor ofte partikler frigives ved beregning med den dynamiske model. Det testes ved at tilføre partikler for hver 10. henholdsvis 25. dag. Samtidig undersøges betydningen af den rumlige fordeling af partikler til det øverste beregningslag, hvor der placeres partikler jævnt fordelt over hele modelområdet med en afstand på henholdsvis 25 og 50 meter i mellem de enkelte partikler.

Undersøgelsen viste, at den rumlige fordeling af partikler har stor betydning for beregningen af oplande. Der var således helt op til 10 % forskel i indvindingseffektivitet (antal partikler pr. areal enhed, som havner i indvindingen, i forhold til totalt antal tilførte partikler pr. arealenhed) beregnet med henholdsvis 25 meter og 50 meter imellem de initiale partikler. Det var især i randene af de beregnede oplande, at der var størst forskel på oplandenes udbredelse (jf. Figur 3 nedenfor).

Den tidlige diskretisering, hvormed partikler frigives til modellen, havde ikke den store betydning, og gav kun forskelle i oplandene på mellem 2-4 %.

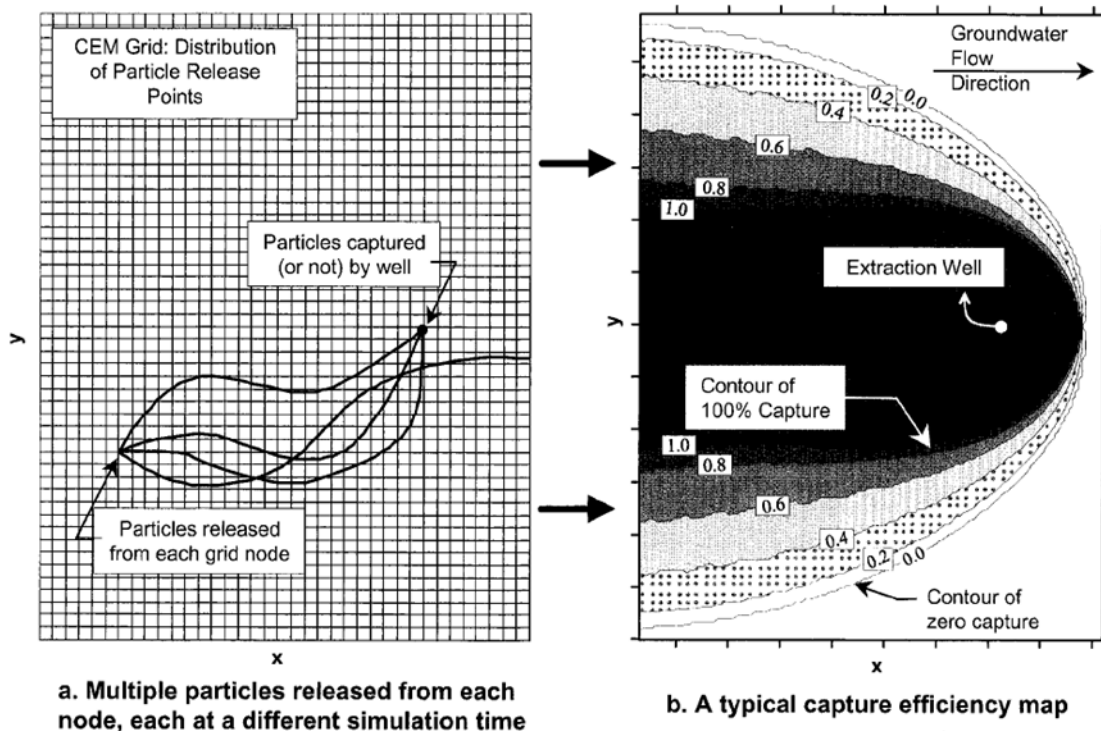


Figur 3 viser den procentvise forskel mellem 2 oplande A og B, hvor opland A er beregnet ud fra et initielt grid af partikler med 25 meters afstand, og B hvor der er 50 meter mellem initielle partikler i lag 1 (Rock, K. og Kupfersberger, 2002)

Festger og Walter (2002) præsenterer en analytisk metode til beregning af både stationære og dynamiske trykniveauer, samt en semianalytisk metode til beregning af partikeltransport og indvindingsoplande. Partikler frigives uniformt i et på forhånd fastlagt grid og med bestemte tidsintervaller. Modellen opsættes for et homogent og isotropt magasin med uendelig udbredelse og med en boring, som er fuldt filtersat. Beregningerne er foretaget i 2D, men Festger og Walter fastslår, at analysen og resultaterne uden problemer kan overføres til 3D og til mere heterogene magasinforhold. Centralt for deres analyse er begrebet "indvindingseffektivitetskort" (capture efficiency maps) (jf. Figur 4).

Festger og Walter arbejder ud fra den antagelse, at i det stationære tilfælde, vil et areal inden for en modelcelle enten bidrage eller ikke bidrage til indvindingsoplandet, mens der i de dynamiske simuleringer vil være modelceller (eller arealer indenfor en modelcelle), som i perioder bidrager og i andre perioder ikke bidrager til indvindingsoplandet. Denne veksel imellem, om modelceller bidrager eller ej, skyldes variationer i gradientforholdene.

Festger og Walter opgør således målet for forskellen som den procentvise længdeændring af den maksimale afstand til 100 % indvindingseffektivitetsafgrænsningen for det dynamiske opland i forhold til den stationære oplandsafgrænsning.



Figur 4 Indvindingseffektivitet forklares ved tilførelse af partikler i samme punkt, hvor nogen rammer i indvindingen, mens andre ikke gør. b. Indvindingseffektivitet omregnet til gridniveau kan optegnes som effektivitets kontourer – det er 100% kontouren, som de i artiklen sammenligner med det stationære indvindingsopland (A. D. Festger og Walter, G.R., 2002)

Konklusionen på deres undersøgelser er, at arealet af det dynamiske indvindingsopland altid vil være større end det stationære indvindingsopland, og at den procentvise længdeændring som udgangspunkt altid vil være positiv. Dvs., at den beregnede afstand fra boring til 100 % indvindingseffektivitetsgrænsen vil være større i det dynamiske end i det stationære tilfælde. De viser dog samtidigt, at der kan skabes gradientvariationer, som giver en negativ procentvis længdeændring.

Afslutningsvis bemærker de, at selv under simple strømningsbetingelser udviser modellen stærk følsomhed overfor initialplaceringen af partikler, hvilket er i tråd med Rock og Kupfersberger anbefalinger om at prioritere rumlig partikeltæthed frem for en stor tidlig tæthed af partikler.

Troldborg, et al. (2008) undersøger, i en artikel om modellering af miljøtracere (CFC, Tritium o.lign.) for et multi-aquifer-system nord for Odense, forskelle i simulerede aldersfordelinger som følge af stationære henholdsvis dynamiske antagelser om infiltration. Det undersøgte magasin er ca. 30-80 meter i mægtighed.

Der er opstillet en grundvandsmodel i MIKE-SHE for et opland til Odense å på 15x15 km² (med 100x100 m² horisontal diskretisering) Modellen har 6 beregningslag af varierende tykkelse, hvoraf to repræsenterer aquiferlag. Der er tilført en gennemsnitlig nettonedbør på

390 mm/år til modellen, som er fordelt ud fra arealanvendelsen og lerindholdet i den øverste meter.

Der er udført partikelbaneberegninger i MIKE-SHEs partikelbanemodul. I partikelbaneberegningerne er partikler tilført modellen med nettonedbøren (i gennemsnit en partikel pr. beregningscelle pr. år) initialt i en periode på 250 år, indtil en formodet ligevægt indtræder i modellen, og dernæst i en periode på yderligere 250 år. Inden for den sidste 250 års periode registreres alle partiklers placering og transport tid, hvorved der fås et "komplet" billede af transporttider i 3D.

Analysen fokuserer på de problemer, som opstår ved brugen aldersdateringer i hydrologisk modellering. Det vises, at det er vigtigt at forstå vandets aldersfordeling, og at man vha. en grundvandsmodel og partikelbanesimulering kan modellere vandets aldersfordeling i tre filtre (et indvindingsfilter og to observationsfiltre). Der foretages også en sammenligning af stationært og dynamisk simulerede aldersfordelinger. I de dynamisk simulerede aldersfordelinger er der en naturlig indbygget sæsonvariation i nettonedbøren.

Resultaterne viser, at observationsfiltret i lag 3, svarende til det øvre magasin, har en større fraktion af partikler med kort transporttid for de dynamiske simuleringer end for de stationære. Den gennemsnitlige transporttid beregnet under stationære forhold til det øvre filter er 10 år. For observationsfiltret i det nedre magasin (lag 5) er der under stationære forhold beregnet en gennemsnitlig transporttid på 37 år. Filtret i det nedre magasin har en større fraktion af partikler med lang transporttid for de dynamiske simuleringer end for de stationære. Dette forklares ved, at den dynamiske models fluktuationer i nettonedbørsinputet er med til at forøge cirkulationen i det terrænnære magasin. Samtidig vil en større del af vandet i det øvre magasin i den dynamiske situation have kortere strømningsveje, styret af småskala topografisk variation, hvorved vandet i højere grad frigives til dræn og vandløb. Dette mindsker infiltrationen og cirkulationen til det dybereliggende magasin.

3.2.2 Forskelle i indvindingsoplande som følge af manglende stationaritet

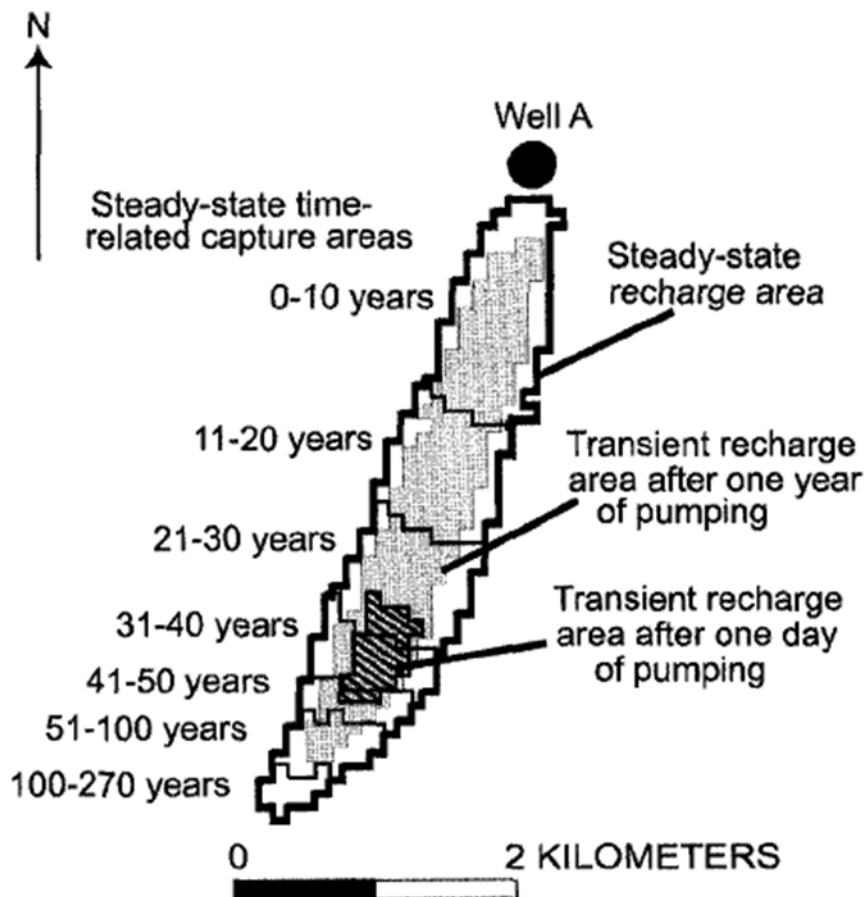
Masterson, et al. (2004) undersøger udviklingen i det grundvandsdannende opland som følge af introduktion af indvinding til modellen. I analysen sammenlignes stationære grundvandsdannende oplande med udviklingen i, hvor vandet stammer fra frem til, at stationære tilstande er opnået.

Dette opnås ved, at der indledningsvis i den dynamiske model simuleres 500 år uden indvinding og herefter 534 år med indvindingen fordelt over 5 stressperioder (500, 2, 16, 16, 500 år). Der udføres baglæns partikeltransport med partikelfrigivelse i slutningen af hver stressperiode efter at indvindingen er påbegyndt. Der skitseres grundvandsdannende oplande for forskellige pumpeperioder (1 dag, 1 år mfl.).

Modellen er opstillet for et frit sand/grus anisotrop magnetisk magasin med en tykkelse på 60-150 meter, hvor K_v/K_h går fra 1:3 til 1:100 og uniforme frie og spændte magasintal. Infiltrationen til modellen er uniform fordelt, og der sker indvinding fra 2 filtre i lag 4 og 6. Modellen er sat op i MODFLOW (144*130*11 i x*y*z) med en rumlig diskretisering på 20 meter. Partikelbanekørslerne er udført i MODPATH med uniform porøsitet på 35 %. I den dynamiske model er det spændte magasintal sat til $3,3e-5$.

Undersøgelsen viser, at det vand, som når indvindingsfilteret umiddelbart efter, at indvindingen er sat i gang, ikke stammer fra samme sted på overfladen, som det vand der indvindes efter en længere årrække. I dette eksempel tager det ca. 3-5 år før trykniveauerne har forplantet sig ud i hele magasinet og stationære forhold er opnået.

Masterson et al. viser endvidere, at for dynamiske oplande, hvor indvindingen kun har været i gang i kort tid (f.eks. én dag), er aldersfordelingen af det oppumpede vand på 30-61 år., mens aldersfordelingen ved stationære tilstande (efter lang tids indvinding) er 26-42 år (jf. Figur 5). Dvs. partikelaldrene bliver yngre jo længere tid indvindingen har kørt i den dynamiske model. Ændringen i aldersfordeling kan forklares med ændringen i gradientforhold fra før indvindingen starter til stationære indvindingstilstande er opnået.



Figur 5 viser udviklingen i grundvandsdannende opland efter 1 dags indvinding, 1 års indvinding, og efter at oplandet er fuldt udviklet (stationære tilstande). Oplandet efter 1 dag har en gennemsnits alder på 30-61 år, det samme areal bidrager med transporttid på 26-41 år i det fuldt udviklede opland (J. P. Masterson et al., 2004)

Endelig viser Masterson, et al., at 2 oplande til borerer som indvinder samtidigt, og som ligger tæt op af hinanden, udvikles og påvirker hinanden som tiden går: et delopland, der udelukkende bidrager til indvinding A, inden stationære tilstande er opnået, bidrager udelukkende til indvinding B efter at stationære forhold er opnået og oplandene er fuldt udviklede.

Barry, F. et al. (2009) har beregnet indvindingsoplande i et 650 km² 60-100 m tykt multi-aquifer system. Beregninger af grundvandsstandes udvikling fra 1898 til 2007, som følge af

indvinding påbegyndt i 1898, er udført i MODFLOW. Modellen er først stationært kalibreret, så grundvandspejlet følger topografien og dermed skønnes at simulere pre-1898 niveauet. Efterfølgende er modellen dynamisk kalibreret ved justering af infiltration (rumlig justering, konstant i tid) og magasintal, så den kan simulere udviklingen i grundvandsstand fra 1898 til i dag som følge af udvikling i indvindingen.

Tidsafgrænsede og maksimale indvindingsoplande er beregnet ved baglæns partikeltransport med MODPATH på baggrund af den dynamiske MODFLOW simulering (1898 – 2007). I simuleringerne er der anvendt uniform porøsitet for alle modellag.

I analysen sammenlignes de numerisk beregnede (dynamiske) indvindingsoplande med tidligere beregnede analytiske (stationære) oplande. Barry et al. (2009) finder frem til, at der er stor forskel i den arealmæssige udbredelse. De analytisk beregnede oplande er større og mere simple end de numerisk beregnede oplande. Det konkluderes, at dette skyldes, at de numeriske beregninger dels honorerer den hydrauliske heterogenitet og dels i større detaljer beskriver fluktuationer og udvikling i grundvandsstanden

3.2.3 Litteratur som beskriver stationære og dynamiske forhold men ikke direkte er relateret til oplandsberegninger

Et par artikler, som ikke direkte omhandler indvindingsoplande, men som giver en mere general beskrivelse af overfladepåvirkninger og vertikale forskelle i grundvandsstrømninger, er kort beskrevet nedenfor (N. H. M. Stolwijk et al., 1996; J. Toth, 1999; W. Zijl, 1999):

Toth (1999) opsummerer erfaringer fra litteraturen. Topografisk variation vil påvirke strømningsforholdene forskelligt afhængigt af, hvor dybt i grundvandssystemet man retter sin observation. Således vil småskala topografisk variabilitet kunne aflæses i det øvre grundvandspejl, og kun storskala variabilitet kunne aflæses i det dybere grundvandspejl. Dybden i hvilke man ikke længere kan aflæse denne variation kaldes indtrængningsdybden. Toth opsummerer yderligere, at tidlige variationer i grundvandsdannelsen vil kunne aflæses i grundvandspejlet, tydeligst i infiltrationsområder og mindst i udstrømningsområder.

Stolwijk, Zijl og Boekelman (1996) og Zijl (1999) udvikler et matematisk udtryk for indtrængningsdybden (δ) i et homogent frit grundvandsmagasin som funktion af bølgelængden (λ) og kvadratroden af den hydrauliske anisotropi (K_v/K_h).

$$\delta = \lambda \sqrt{\left(\frac{K_v}{K_h} \right)} \quad \text{Ligning 3.1}$$

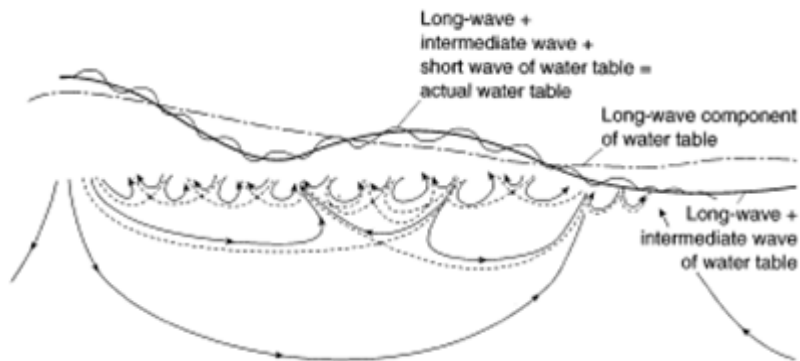
Bølgelængden er som udgangspunkt et mål for topografisk variation, men kan f.eks. også forstås som en størrelse, der er relateret til afstanden mellem vandløbssystemer (hvilket selvfølgelig er ækvivalent med topografisk variation på oplandsskala).

Zijl (1999) udvikler desuden et udtryk til beskrivelse af en karakteristisk tid (τ), som beskriver den forsinkelse, hvormed grundvandsstrømning i indtrængningsdybden responderer på fluktuationer i nedsivningen, når der er tale om et homogent grundvandsmagasin med frit vandspejl, som står i god hydraulisk kontakt med vandløb. Zijl antager, at det specifikke magasintal er negligerbar og at det frie magasintal er lig med porøsiteten. Den karakteristiske tid angives da som afhængig af porøsitet (n), bølgelængde, anisotropi (a), og hydraulisk ledningsevne (horisontal K_h , vertikal $K_v = aK_h$):

$$\tau = n\lambda / \{2\pi\sqrt{K_h K_v}\} = n\lambda / \{2\pi K_h \sqrt{a}\} \quad \text{Ligning 3.2}$$

Udtrykket viser, at den karakteristiske tid er proportional med porøsiteten, hvilket kvalitativt er i overensstemmelse med Reilly og Pollock's (1996) resultater, og omvendt proportional med den hydrauliske ledningsevne og med kvadratroden af anisotropien.

Karakteristisk tid (tidforsinkelsen) bliver af Zijl oversat til, at strømningskomponenterne ved indtrængningsdybden kun påvirkes af tidlige variationer i infiltrationen, som sker langsommere end den karakteristiske tid.



Figur 6 Dybde påvirkningen afhængigt af bølgelængden i et homogent magasin.(Zijl, 1999)

3.3 Sammenfatning

Fælles for den gennemgåede litteratur er, at den primært omfatter case-studies, som viser empiriske sammenhænge. Der er relativ stor forskel på de undersøgte modeller, hvad angår den geologiske ramme (homogene og heterogene modeller med både iso- og anisotrope forhold), mens de anvendte modelkoder oftest er MODFLOW/MODPATH og i et enkelt tilfælde FEFLOW. Hovedresultaterne er:

- For et homogent frit magasin vil indvindingsoplandet beregnet ved dynamiske simuleringer have et større areal end hvis det beregnes ved stationære simuleringer (Reilly og Pollock, 1996 og Festger og Walter, 2002). Det er især i randzonen af indvindingsoplandet, at der ses forskel mellem stationært og dynamisk beregnede indvindingsoplande (Reilly og Pollock, 1996; Rock og Kupfersberger, 2002).
- (Reilly og Pollock, 1996) viser, at for et homogent frit magasin med fast anisotropi er der en sammenhæng mellem forholdet mellem den gennemsnitlige transporttid (og dermed porøsiteten) og infiltrationscykluslængden (f.eks. daglige- sæson- og dekadevariationer), og den forskel der er mellem et dynamisk og et stationært beregnet indvindingsopland. I eksemplet er fundet, at hvis forholdet mellem transporttiden og infiltrationscyklus er større end 10:1, vil forskellen mellem dynamisk og stationært beregnet opland være mindre end 5 %, mens forskellen er 30 % hvis forholdet er 2:1 er der 30 % forskel. Dvs. jo mindre forholdet er, jo større forskel er der imellem de to typer beregnede oplande.

- (Masterson et al., 2004) viser et eksempel, hvor det grundvandsdannende opland beregnes med en dynamisk model for forskellige indvindingsperioder fra starten af en indvinding og flere hundrede år frem. Oplandet ændres gradvist med tiden, så for eksempel oplandet for 10 års indvinding kun for 90 % vedkommende er identisk med det fuldt udviklede, stationært beliggende opland, som først nås efter ca. 270 års indvinding.
- (Masterson et al., 2004) viser endvidere med dynamiske beregninger, at alderen af det indvundne vand falder med tiden som følge af ændrede gradientforhold. I eksemplet har det tidligt indvundne vand en aldersfordeling på 30-61 år., mens aldersfordelingen i den stationære langtidstilstand er faldet til 26-42 år.
- (Trolborg et al., 2008) viser for et moræneområde bestående af to magasiner, at der beregnes kortere transporttider (yngre grundvand) i det øvre magasin og længere transporttider (ældre grundvand) til det nedre magasin, når beregningerne foretages dynamisk i stedet for stationært. Dette forklares ved, at den dynamiske models fluktuationer i nettonedbørsinputtet er med til at forøge cirkulationen i det terrænnære magasin. Samtidig vil en større del af vandet i det øvre magasin i den dynamiske situation have kortere strømningsveje styret af småskala topografisk variation, hvorved vandet i højere grad vil frigives til dræn og vandløb. Dette mindsker infiltrationen og cirkulationen til det dybereliggende magasin.
- Zijl (1999) viser med en matematisk-analytisk model sammenhænge mellem porøsitet, hydraulisk ledningsevne, anisotropi, topografisk variation (bølgelængde) og den dybde af et homogent system, som vil være påvirket af topografiske variationer og af evt. tidlige fluktuationer i grundvandsdannelsen. Anisotropi og bølgelængde har betydning for den dybde af grundvandsmagasinet, der påvirkes, mens også porøsitet og hydraulisk ledningsevne har betydning for den forsinkelse (og udjævning), hvormed påvirkningen sker

Af øvrige erfaringer beskrevet i litteraturen mht. simulering og præsentation af dynamiske og stationære indvindingsoplande kan fremhæves:

- Forskellige versioner af "Capture efficiency maps eller "indvindingseffektivitetskort" kan bruges til at visualisere udstrækning og dynamik i indvindingsoplande (Festger og Walter, 2002; Rock og Kupfersberger, 2002; til dels Reilly og Pollock, 1996). Kortet udarbejdes ved, at der løbende tilføres partikler til modellen i et fast grid. Antallet af partikler, der fanges fra en given modelcelle, i forhold til det samlede antal partikler, der er tilført modelcellen, angiver indvindingseffektiviteten fra denne modelcelle. Periodevis vekslen imellem, at en modelcelle bidrager henholdsvis ikke bidrager, sker som følge af dynamiske variationer i gradientforholdene. En sådan vekslen sker ikke ved stationære simuleringer.
- For et frit magasin med store sæsonvariationer i gradienten viser (Rock og Kupfersberger, 2002), at den rumlige fordeling af partikler har stor betydning for det beregnede opland, mens betydningen af, hvordan den tidlige tilførsel af partikler sker, er mindre.
- Det beregnede indvindingsopland er følsomt overfor de stejle gradienter i umiddelbar nærhed af indvindingen. Dette kan imødegås ved at indfange partikler

inden for en radius af en indvinding i stedet for kun at indfange partikler i selve indvindingscellen (Festger and Walter, 2002; Troldborg et al, 2008). Der angives dog ikke retningslinier for størrelsen af "indfangningsradius".

- Vandbalancebetragtninger på det grundvandsdannende opland og indvindingen kan være vanskelige at afstemme ud fra dynamiske simuleringer, da dele af oplandet til tider vil bidrage til det grundvandsdannende areal og til andre tider ikke bidrager.

Ifølge litteraturstudiet er viden på området primært af empirisk karakter, dvs. fundet for specifikke geologiske og hydrauliske opsætninger. Nærværende undersøgelse fokuseres derfor på at udvide den empiriske erfaring til at omfatte typiske danske geologyper.

4. Metodevalg og fremgangsmåde

4.1 Indledning

Formålet med undersøgelsen er at belyse, om der for forskellige danske geologiske forhold kan forventes forskelle mellem indvindingsoplande beregnet med stationære henholdsvis dynamiske modeller. Der er hertil opstillet 3 semisyntetiske hydrostratigrafiske modeller repræsenterende henholdsvis en hedeslette, et morænelandskab med vinduer, og et område med en begravet dal. For hver af de 3 modeller vil der blive introduceret 1-2 lækagelag, sandvinduer og lerlenser for at illustrere, hvilken betydning disse kan have for oplandenes form og udbredelse under henholdsvis stationære og dynamiske beregningsforhold. En model for et typisk kalkområde er fravalgt i denne undersøgelse, da både modelopsætning og tilhørende scenarieberegninger vil være meget forskellig fra og mere tidskrævende end de ovenstående, da der skal tages højde for både sprækkestrømning og anisotropi.

Modellerne er udarbejdet i MIKE SHE ud fra en eksisterende numerisk grundvandsmodel for Karup Å-oplandet. Der er anvendt samme udgangsmodel for alle 3 modeller for at sikre en ensartethed i modelopsætning, randbetingelser og lagflader. Herved er det forholdsvis enkelt at foretage en sammenligning af de forskellige scenarie-resultater.

For alle modeller er der udført beregninger med to indvindingsboringer kaldet henholdsvis A og B, hvorfra der samtidigt indvindes 950.000 m³/år fra hver. Den samlede indvinding svarer til 2 % af grundvandsdannelsen i model området.

På grundlag af de forskellige scenarier forsøges følgende belyst for stationært henholdsvis dynamisk beregnet opland:

- Filterniveauets betydning.
- Lækagelags betydning.
- Forskellige hydrostratigrafiske modellers betydning.
- Betydningen af langtidseffekter fra evt. klimaændringer (øget infiltrationen i vinterhalvåret).

4.2 Hydro-stratigrafiske modeller

De hydrostratigrafiske modeller er opstillet ved brug af MIKE-SHEs Tool Editor.

For alle 3 modeller gælder det, at topografien er anvendt som toppen af modellen. Bunden af modellerne er sat til kote -70 meter. Bunden af beregningslag 1 er fundet ud fra det stationært beregnede grundvandspotentiale i den homogene model, hvor der efterfølgende er fratrukket 5 meter. Lagfladerne/højdemodellerne af de mellemliggende beregningslag (2-6) er fundet ved at inddele lagtykkelsen fra bunden af beregningslag 1 til kote -30 (svarende til bunden af lag 6) i 5 lige tykke lag. Herunder findes beregningslag 7 og 8 som begge er planparallelle lag med en tykkelse på hver 20 meter. Den øvre og nedre begrænsning af de 8 beregningslag er således ens i alle modeller.

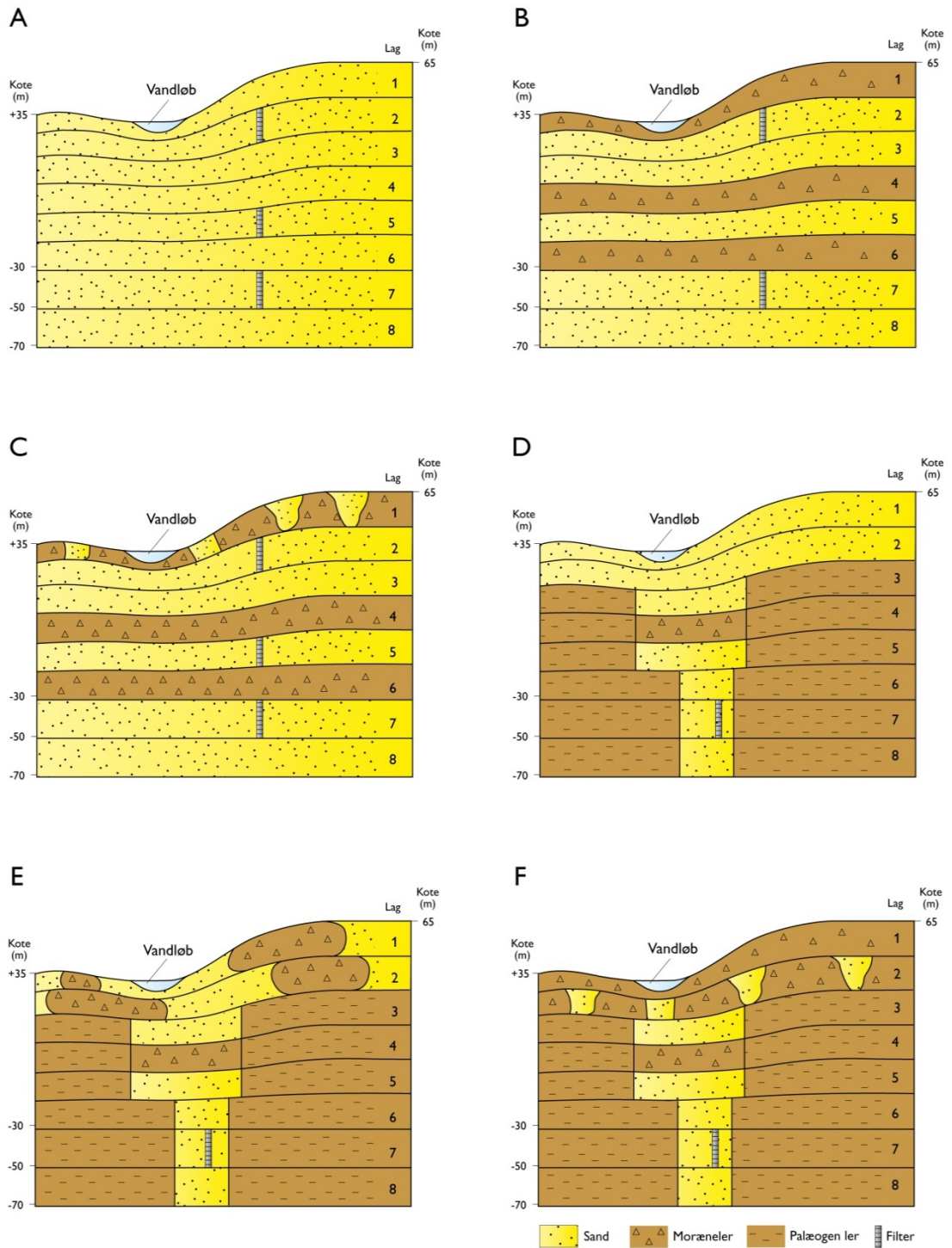
For at opnå en forskellig opbygning af de geologiske modeller, er der efterfølgende ændret i de hydrauliske parametre for de enkelte lag (lav-konduktive lækagelag samt tilføjelse af hydrologiske vinduer, lerlenser og en begravet dal), som det fremgår af Figur 7A-F).

Der er som udgangspunkt placeret indvindingsfiltre i beregningslag 2 og 7 i alle hydrostratigrafiske modeller, og i beregningslag 5 for hedeslettemodellen. Dog er der ikke filtersat i det 2. beregningslag for den begravede dal.

Filtrene for boring A og B er placeret på identiske lokaliteter for alle modeller, og indvindingen foregår kun fra et beregningslag ad gangen. Der indvindes synkront fra de to boringer A og B.

Hedeslette

Der er opstillet en homogen model med 8 beregningslag, som udgøres af homogent sand, hvor disse har samme hydrauliske egenskaber i alle lag. Modellen er efterfølgende gjort mere kompleks ved at introducere 1 lækagelag i det 4. beregningslag. Indvindingsfiltrene til boring A og B er skiftevis placeret i beregningslag 2, 5 og lag 7 (jf. Figur 7A nedenfor).



Figur 7 Hydrostratigrafisk opbygning af model for: A Homogen hedeslette, B-C Morænelandskab med og uden sandvinduer, D-E Begravet dal med og uden lerlinser og F Begravet dal med sandvindue

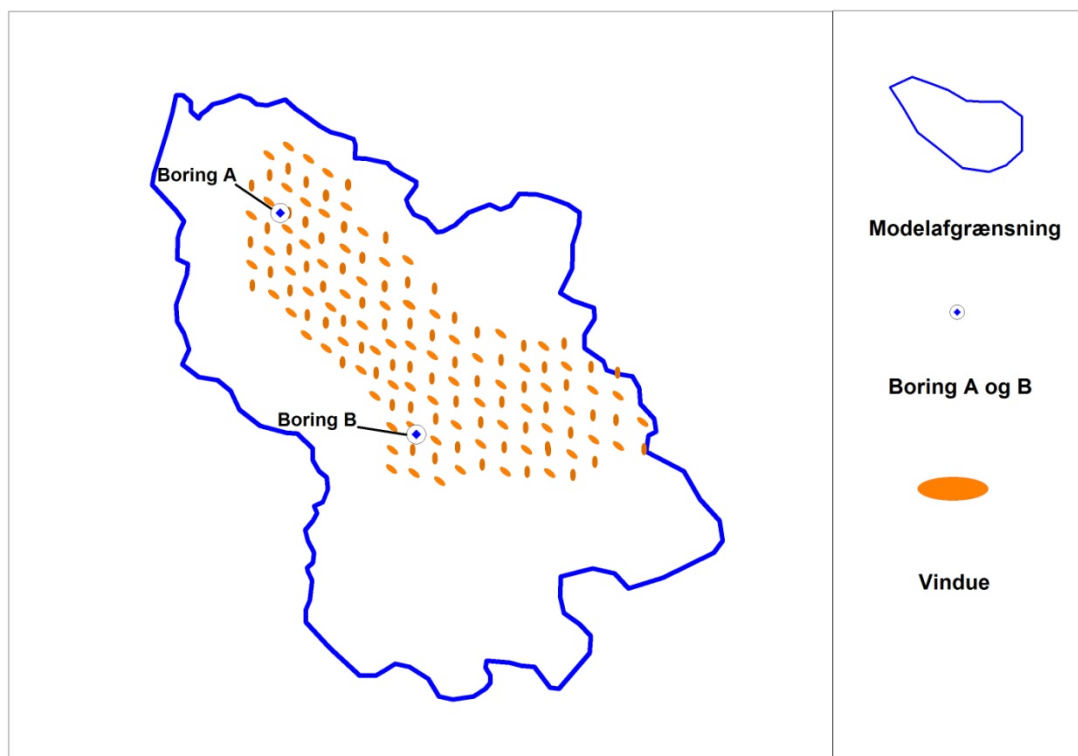
Morænelandskab

Modellen for morænelandskabet er opstillet ud fra hedeslettemodellen, hvor det øverste lag er udskiftet med et morænelerlag. Beregningslag 2 og 3 udgøres af sand, mens beregningslag 4 er et lækagelag. Beregningslag 6 udgør også et lækagelag i et af de udførte scenarier. De resterende beregningslag 5, 7 og 8 udgøres af 3 sandlag.

I scenarie 7.1 er lækagelaget i beregningslag 1 udskiftet med et lag af moræneler med sandvinduer, og i scenarie 7.2 er beregningslag 1 udskiftet med lerlinser.

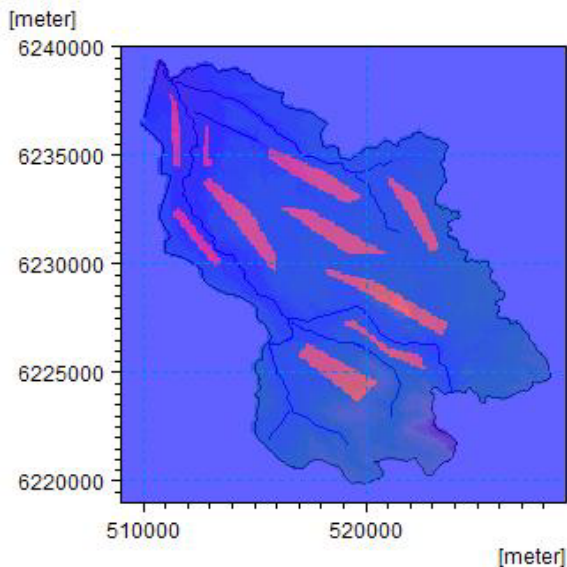
De geologiske sandvinduer er udarbejdet som ens ellipser i GIS, som er jævnt fordelt i og omkring de forventelige oplande til boring A og B. Størrelsen på ellipserne er 200 * 400 meter, svarende til de strukturer man typisk finder i de overfladenære lag i forbindelse med detailkortlægningen (jf. Figur 8).

Indvindingsfiltrene til boring A og B er skiftvis placeret i beregningslag 2 og 7 for alle morænemodeller (jf. Figur 7 B-C ovenfor).



Figur 8 Placering af sand-vinduer i morænedæklaget i beregningslag 1

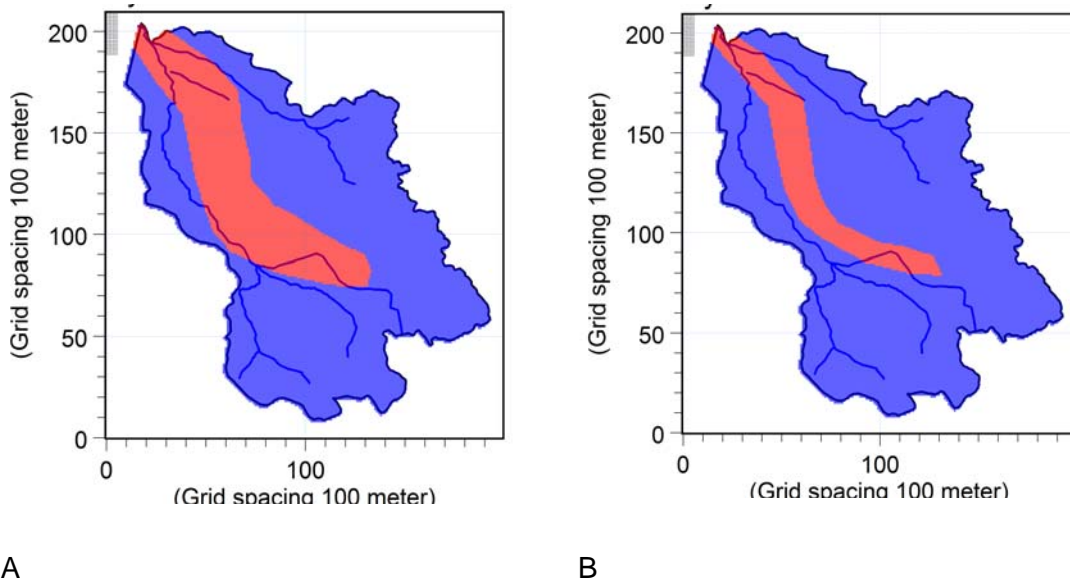
Lerlinserne, som er introduceret i det 1. og 2. beregningslag, er ca. 4000-6000 meter i udstrækning, og de er fordelt, så de ligger parallelt med vandløbet i modellen. Lerlinserne er introduceret for at tilføje lokale toppunkter i grundvandsspejlet i de øvre beregningslag og at øge dynamikken i grundvandspotentialet i de dynamiske simuleringer (jf. Figur 9).



Figur 9 Placering af lerlinser over den begravede del i beregningslag 1 og 2

Begravet dal

Der er opstillet en model for en typisk begravet dal, hvor der er introduceret en NV-SØ-gående dalstruktur, som berører beregningslag 3-8, og som er fyldt med sand. Dalen har størst tværgående udbredelse i de øvre beregningslag 3 til 5, mens den bliver mindre i de nedre beregningslag 6 til 8 (jf. Figur 7 D-F og Figur 10). Den hydrauliske ledningsevne omkring dalen sættes til en værdi svarende til fed paleogen ler. Bunden af dalen ligger i kote -70 meter.



Figur 10 Placering af begravet dal. A: dal i beregningslag 3-5. B: dal i beregningslag 6-8

I den begravede dal introduceres et (henholdsvis to) lækagelag i det 4. (og 6.) beregningslag i de indledende scenarier. Efterfølgende tilføjes der sandvinduer i det 2. beregningslag efter samme fordeling, som er vist i figur 8. Endelig introduceres der lerlinser i det 1. og 2. beregningslag over den begravede dalstruktur efter figur 9.

Afslutningsvis udføres der en test omkring den vertikale diskretisering, hvor beregningslag 4 til 7 halveres, så der optræder 4 nye beregningslag, og så modellen samlet har 12 beregningslag. Denne øvelse skal teste, om der er numeriske problemer i forbindelse med oplandsberegninger i begravede dale generelt. Ved at halvere lagtykkelserne (fordoble antallet af lag) vil man få en bedre opløsning af de vertikale strømningsforhold indenfor dalen.

4.3 Opstilling af numeriske modeller

De numeriske grundvandsmodeller er opstillet i DHI's software MIKE-SHE (ver. 2009). Modellen udnytter ikke MIKE-SHE's umættet zone modul. Det følgende er en kort gennemgang af de parametre og randbetingelser, som er anvendt i den numeriske model, og som overordnet set gælder for alle 3 modeller.

Horisontal diskretisering

Modellens horisontale diskretisering er sat til 100 meter, og er ens over hele modelområdet.

Ydre randbetingelse

Randbetingelserne udgøres af en "nul-flux-rand", som omgiver hele modelområdet og gælder for alle 8 beregningslag.

Modellag/beregningslag

Den numeriske model består af 8 beregningslag, hvor toppen af modellen er fastlagt ud fra topografien. Bunden af beregningslag 1 er fundet ud fra det stationært beregnede grundvandspotentiale i den homogene model, hvorfra der er fratrukket 5 meter. Dette er gjort for at undgå problemer med områder og beregningsceller, hvor grundvandspotentialet overstiger toppen af det øverste beregningslag. Bunden af modellen er overalt fastlagt til kote -70 meter. De øvrige lagflader, som adskiller de enkelte beregningslag, er identiske med de hydrostratigrafiske højdemodeller, som er beskrevet i afsnit. 4.2.

Vandløb

Vandløbene i modellen er indhentet fra DK-modellen for området, hvor den tilhørende MIKE-11-opsætning er anvendt. Vandløbsstrækningerne, som indgår i modellen, er 1. og 2. ordens vandløb. Modellen er sat op med uniform bundlækage med en hydraulisk bundlækage på $1e-5$ 1/s, og der anvendes simpel 1D strømning gennem vandløbet. I de dynamiske simuleringer udnyttes lækagefaktoren, de simulerede vandføringer og vandløbstværsnit til beregning af grundvandsudstrømning til vandløbene. I de stationære simuleringer beregnes udstrømningen på baggrund af lækagefaktoren og vandløbstværsnittene alene.

Dræn

Der er lagt dræn ind i modellens øverste beregningslag i en dybde svarende til 0,5 meter under terræn. Dræneffektiviteten er sat til $1,0e-7$ 1/s.

Overfladisk afstrømning

Der regnes i de dynamiske opsætninger med 2D overfladisk afstrømning. I de stationære opsætninger flyttes overfladisk afstrømning direkte til vandløb (randbetingelse) uden tids-

forsinkelse, redistribuering og evt. reinfiltration. Dette kan give lidt støj ift. sammenligning af vandbalancer.

Indvinding

Der er 2 indvindingsboringer i modellen, A og B, som i alle scenarier indvinder med en konstant værdi. Boring A er beliggende i den nordvestlige del af modellen, og boring B er beliggende centralt i modellen tæt på vandløb. Boringerne er under de forskellige scenarier filtersat i varierende beregningslag, men der foregår kun indvinding fra et beregningslag ad gangen.

I den indledende modelopsætning er der udført en række forskellige test scenarier for at se, hvilken indvinding der er optimal i forhold til nærværende model (jf., figur 12 nedenfor). Testkørslerne er dels udført for at se, hvilke indvindinger der kan simuleres, uden at oplandene rammer den østlige modelrand, og så der samtidig ikke sker sammenfald med de to oplande. Endelig er det testet, at indvindingens størrelse er så kraftig, at indvindingen opfører sig og opfylder betingelserne for en "strong sink" (Reilly og Pollock, 1996).

Ud fra de udførte testscenarier er der valgt en indvinding pr. boring svarende til 1 % af den samlede grundvandsdannelse, hvilket svarer til en årlig indvinding på ca. 950.000 m³/år fra hver boring.

Nettonedbør

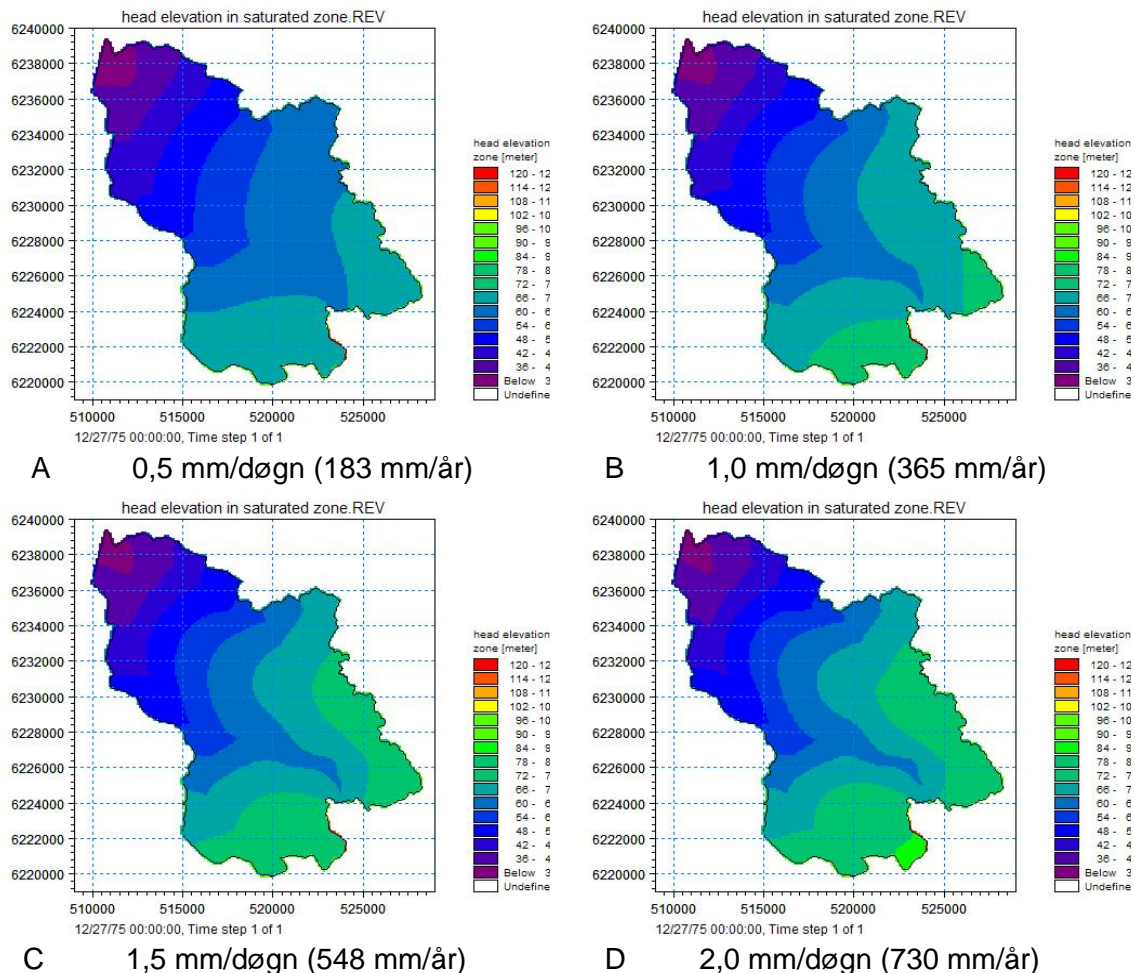
Der er i forbindelse med modelarbejdet ikke foretaget en egentlig kalibrering af modellen. Derfor er der lavet en overordnet vurdering af, om potentialeforholdene ser fornuftige ud i forhold til modelrand og vandløb, og af at der ikke optræder områder, hvor grundvandet står over terræn.

For at opnå dette, er det vigtigt, at nettonedbøren har en fornuftig størrelse i forhold til oplandsareal og indvinding. Derfor er der i den stationære model udført 4 forskellige modelkørsler med henholdsvis, 0,5, 1,0, 1,5 og 2,0 mm/døgn for at se, hvilken betydning nedbørsfordelingen har på de beregnede trykniveauer i den mættede zone. Figur 11 B-D viser, ikke overraskende, at når nettonedbøren øges, træder vandløbene i modellen tydeligere frem i det beregnede grundvandspotentiale. Dette er forventeligt, da der sker en større tilstrømning til vandløbene ved en øget nettonedbør. Som input til den stationære model anvendes derfor en værdi på 1,38 mm/døgn svarende til 504 mm/år.

Nettonedbøren tilføres forskelligt til den stationære henholdsvis den dynamiske model. I den dynamiske model er nedbørsdata jævnt fordelt som en 30 årig tidsserie med daglige værdier af DK-modellens beregninger af nettonedbøren fra perioden d. 01-01-1975 til d. 31-12-2004. DK-modellen beregner nettonedbøren ud fra DMI's klimagrid (nedbør, temperatur og potentiel fordampning), samt nogle simple antagelser om rodzonen og arealanvendelsen. Den anvendte nettonedbør er udtrukket fra DK-modellens rodzone-beregninger af et skovdækket areal for et klimagrid dækkende Karup. Det medfører, at der i dette studie arbejdes med geografisk homogen nedbør. I de dynamiske kørsler er det kun den sidste del af nettonedbørsperioden, der anvendes til partikelbanesimuleringerne. Den første del af perioden (1975-1985) bruges som "opvarmingsperiode". Ved at anvende en "opvarmingsperiode" på godt 10 år sikres det, at modellen ikke er påvirket af initialbetingelserne, således at trykniveauvariationer udelukkende skyldes variationer i nettonedbør og geologiske strukturer. De simulerede trykniveauer og strømninger for perioden 1985-2004 anven-

des i de dynamiske partikelbanesimuleringer, og disse sammenlignes med de stationært beregnede partikelbanesimuleringer.

Middelværdien for nettonedbøren i perioden 1975-1985 er på 504 mm/år. Denne værdi er anvendt i de stationære modelberegninger.

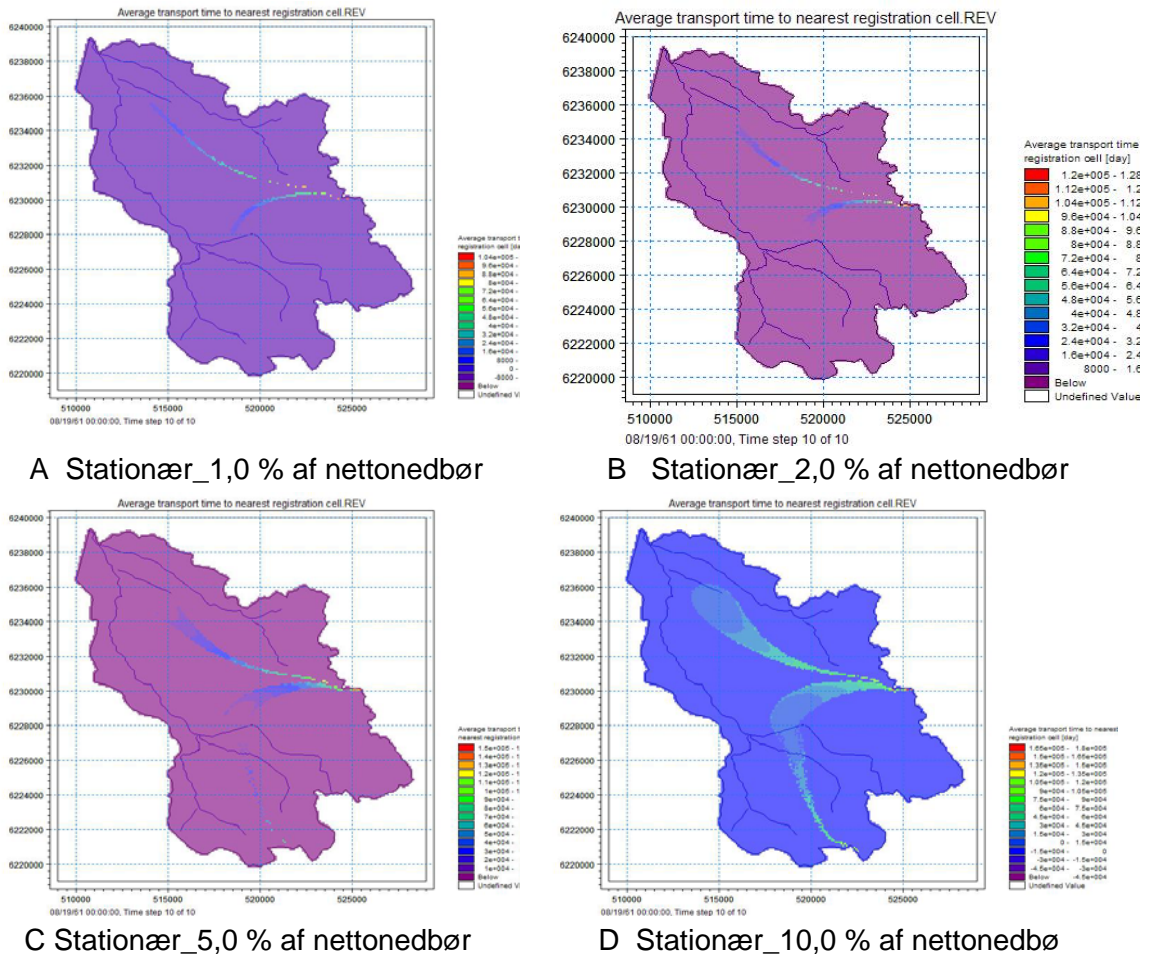


Figur 11 Beregnede trykniveauer for forskellige nettonedbørsintensiteter til 0,5, 1, 1,5 og 2,0 mm/døgn

Kalibrering af indvindingsstørrelsen

For at modellen fra start kan beregne et fornuftigt opland, er der beregnet stationære indvindingsoplande med en ét-lags model, hvor forskellige indvindingsmængder er testet af i forhold til valgt nettonedbør (jf. Figur 12). Indvindingen, der arbejdes videre med i scenarierne, er valgt til 2 % af nettonedbøren. I den homogene model med 8 beregningslag, hvor indvindingen er placeret i lag 7 er at betragte som en "strong sink". Strong sink betyder at alle celler, der deler side med cellen, hvor indvindingen er placeret, har en positiv vandflux (og dermed også transport) ind i indvindingscellen. Strong-sink betingelsen medfører at der kan laves massebalance mellem dannet grundvand indenfor det grundvandsdannende opland og indvundet vand i boringen (Reilly og Pollock, 1996). Strong sink medfører ikke automatisk korrekte strømningsforhold tæt ved boringen, idet det skal bemærkes, at korrekt simulering af strømningsmønstre i områder med store gradientforskelle generelt er nume-

risk vanskelig og vil kræve høj numerisk opløsning (fin diskretisering i rum og tid af hastighedsvektorerne) (Lu, 1994; Pollock, 1988).



Figur 12 Beregnede scenarier med oplande for forskellige indvindingsmængder svarende til 1, 2, 5 og 10 % af den samlede grundvandsdannelse

Hydrauliske ledningsevner

Værdierne for de hydrauliske ledningsevner er sat med ens værdier i alle aquiferlag (K_x, K_y $1,0 \cdot 10^{-4}$ m/s og K_z $1,0 \cdot 10^{-5}$ m/s) og ens for alle lækagelag (K_x, K_y $1,0 \cdot 10^{-7}$ m/s, K_z $1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s). Dog er topmorænelaget sat til K_x, K_y $1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s, K_z $1,0 \cdot 10^{-7}$ m/s), hvilket er de samme værdier, som er anvendt til lerlinserne, som ses på figur 4.4. Endelig er dalflankerne til den begravede dal sat til K_x, K_y $5,0 \cdot 10^{-8}$ m/s, K_z $5,0 \cdot 10^{-9}$ m/s.

I et enkelt scenarie (scenarie 3_3) er det forsøgt at ændre på anisotropien for hedeslette-modellen, hvor forholdet $K_v:K_h$ ændres fra 1:10 til 1:100. K_h bibeholdes på $1,0 \cdot 10^{-4}$ m/s og K_v ændres til $1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Specifikke ydelse for dynamisk model

Den specifikke ydelse for alle lag i den dynamiske model er sat til 0,2.

Specifikke magasinkoefficient for dynamisk model

Den specifikke magasinkoefficient er sat til $1,0 \cdot 10^{-4}$ for alle beregningslag.

Tidsskridt i de dynamiske simuleringer

Længden af de enkelte tidsskridt, som modellen beregner i, er strømningmæssigt styret af nedbørsintensiteten, men der anvendes maksimalt daglige tidsskridt. Det er i modellen valgt at gemme strømningbilledet med 10 dages interval, hvor der tilføres daglige nedbørsværdier (perioden d. 1-1-1975, d. 31-12-2004). Dette er valgt for at opnå en høj grad af dynamik i det hydrologiske system, samtidigt med, at den resulterende filstørrelse holdes på et realistisk niveau. De dynamiske partikelbanesimuleringer er lavet på baggrund af strømningssimuleringerne for hver 10. dag gennem perioden 1985-2004, hvor systemet er fundet upåvirket af de anvendte initialbetingelser. Da partikelbanesimuleringerne gennemføres for en meget længere periode end de 20 år genbruges trykniveauresultaterne for perioden 1985-2004 gentagne gange (f.eks. 50 gange for en 1000 års partikelsimulering).

Porøsitet

Der anvendes uniform porøsitet i alle modelkørsler. Med mindre andet er angivet, er porøsiteten sat til 0,2. Dog er der i enkelte scenarier (3.1, 3.2, 3.3 og 5.2) anvendt lavere porøsitetsværdier på 0,1, 0,02 og 0,01 for aquiferlagene og 0,05 for lækagelagene (jf. Tabel 1)

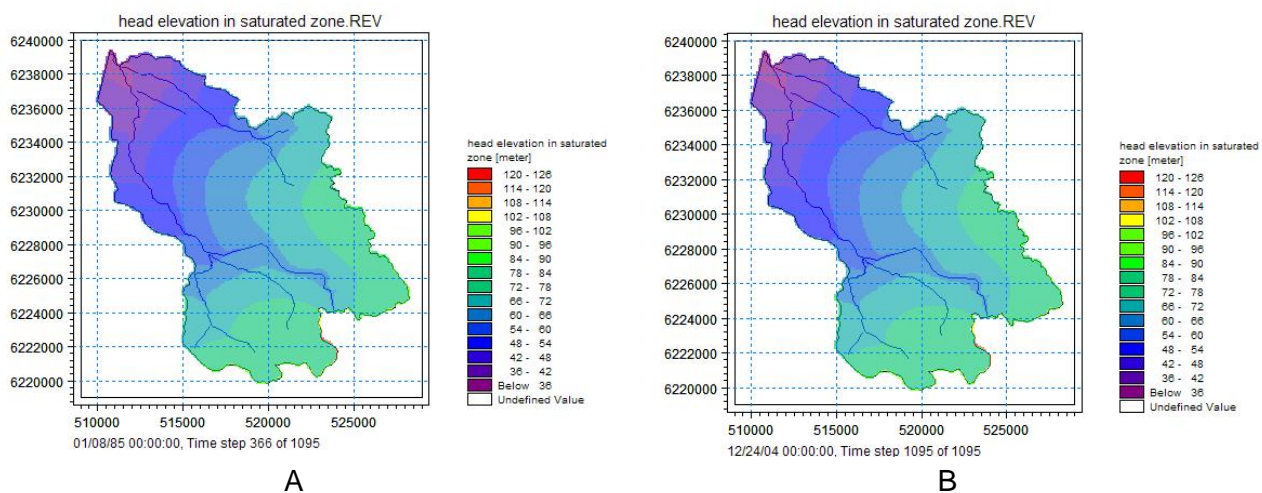
Partikler

Partikelbanemodulet i MIKE-SHE er sat op, således at der initielt, for både de stationære og for de dynamiske simuleringer, er placeret 20 partikler tilfældigt fordelt vertikalt og horisontalt i den mættede del af hver modelcelle i alle beregningslag. Der beregnes partikeltransport uden dispersion fra initial placering mod indvindingsfiltret. Initial-placeringen af partikler, som registreres i et givet tidsskridt i en celle med indvinding, gemmes sammen med rejsetiden.

I forbindelse med partikelbanesimuleringerne i den dynamiske model er der forsøgt flere forskellige metoder og fremgangsmåder mht. at placere og "føde" partikler.

1. Først blev det forsøgt at tilføre modellen én partikel til hver beregningscelle i det øverste beregningslag hver 10. dag i 20 år. Dette gav dog meget lange beregningstider på op til 8-10 timer og meget store partikelbanefiler på helt op til 8 GB.
2. Dernæst blev det forsøgt med et setup, hvor modellen tilføres én partikel til hver beregningscelle i det øverste beregningslag hver 10. dag i ét år. Det blev gjort for at sikre, at modelceller, som i kortere perioder simulerer en grundvandsstrømning med opadrettet gradient, også vil bidrage til det pågældende beregnede opland. Dette gav fornuftige filstørrelser samt beregningstider på 4-5 timer, men der viste sig uforklarlige mønstre jævnt ud over de beregnede oplande.
3. Derfor er alle de dynamiske oplande beregnet ved initielt at placere 20 partikler tilfældigt fordelt pr. celle i alle beregningslag, som frigives på én gang ved start af simuleringen. Det må holdes for øje, at dette kan give visse beregningmæssige problemer/begrænsninger jf. ovenfor nævnte skiftende gradientforhold.
4. For at undersøge betydning af skiftende gradient- og dræningsforhold, er det forsøgt at tilføre partikler til modellen på tidspunkter svarende til henholdsvis en tør, en medium og en våd periode inden for tidsperioden fra d. 01.01.85 til d. 31.12.2004. Herefter er de sæt af resultater superponeret til ét opland. Denne

øvelse viste dog, at der ikke var nogen nævneværdig forskel i resultater på, om partiklerne blev sluppet løs inden for en tør eller en våd tidsperiode. Dette er i tråd med, hvad Rock og Kupfersberger (2002) fandt frem til.



Figur 13 A: Beregnede potentiale for beregningslag 1 for henholdsvis 366 (jan. 1985). B: tidsskridt 1095 (dec. 2004)

4.4 Scenarier

Der er udført en række forskellige scenarier fra nummer 1 til 13, for at belyse evt. forskelle på form og udbredelse af henholdsvis stationære og dynamisk beregnede oplande (Tabel 1). Scenarierne omfatter:

- Indvindingsoplande for 2 boringer, A og B, for 3 modeltyper
- Filterdybdens betydning. Indvindingsfiltrene for både boring A og B er således placeret i forskellige dybder svarende til beregningslag 2, 5 og 7
- Betydningen af henholdsvis 1 og 2 lækagelag imellem magasinerne for alle 3 modeltyper. Herved belyses, om lækagelag har betydning for "dæmpningen" af de dynamiske effekter fra de årlige udsving i infiltrationen
- Betydningen af forskellige geologiske "setups", som vinduer, lerlenser og begravet dal
- Betydningen af langtidseffekterne fra evt. klimaændringer. Det er gjort ved at øge infiltrationens størrelse, specielt i vinterhalvåret

Tabel 1 Oversigt over de udførte beregningsscenarier for både stationær og dynamiske kørsler

Scenarie	Beskrivelse – scenarie	Antal lag
1	Hedeslette, homogen hydrostratigrafi, K ens i alle lag, Filter i lag 7 (default)	8
2	Hedeslette, homogen hydrostratigrafi, K ens i alle lag, Filter i lag 5	8
3	Hedeslette, homogen hydrostratigrafi, K ens i alle lag, Filter i lag 2, porøsitet = 0.2	8
3.1	Hedeslette, homogen hydrostratigrafi, K ens i alle lag, Filter i lag 2, porøsitet = 0.1	8
3.2	Hedeslette, homogen hydrostratigrafi, K ens i alle lag, Filter i lag 2, porøsitet = 0,01	8
3.3	Hedeslette, homogen hydrostratigrafi, K anisotropi fakt 1:100 (Kv:Kh) , Filter i lag 2, porøsitet = 0,02	8
4	Hedeslette med lækagelag, lag 4 er som lækagelag, Filter placeret i lag 7	8
5	Morænelandskab, lag 1+ 4 lækagelag, filter placeret i lag 7	8
5.1	Morænelandskab, lag 1+ 4 lækagelag, filter placeret i lag 2	8
5.2	Morænelandskab, lag 1+ 4 lækagelag, filter placeret i lag 2, porøsitet lækagelag = 0,05	8
6	Morænelandskab, lag 1+ 4 +6 lækagelag, filter placeret i lag 7	8
7	Morænelandskab, lag 1 lækagelag, geologiske sandvinduer i lag 3, filter i lag 7	8
7.1	Morænelandskab, geologiske sandvinduer i lag 1 + lag 4 lækagelag, filter i lag 2	8
7.2	Morænelandskab, lerlinser i lag 1, lag 4 lækagelag, filter i lag 2	8
8	Den begravede dal, lag 4 er lækagelag, Filter placeret i lag 7	8
9	Den begravede dal, lerlinser/bakkeøer i lag 1+2, lag 4 er lækagelag, Filter placeret i lag 7	8
10	Den begravede dal, vinduer i lag 2, lag 1 + 4 er lækagelag, Filter placeret i lag 7	8
11	Den begravede dal, lag 4 + 6 er lækagelag, Filter placeret i lag 7	8
11.1	Den begravede dal, lag 4 + 6 er lækagelag, Filter placeret i lag 7	12
12	Klimascenarier_Hedeslette som scenarie 1 (dog indvinder A fra filter 7 og B i filter 2)	8
13	Klimascenarier_Morænelandskab som scenarie 5 (A indvinder fra filter 7 og B fra filter 2)	8

Scenarie med Hedeslette (Scenarierne 1 til 4)

Med hedeslitemodellen er der beregnet i alt 7 scenarier. I scenarierne 1-3 testes effekten af filterniveauet i den homogene model, i det filterniveauet placeres i henholdsvis 2. 5. og 7. beregningslag; i scenarierne 3.1 og 3.2 reduceres porøsiteten i sandmagasinet 20 % til 10 % og 1 %; i scenarie 3.2 ændres anisotropi faktoren fra 1:10 til 1:100 (Kv:Kh); scenarium 4 hvor der introduceres et lækagelag i beregningslag 4 og der indvindes i lag 7.

Scenarie med morænelandskab (Scenarierne 5 til 7)

I modellen for morænelandskabet udgør det øverste lag et morænelerslag, og der tilføjes 1 og 2 lækagelag i henholdsvis 4. og 6. beregningslag i scenarie 5 og 6. I begge scenarier indvindes der fra beregningslag 7. I underscenarierne 5.1 og 5.2 indvindes der fra beregningslag 2, og i 5.2 er porøsiteten reduceret fra 20 til 5 %.

I scenarie 7 suppleres lækagelaget i beregningslag 3 med sandvinduer. Indvindingen fra boring A og B foregår fra lag 7. I underscenarierne 7.1 og 7.2 er indvindingen dog flyttet til det 2. beregningslag; i 7.1 er der introduceret sandvinduer i lag 1; i 7.2 er der introduceret lerlinser i lag 1.

Scenarier med begravet dal (Scenarierne 8 til 11)

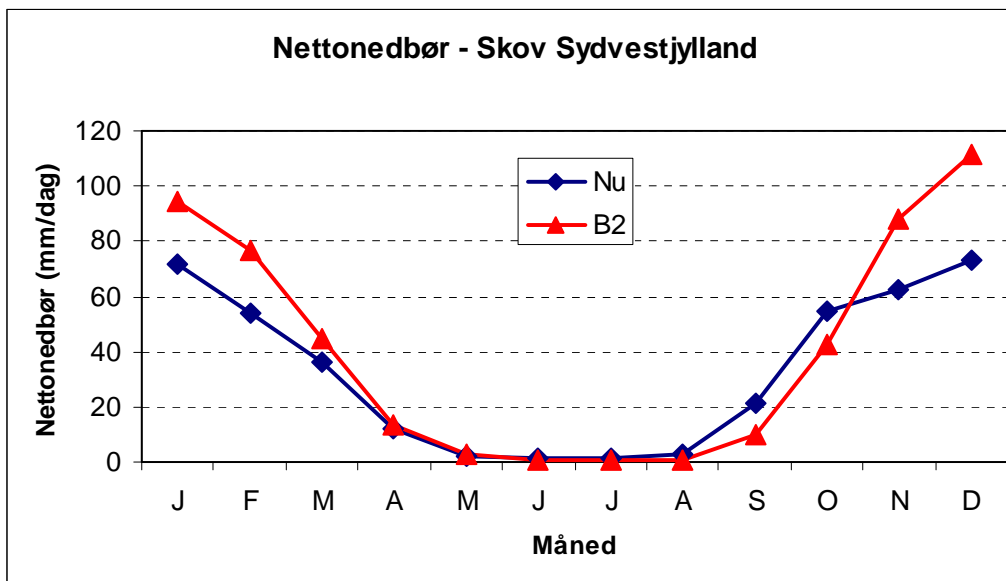
Scenarium 8 er for et morænelandskab med en begravet dal fyldt med sand og et lækagelag (lag4). Den hydrauliske ledningsevne omkring dalen er som for fed ler. Der indvindes fra den begravede dals det nederste beregningslag 7. I scenarium 9 er der introduceret lerlinser i 1. og 2. beregningslag, mens der i scenarium 10 er introduceret sandvinduer i beregningslag 2. I scenarium 11 er der tilføjet et yderligere lækagelag i den begravede dal i beregningslag 6.

Scenarier med indbyggede klimaændringer (Scenarierne 12 og 13)

Afslutningsvis er der udført B2 klimascenarier (jf. Figur 14) for henholdsvis den homogene hedeslette-model fra scenarium 1 og morænelandskabsmodellen fra scenarium 5. Dog er indvindingerne for boring A og B placeret i henholdsvis beregningslag 7 og beregningslag 2.

Der ses herved på betydningen af langtidseffekterne af forventede klimaændringer, som forventes at øge den samlede infiltrations størrelse over tid og specielt i vinterhalvåret. Den anvendte nettonedbør i klimascenarierne er beregnet ved at gange passende månedsfaktorer på de daglige nettonedbørsværdier fra den ovenfor benyttede 20 års periode. Her ved sikres, at den anvendte nettonedbørsfrekvens er ens i det nuværende og det fremtidige klimascenarie, mens det kun er amplituden (intensiteten) der ændres. Månedskorrektionsfaktorerne er der fundet ved at sammenligne nettonedbørstidsserier for et skovdækket område for det nuværende klima med en tilsvarende tidsserie beregnet ved delta-change metoden for klimascenarie B2 (jf. Figur 14) (Sonnenborg et al., 2006). Valget af skovdækket område er gjort for at undgå potentiel negativ nettonedbør i tørre somre, med deraf følgende urealistiske månedskorrekationer.

Modellen køres i 30 år, som for de foregående simuleringer, og partikelbanesimuleringerne køres ved at recycle de 20 års simuleringer 10-15 gange ind til, at alle partikler har nået indvindingsfiltrene.



Figur 14 Nuværende klima og B2 scenarie klima (efter Sonnenborg, 2006). Udregning af nettonedbørs månedskorrektion er sket på baggrund af forholdet mellem disse

4.5 Sammenfatning

Ud fra en eksisterende model for Karup-Å-oplandet, er der opstillet 3 syntetiske numeriske grundvandsmodeller med 8 beregningslag i programmet MIKE-SHE. Modellerne er opstillet for en hedeslette, en moræneslette samt for et område med en begravet dal-model.

Der skal efterfølgende foretages en sammenligning af forskellen imellem stationære og dynamisk beregnede indvindings- og grundvandsdannende oplande for to indvindingsboringer A og B, som indvinder synkront med en konstant værdi på 950.000 m³/år svarende til ca. 2 % af områdets samlede årlige nettonedbør. Ved de dynamiske simuleringer foretages beregningerne med dynamisk nettonedbør, mens indvindingerne regnes stationære. Oplandsberegningen foretages ved partikelflytning.

Modellerne ændres i en række scenarier for at undersøge betydningen af f.eks. lækagelag, filterinterval, porøsitet, og vertikal anisotropi (Kh:Kv) for aquiferlagene. I forbindelse med modellen for den begravede dal er det endvidere undersøgt, om den vertikale diskretisering har betydning for partikelbanesimuleringerne i dalsystemet. Endelig er der udført et klimascenarie for henholdsvis hedeslette-modellen og moræneslette-modellen, hvor nettonedbøren til modellen er øget med ca. 10-25 % primært i vinterhalvåret. Til sammen skal disse undersøgelser gerne give et billede af, hvilke faktorer som har størst betydning i forhold til form og udstrækning på grundvandsdannende oplande.

Som optakt til oplandsberegningerne er det i begrænset omfang undersøgt, hvilken betydning den initiale placering henholdsvis en løbende tilførsel af partikler har i forbindelse med stationære henholdsvis dynamiske modelkørsler.

5. Resultater

5.1 Indledning

Her følger en beskrivelse af hovedresultaterne fra de 12 gennemregnede scenarier for henholdsvis en hedeslette, et morænelandskab (en øst-dansk geologi) og et område med en begravet dal (jf. Tabel 1 og Tabel 2). For hvert scenarie vil der blive præsenteret en overordnet vandbalance.

I beskrivelsen vil indgå en sammenligning af de grundvandsdannende oplandes arealer (i det følgende forkortet til GO) beregnet med den stationære og den dynamiske model for alle 13 hovedscenarier. Arealsammenligningerne er udført i ArcGIS, hvor sammenligningen er foretaget på aggregerede oplande. Det aggregerede opland er beregnet ud fra en fast GIS-rutine, hvor celler, der indeholder partikler i det øverste beregningslag (lag 1), udgør det GO. Det aggregerede opland kan således godt indeholde beregningsceller, hvor blot én partikel er havnet i cellen og således bidrager til det GO.

Der er efterfølgende udarbejdet en sammenligning imellem det stationære og det dynamisk beregnede GO (samlet for boring A og B). Indledningsvis for hvert scenarie beregnes et fællesmængdeopland (FO), der udgør det areal, hvor både den stationære og den dynamiske løsning beregner et GO. Arealforskellen, der viser forskellen i grundvandsdannende areal under stationær beregninger i forhold til areal ved dynamiske beregninger, udregnes i procent som $(\text{Stationært GO} - \text{Dynamisk GO}) / \text{Dynamisk GO}$. Arealafvigelsen, dvs. hvor meget afviger de stationære beregninger fra de dynamiske beregninger, udregnes som $(\text{Stationært GO} - \text{FO}) / \text{Dynamisk GO}$. (jf. Bilag 1)

Endvidere vil aldersfordelingen/transporttiden (dvs. antal år fra nedsivning ved overfladen til ankomst ved indvindingsfilter) også kort blive beskrevet i et separat afsnit.

Tabel 2 Oversigt over de udførte modelscenarier for de 3 geologyper

Geologytype	Hedeslette	Morænelandskab	Begravet dal
Filtersætning lag 2	X	X	
Filtersætning lag 7	X	X	X
Lækagelag lag 4	X	X	X
Lækagelag lag 4 og 6		X	X
Porøsitet	X	X	
Anisotropi faktor (Kh:Kv) 1:10	X		
Anisotropi faktor (Kh:Kv) 1:100	X		
Klimascenarie øget N_{vinter}	X	X	

5.2 Hedeslette-model

5.2.1 Scenarier

Der er udført i alt 7 scenarier for hedeslette modellen, hvor der er fokuseret på betydningen af filterniveau og lækagelag. Der er også udført 3 underscenarier, hvor porøsitet samt anisotropi-faktoren (Kv:Kh) er ændret. Der indvindes i alle scenarier med en konstant synkron indvinding på 950.000 m³/år fra boring A og B.

5.2.2 Vandbalance

Stationær model

Den beregnede vandbalance Tabel 3 for den stationære hedeslette model viser, at der tilføres modellen 504 mm/år som nettonedbør. Heraf afgives ca. 21 mm/år til dræn og 38 mm/år til overfladisk afstrømning (som strømmer til vandløb) og 435 mm/år strømmer til vandløb fra mættede zone. Indvindingen Q, som er konstant, udgør ca. 10 mm/år.

Dynamisk model

Den beregnede vandbalance Tabel 3 for den dynamiske hedeslette model viser, at der tilføres modellen 504 mm/år som nettonedbør. Heraf afgives ca. 26 mm/år til dræn og 22 mm/år overfladisk afstrømning (som strømmer til vandløb) og 447 mm/år strømmer til vandløb fra mættede zone. Indvindingen udgør ca. 10 mm/år.

Tabel 3 Vandbalancer for scenarium 1.0 stationær og dynamisk model

Vandbalance 6st_1_0 (Hedeslette stationær model)

Lag	Nettonedbør	Overflade afstrømning	Grundvand op	Grundvand ned	Magasin ændring	Oppump.	Dræn	Baseflow	Fejl
1	504,0	37,6	0,0	0,0	0,0	0,0	21,5	435,1	0,0
2	0,0	0,0	405,4	415,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	322,5	332,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	260,9	270,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	207,0	216,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	157,2	167,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	110,0	119,8	0,0	9,8	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	56,9	56,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Vandbalance 6_1_0 (Hedeslette dynamisk model)

Lag	Nettonedbør	Overflade afstrømning	Grundvand op	Grundvand ned	Magasin ændring	Oppump.	Dræn	Baseflow	Fejl
1	504,0	21,6	0,0	0,0	-1,0	0,0	26,4	447,2	0,0
2	0,0	0,0	411,1	420,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	326,5	336,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	264,0	273,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	209,4	219,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	159,1	168,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	111,3	121,1	0,0	9,8	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	57,5	57,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Forskellene fra vandbalancen i den "stationære model" og den "dynamiske model" ligger i fordelingen af vand som strømmer til vandløb. I den stationære model vil det øvre vandspejl have en middelflacing, hvilket betyder, at gradienten til dybere liggende lag i den

grundvandsdannende periode (primært vinter halvåret) ikke bliver helt så stor som under dynamiske forhold. Dette påvirker grundvandsdannelsen til dybere liggende lag i modellen og dermed også udstrømningsvarianterne til vandløb. Helt principielt er stationaritets betragtningen mindre gyldig des tættere vi kommer på overfladen, hvilket her får indflydelse på vandbalancen til vandløbene.

5.2.3 Beregnede oplande

På Figur 15 ses resultaterne af den stationære og den dynamiske partikelbanesimulering for modelscenarium 1, hvor der indvindes fra en homogen hedeslette i det 7. beregningslag. Af figuren fremgår det, at der kun er en mindre forskel mellem det stationært beregnede opland og det dynamisk beregnede opland. Der er således en areal forskel på -2% hvor det stationært beregnede opland er mindre end det dynamisk beregnede opland. Arealafvigelsen er på 8% (Tabel 3). Tilsvarende resultater gør sig gældende for modelscenarie 2, hvor der indvindes tættere på terræn fra det 5. beregningslag.

Tabel 4 Areal sammenligninger for scenarie 1-4

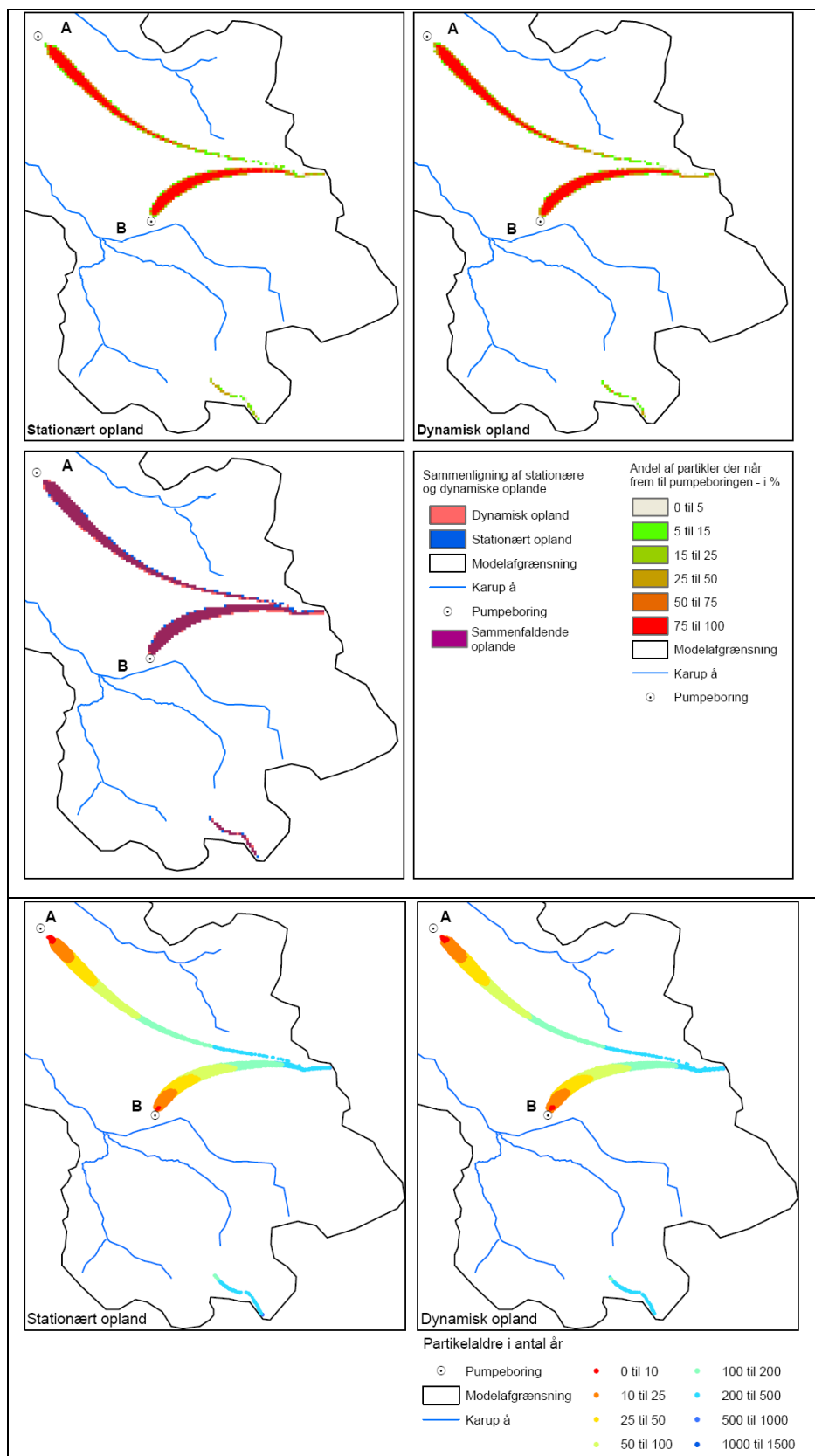
Scenarier	Areal forskel	Areal afvigelse
	$[(GO_{stat} - GO_{dyn}) / GO_{dyn}]$	$[(GO_{stat} - FO) / GO_{dyn}]$
Scenarium 1	-2%	8%
Scenarium 2	-3%	7%
Scenarium 3	-2%	4%
Scenarium 3.1	-2%	3%
Scenarium 3.2	-6%	2%
Scenarium 3.3	-4%	3%
Scenarium 4	7%	21%

For scenarium 3, hvor der indvindes fra lag 2, bliver holder areal forskellen på -2%, mens arealafvigelsen falder til 4%. Det bemærkes, at det gvd-opland for scenarium 3 (Figur 16) er væsentlig kortere men bredere end det tilsvarende gvd-opland for scenarium 1. Filterdybden har således stor betydning for formen og beliggenheden af oplandet.

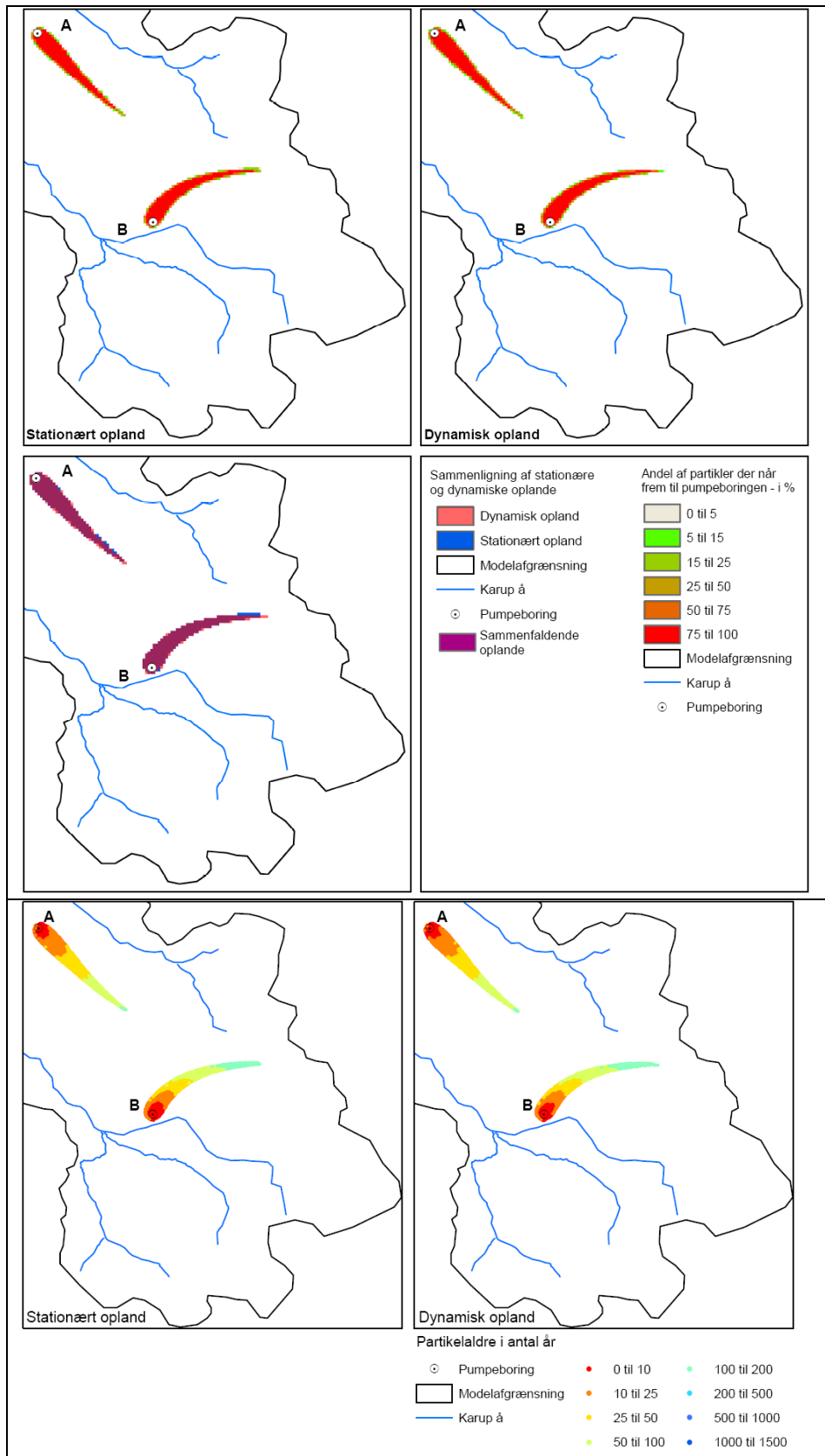
Udregnes massebalance (Tabel 5) for indvundne partikler ses det at forskellen mellem stationære og dynamiske simuleringer er 1-2 %. Det større opland i de dynamiske simuleringer ikke skyldes at mere vand indvindes eller at der er fejl på massebalancen, men at der indvindes en mindre andel af grundvandsdannelsen fra de enkelte beregningsceller.

Tabel 5 PT-balance Hedeslette model (scenarium 1 - kørsel 6_1_0 og 6st_1_0)

	kørsel	antal partikler	middel	spredning	relativ	masse
		til indvinding	alder	alder	masse	forskel
Boring A	stationær	7312	62,8	50,7	17,6	1,38%
	dynamisk	7514	63,4	51,1	17,9	
Boring B	stationær	7568	85,1	76,5	18,2	-2,02%
	dynamisk	7518	83,7	74,1	17,9	



Figur 15 Stationære og dynamiske GO og aldersfordeling for scenarie 1, en hedeslette med indvinding fra lag 7

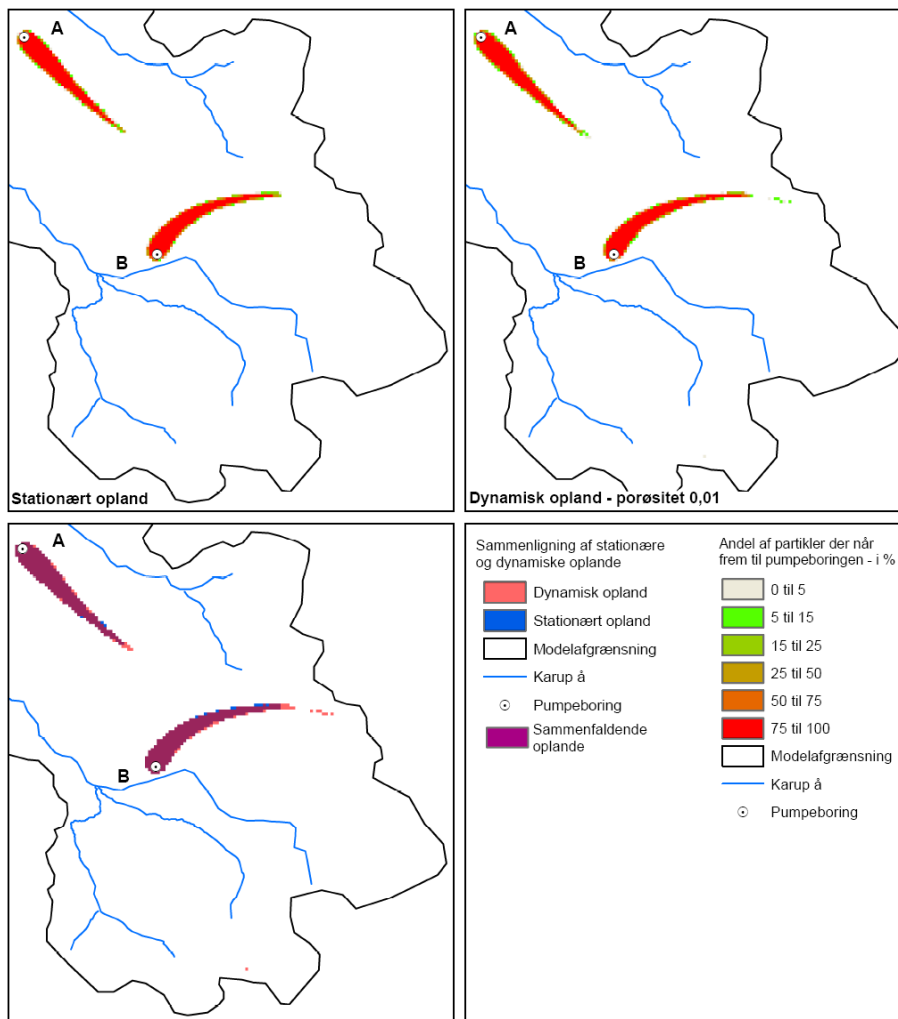


Figur 16 Stationære og dynamiske GO og aldersfordeling for scenarie 3, en hedeslette med indvinding fra lag 2

5.2.4 Oplande ved mindre porøsitet

Ud over scenarie 3 er der udført 2 underscenerier, 3.1 og 3.2, hvor porøsiteten er reduceret. På Figur 17 ses de GO for scenarie 3.2, hvor porøsiteten for alle lag er reduceret (fra 0,2) til 0,01. Ved sammenligning af Figur 16 og 17 bemærkes det, at med den mindre porøsitet forlænges oplandet til boring B med ca. 300 m, ligesom der sker mindre ændringer i periferien af oplandene. Areal forskellen ændre sig fra -2% til -6% (Tabel 4).

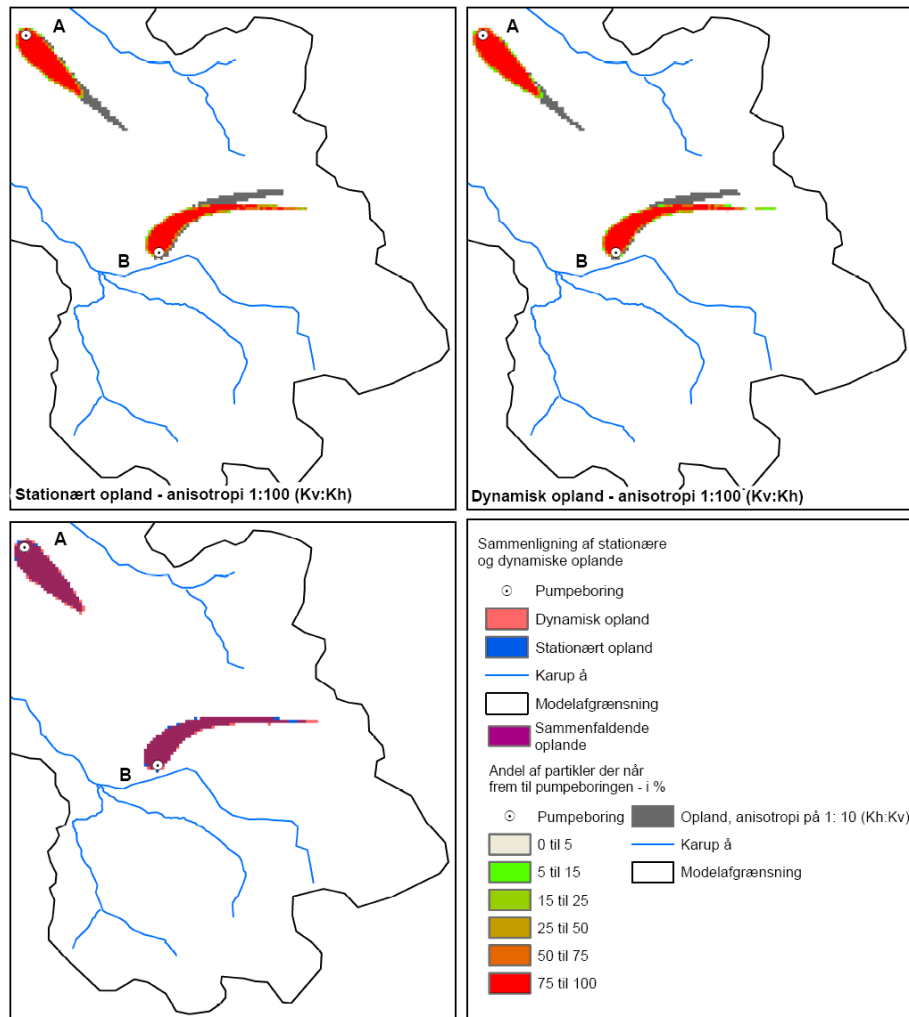
Dette er principielt i overensstemmelse med det i litteraturafsnittet beskrevne, hvor Reilly og Pollock (1996) forklarer, at des kortere transportid (dvs. des mindre porøsiteten), des større sandsynlighed er der for at se forskelle på oplande beregnet med stationært grundvandspejl i forhold til beregnet med dynamisk varierende grundvandspejl.



Figur 17 Stationære og dynamiske GO for scenarie 3.2, en hedeslette med lille effektiv porøsitet (0,01)

5.2.5 Oplande ved formindsket anisotropi (Kv:Kh)

I underscenario 3.3 er anisotropien (Kv:Kh) reduceret fra 1:10 til 1:100 i alle beregningslag. De beregnede GO fremgår af Figur 18, hvor der med grå legende også er optegnet de beregnede GO for udgangsscenarioet (scenarie 3). Det bemærkes, at anisotropien har markant betydning for beliggenheden af de beregnede GO. Som for scenarium 3.2 er areal forskellen øget, i dette tilfælde til 4% i forhold til udgangsscenarioet (2%). Forøgelsen skyldes, at porøsiteten er ændret fra 0,2 til 0,02 (Tabel 4).



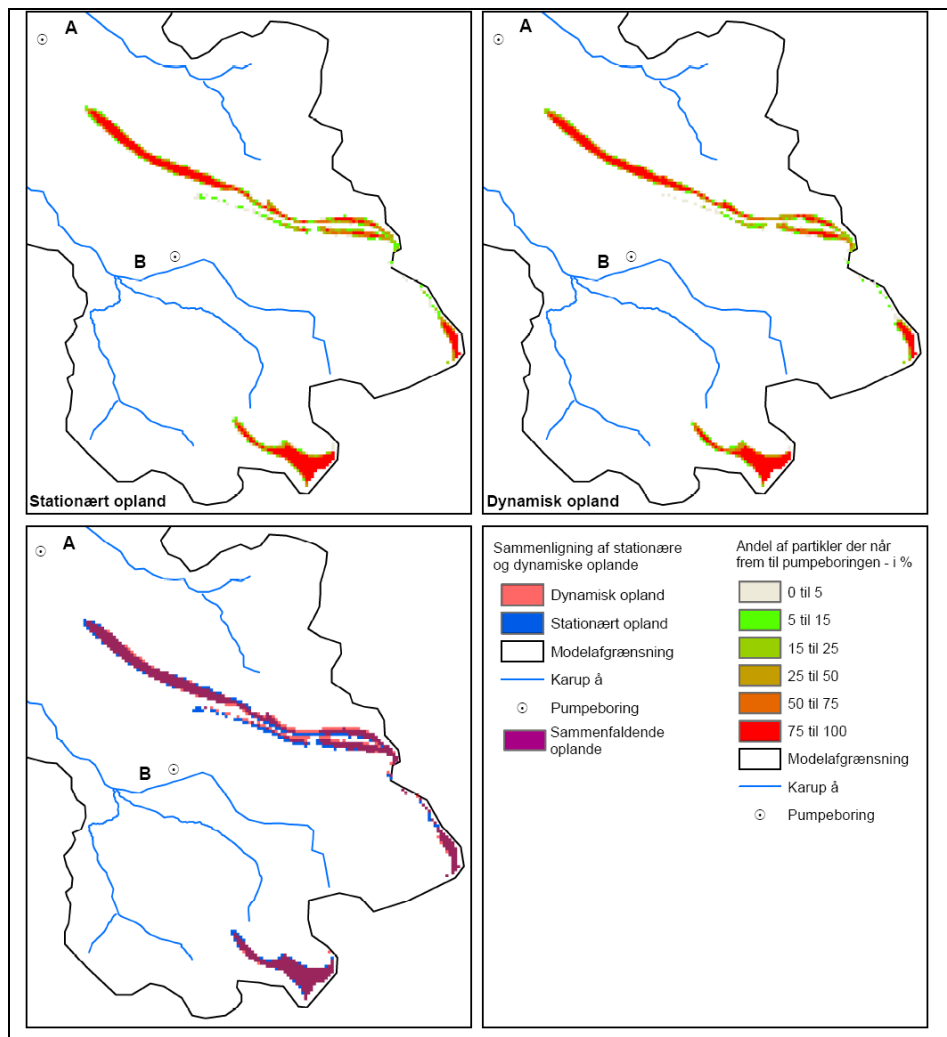
Figur 18 Stationære og dynamiske GO for scenarie 3.3, en hedeslette med markant anisotropi (1:100). De "grå oplande" er beregnet i scenarie 3 (med en anisotropi på 1:10)

5.2.6 Oplande ved lækagelag i lag 4, filter i lag 7

På Figur 19 ses resultaterne af den stationære og den dynamiske partikelbanesimulering for hedeslette-modellen med et lækagelag i beregningslag 4, og hvor der indvindes fra lag 7. Som det fremgår af figuren er der en vis arealafvigelse mellem det stationært- og dynamisk beregnede GO. Af Tabel 4 fremgår det, at areal forskellen er 7%, mens arealafvigelse

sen er helt oppe på 21%. Dette er de største afvigelse, som er fundet imellem stationært og dynamisk beregnede GO i denne undersøgelse.

Det bemærkes, at det gvd-opland til boring B er delt i to områder, hvor den ene del ligger mod nord, mens den anden del ligger langt sydligere end boring B, sydligere end to vandløb og tæt på modelranden. En sammenligning med Figur 16 illustrerer, at lækagelaget har stor betydning for beliggenheden af oplandene til de to borer.



Figur 19 Stationære og dynamiske GO for scenarie 4, en hedeslette med lækagelag

5.3 Morænelandskabs-model

5.3.1 Scenarier

Der er gennemregnet 3 hoved scenarier (scenarie 5 – 7) for moræneslette-modellen, hvor der er fokuseret på betydningen af heterogenitet i det øverste beregningslag samt evt. i det 4. og 6. beregningslag. Der er udført 2 underscenarier (7.1 og 7.2), hvor det øverste morænelerslag enten er ændret til et morænelerlag gennemsat af sandvinduer, eller er ændret til et sandlag med lerlenser. Endelig er der gennemregnet to underscenarier, hvor porøsiteten i moræneleret er ændret fra 0,2 til 0,05 og hvor indvindingsniveauet er ændret (under scenarie 5.1 og 5.2).

Der indvindes synkront med en konstant rate på 950.000 m³/år fra boring A og B.

5.3.2 Vandbalance

Stationær model

Den beregnede vandbalance for den stationære moræneslette-model i Tabel 6 viser, at der tilføres modellen 504 mm/år som nettonedbør. Heraf afgives ca. 256 mm/år til dræn, 8 mm/år danner overfladisk afstrømning (som strømmer til vandløb) og 230 mm/år strømmer til vandløb fra mættede zone. Indvindingen udgør ca. 10 mm/år.

Dynamisk model

Tabel 6 viser, at der tilføres modellen 504 mm/år som nettonedbør. Heraf afgives ca. 257 mm/år til dræn og 6 mm/år overfladisk afstrømning (som strømmer til vandløb) og 232 mm/år strømmer til vandløb fra mættede zone. Indvindingen udgør ca. 10 mm/år og der er en mindre magasinering i perioden på ca. 1 mm/år.

Tabel 6 Vandbalancer for scenarium 5 stationær og dynamisk model

Vandbalance 6st_5_0 (Moræne stationær model)

Lag	Netto- nedbør	Overflade afstrømning	Grundvand op	Grundvand ned	Magasin ændring	Oppump.	Dræn	Baseflow	Fejl
1	504,0	8,5	0,0	0,0	0,0	0,0	255,6	230,1	0,0
2	0,0	0,0	329,7	339,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	162,8	172,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	30,4	40,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	30,3	40,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	23,3	33,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	16,3	26,2	0,0	9,8	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	11,0	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Vandbalance 6_5_0 (Moræne dynamisk model)

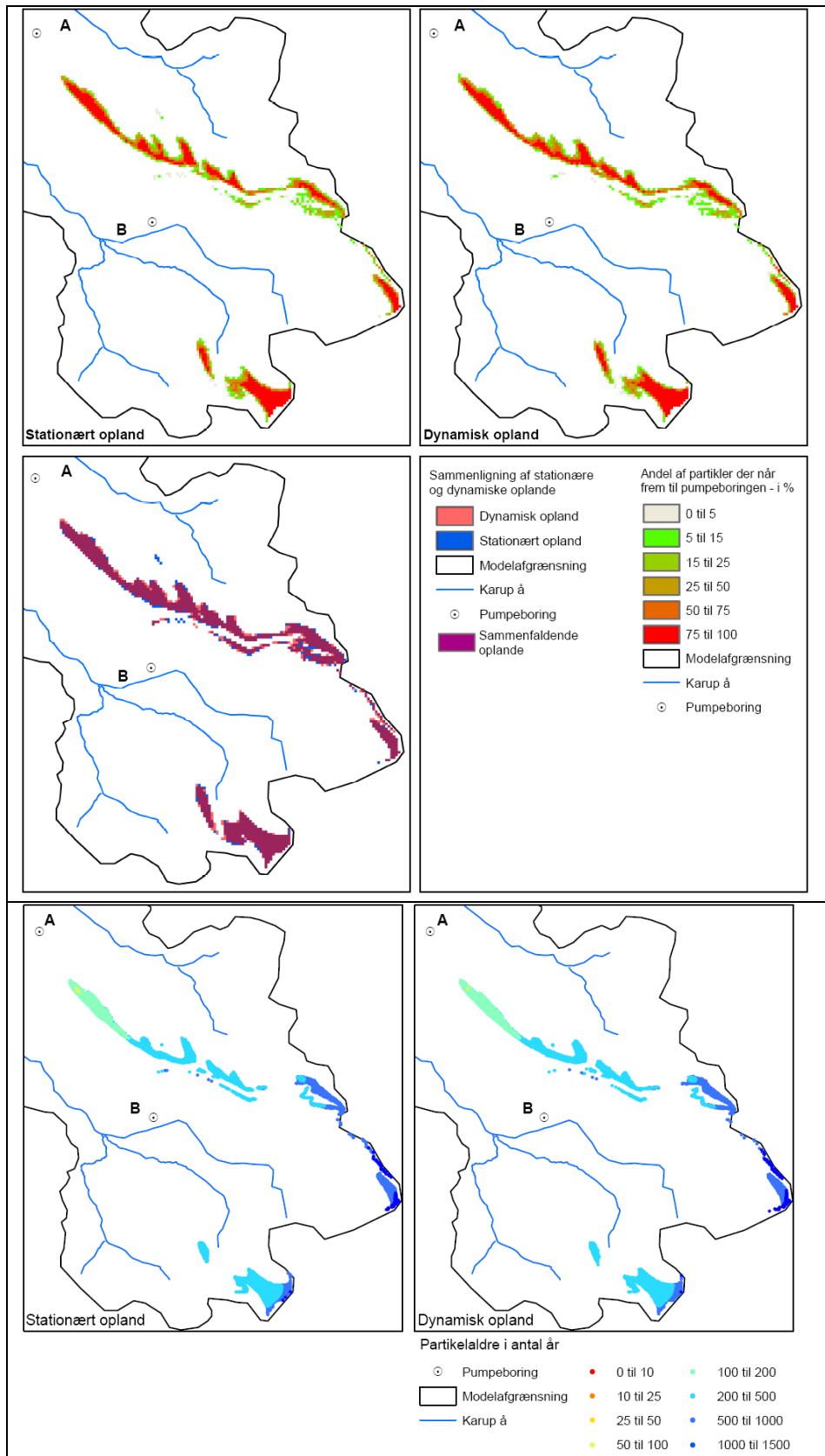
Lag	Netto- nedbør	Overflade afstrømning	Grundvand op	Grundvand ned	Magasin ændring	Oppump.	Dræn	Baseflow	Fejl
1	504,0	6,2	0,0	0,0	-0,5	0,0	256,8	231,7	0,0
2	0,0	0,0	324,2	334,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	160,6	170,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	30,3	40,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	30,2	40,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	23,1	32,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	16,2	26,0	0,0	9,8	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	10,9	10,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

5.3.3 Beregnede oplande

Figur 20 viser for scenarium 5 resultaterne af henholdsvis den stationære og den dynamiske partikelbanesimulering. I dette scenarium består lag 1 af moræneler og lag 4 er et lækagelag. Der indvindes fra det 7. beregningslag. Af figuren fremgår det, at der kun er en mindre forskel mellem det stationært og det dynamisk beregnede opland. I Tabel 7 er areal forskellen mellem det stationært og dynamisk beregnede GO opgjort til 3%, mens arealafvigelsen er 8%. Tilsvarende tendens gør sig gældende for scenarium 6, hvor der er tilføjet et ekstra lækagelag i det 6. beregningslag, og i scenarium 7, hvor der er tilføjet geologiske vinduer i lag 4. Scenarie 7.1 og 7.2 med øget grad af sandindhold i det øverste moræne-dække viser faldende areal afvigelse i forhold til basis scenariet 7.

Tabel 7 Areal sammenligninger for scenarie 5-7

Scenarier	Areal forskel	Areal afvigelse
	$[(GO_{stat} - GO_{dyn}) / GO_{dyn}]$	$[(GO_{stat} - FO) / GO_{dyn}]$
Scenarium 5	-3%	8%
Scenarium 5.1	-4%	3%
Scenarium 5.2	-11%	5%
Scenarium 6	-3%	5%
Scenarium 7	0%	10%
Scenarium 7.1	0%	7%
Scenarium 7.2	0%	4%



Figur 20 Stationære og dynamiske GO og aldersfordeling for scenarie 5

Udregnes massebalance for indvundne partikler, ses det, at forskellen mellem stationære og dynamiske simuleringer er 3-8 %, hvorved det større opland i de dynamiske simuleringer

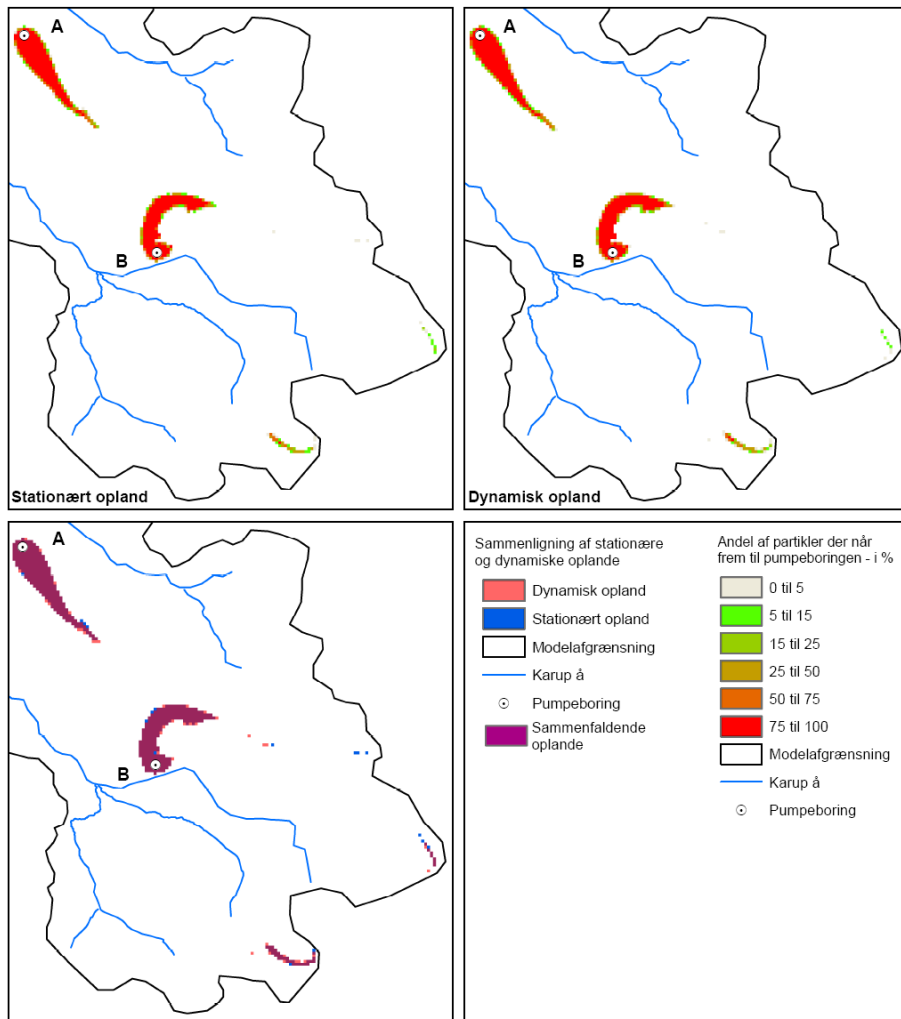
er af samme størrelsesorden som forskellen på massebalancen for de to modeltyper (Tabel 8).

Tabel 8 Massebalance moræne model (scenarium 5 - kørsel 6_5_0 og 6st_5_0)

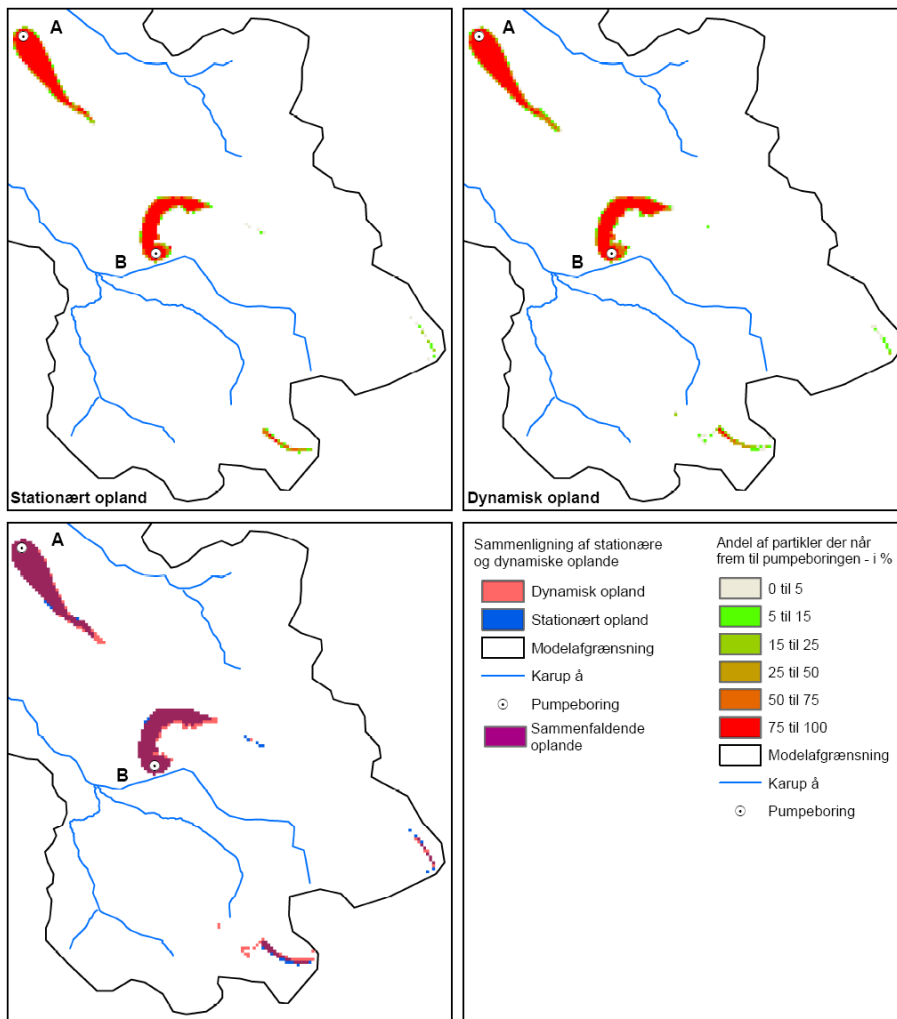
		antal partikler	middel	spredning	relativ	masse
	kørsel	indvundet	alder	alder	masse	forskel
Boring A	stationær	8224	330,0	199,0	24,2	8,54%
	dynamisk	8844	328,8	195,8	26,5	
Boring B	stationær	7674	485,2	209,3	22,6	3,14%
	dynamisk	7792	481,7	208,6	23,3	

5.3.4 Oplande ved ændret porøsitet og filterniveau

I scenarierne 5.1 og 5.2 er indvindingen fra borerne A og B flyttet til lag 2. For scenarium 5.2 er porøsiteten i moræneleren desuden reduceret fra 0,2 til 0,05. Figur 21 viser scenarium 5.1 resultater, hvor der ikke er den store forskel på, om de gvd-opland er beregnet stationært eller dynamisk. Figur 22 viser scenarium 5.2 med porøsiteten reduceret til en fjerdedel men ellers identisk med scenarium 5.1. Af Figur 22 forekommer der en vis forskel mellem de stationære og de dynamisk beregnede oplande. De dynamisk beregnede oplande får længere haler og bliver lidt bredere, og der bliver flere enkelt celler med ganske få partikler, som kommer til at få stor indflydelse på areal forskellen. Af Tabel 7 ses at scenarium 5.2 har en areal forskel på 11%, hvilket er den største afvigelse opnået af alle scenarier, samt at arealafvigelsen er på 5%, hvilket er i den lave ende for alle scenarier. Til trods for den lave porøsitet og tætte placering af indvindinger tæt på terræn er den beregnede gennemsnitsalder stadig 20-30 gange større end de tidlige variationer i nedbøren, og der er således intet i litteraturen eller de andre scenarier som indikerer, at der burde optræde en areal forskel på så meget som 11%. Den mest sandsynlige forklaring på forskellen skal derfor søges i partikeltilførslen (primært antallet og fordelingen), hvilket støttes af, at det er celler med ganske få partikler, som bidrager væsentligt til areal forskellen.



Figur 21 Stationære og dynamiske GO for scenarie 5.1



Figur 22 Stationære og dynamiske GO for scenarie 5.2

5.4 Begravet dal-model

5.4.1 Scenarier

Der er udført i alt 4 hovedscenarier (scenarie 8-11) for den begravede dal-model, hvor der bl.a. fokuseres på betydningen af lerbæklag i dalen og heterogenitet af lagene over den begravede dal. I alle fire scenarier er der et lerbæklag (beregningsslag 4) i den begravede dal, dækkende indvindingen fra den dybere del af dalen. I scenarium 8 er dalen dækket af homogent sand, i scenarium 9 er der lerbæklag i det dækkende sandlag, i scenarium 10 er dalen dækket af ler med sandlinser og i scenarium 11 er dalen dækket af sand, men der er indført et ekstra lerbæklag i selve dalen (beregningsslag 6). Herudover er der udført et underscenarium (scenarium 11.1), som er geologisk identisk med scenarie 11 men hvor modellen er underopdelt i 12 beregningsslag i stedet for 8 for at teste påvirkningsgraden af den rumlige opløsning af hastighedsfeltet.

Der indvindes med en konstant synkron indvinding på 950.000 m³/år fra boring A og B.

5.4.2 Vandbalance

Stationær model

Den beregnede vandbalance for den stationære begravet dal-model i Tabel 9 viser, at der tilføres modellen 504 mm/år som nettonedbør. Heraf afgives ca. 58 mm/år til dræn, 83 mm/år bliver til overfladisk afstrømning (som strømmer til vandløb) og 353 mm/år strømmer til vandløb fra mættede zone. Indvindingen udgør ca. 10 mm/år.

Dynamisk model

Tabel 9 viser, at der tilføres den dynamiske model 504 mm/år som nettonedbør. Heraf afgives ca. 108 mm/år til dræn, 10 mm/år bliver til overfladisk afstrømning (som strømmer til vandløb) og 377 mm/år strømmer til vandløb fra mættede zone. Indvindingen udgør ca. 10 mm/år og der er en mindre negativ magasinering i perioden på ca. 1 mm/år. Der er stor forskel på vandbalancen for den stationære og dynamiske model til og med lag 3. Specielt er fordelingen mellem baseflow, dræn og overfladisk strømning til vandløbet forskellig. Det er en kendt problemstilling, at fordelingen af vandfluxe til vandløb ændrer sig, når der regnes stationært i forhold til dynamisk. Antagelserne om stationaritet i de øvre lag holder ikke, hvorfor også de interne vandstrømninger i specielt i de overfladenære lag vil være fejlbæftede og forskellige fra tilsvarende beregnet uden antagelser om stationaritet.

Tabel 9 Vandbalancer for scenarium 11 stationær og dynamisk model

Vandbalance 6st_11_0 (Dal stationær model)

Lag	Nettonedbør	Overflade afstrømning	Grundvand op	Grundvand ned	Magasin ændring	Oppump.	Dræn	Baseflow	Fejl
1	504,0	83,3	0,0	0,0	0,0	0,0	57,6	353,4	0,0
2	0,0	0,0	314,4	324,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	56,7	66,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	4,4	14,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	4,3	14,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	1,3	11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	1,1	11,0	0,0	9,8	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	5,2	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Vandbalance 6_11_0 (Dal dynamisk model)

Lag	Nettonedbør	Overflade afstrømning	Grundvand op	Grundvand ned	Magasin ændring	Oppump.	Dræn	Baseflow	Fejl
1	504,0	9,5	0,0	0,0	-0,8	0,0	108,2	377,4	0,0
2	0,0	0,0	329,3	339,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	60,1	69,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	5,0	14,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	4,6	14,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	1,5	11,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	1,2	11,1	0,0	9,8	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	5,3	5,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

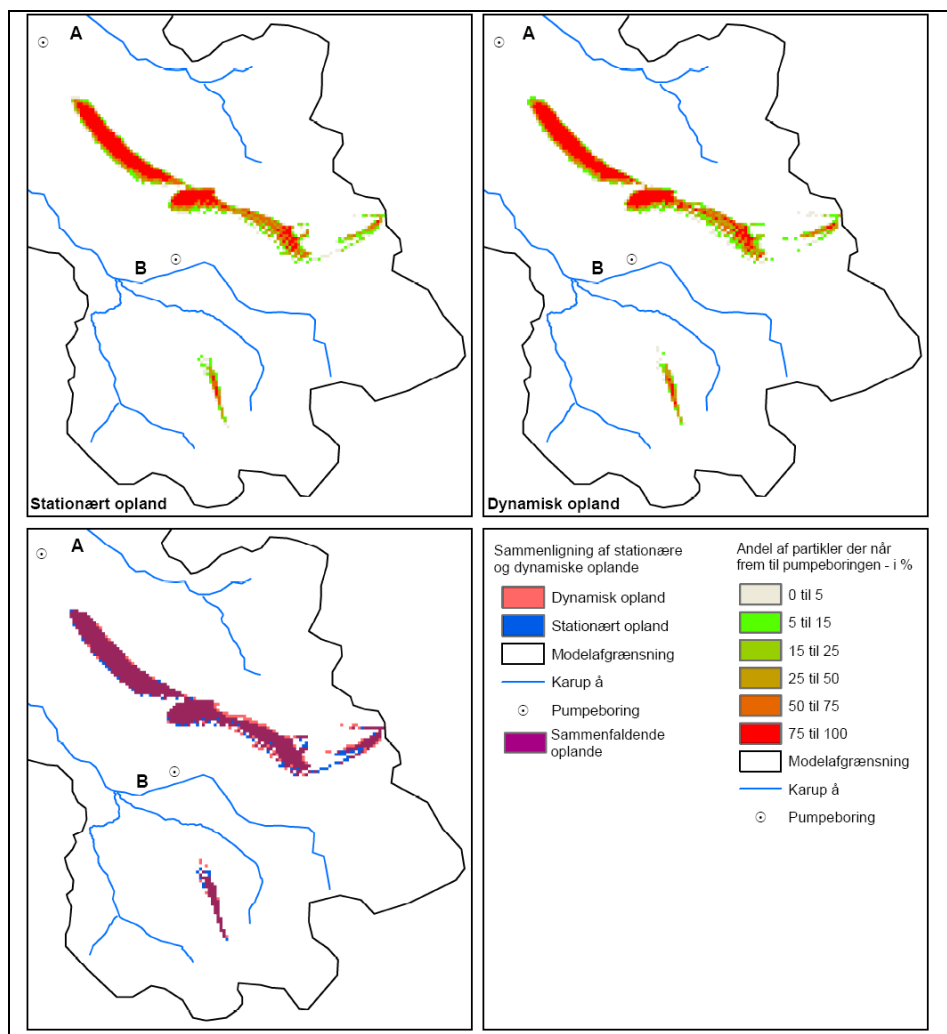
5.4.3 Beregnede oplande

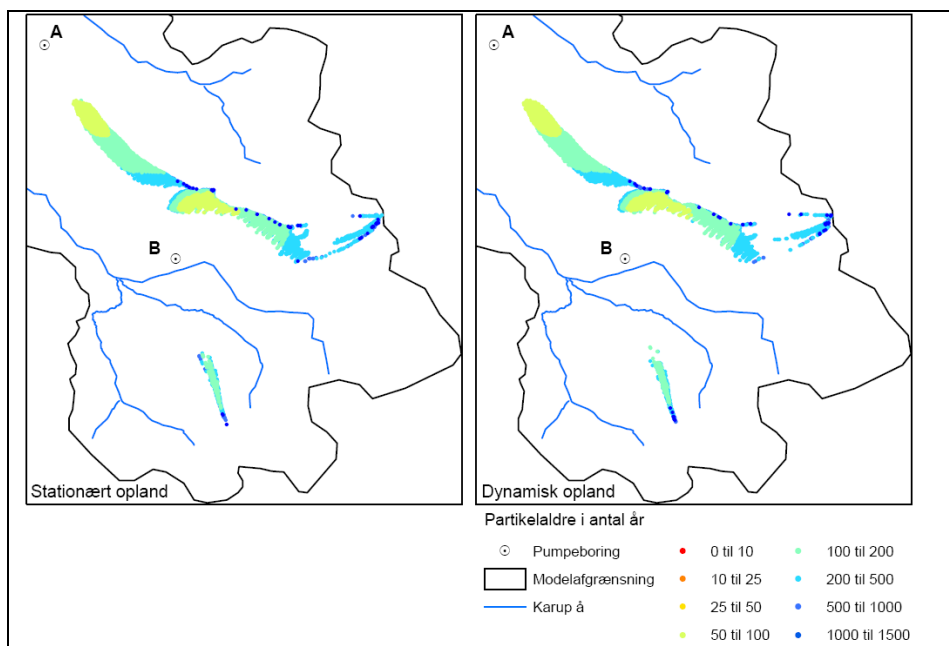
På Figur 23 ses for modelscenarium 8 den stationære og den dynamiske partikelbanesimulering for den begravede dal-model, når der indvindes fra beregningslag 7. Af figuren fremgår det, at der er en hvis areal forskel på de beregnede GO. I Tabel 10 er areal forskellen beregnet til 2%, mens arealafvigelsen er beregnet til 10%. Tilsvarende ses for scenarierne

9 og 10 med en tendens til mindre areal forskel for stigende ler indhold i dæklaget (rent sand i scenarium 8, lidt ler i 9 og meget ler i 10). Resultaterne for modelscenarium 11 ligner resultaterne for scenarium 8 (begge har samme dæklag, men hvor der er tilføjet et yderligere lækagelag i det 6. beregningslag for scenarium 11).

Tabel 10 Areal sammenligning for scenarie 8-11

Scenarier	Areal forskel	Areal afvigelse
	$[(GO_{stat} - GO_{dyn}) / GO_{dyn}]$	$[(GO_{stat} - FO) / GO_{dyn}]$
Scenarium 8	-2%	10%
Scenarium 9	-1%	8%
Scenarium 10	-1%	5%
Scenarium 11	-1%	10%
Scenarium 11.1	-1%	10%





Figur 23 Stationære og dynamiske GO og aldersfordeling for scenarie 8

Udregnes massebalance (Tabel 11) for indvundne partikler ses det at forskellen mellem stationære og dynamiske simuleringer er 3%, hvilket er noget mindre end areal afvigelse, men i samme størrelsesorden som areal forskellen for de to modeltyper.

Tabel 11 Massebalance moræne model (scenarium 11 - kørsel 6_11_0 og 6st_11_0)

	kørsel	antal partikler til indvinding	middel alder	spredning alder	relativ masse	masse forskel (diff / dyn)
Boring A	6st_11_0	8582	235,8	138,2	26,5	-3,02%
	6_11_0	8714	238,5	145,5	25,7	
Boring B	6st_11_0	8174	246,6	173,2	25,2	-3,51%
	6_11_0	8260	241,8	162,4	24,4	

5.5 Klimascenarier

5.5.1 Scenarier

Der er udført 2 klimascenarier for henholdsvis Hedeslette-modellen og Moræneslette-modellen. Scenarierne, kaldet 12 og 13, svarer til scenarierne 1 og 5; blot er den normale nettonedbør udskiftet med forventet nettonedbør svarende til B2 klima scenariet. Boring A indvinder i begge scenarier fra lag 7, mens boring B indvinder fra lag 2 (i scenarium 5 indvindes udelukkende fra lag 7). Boringerne indvinder synkront i begge scenarier, og der indvindes konstant 950.000 m³/år.

5.5.2 Beregnede oplande

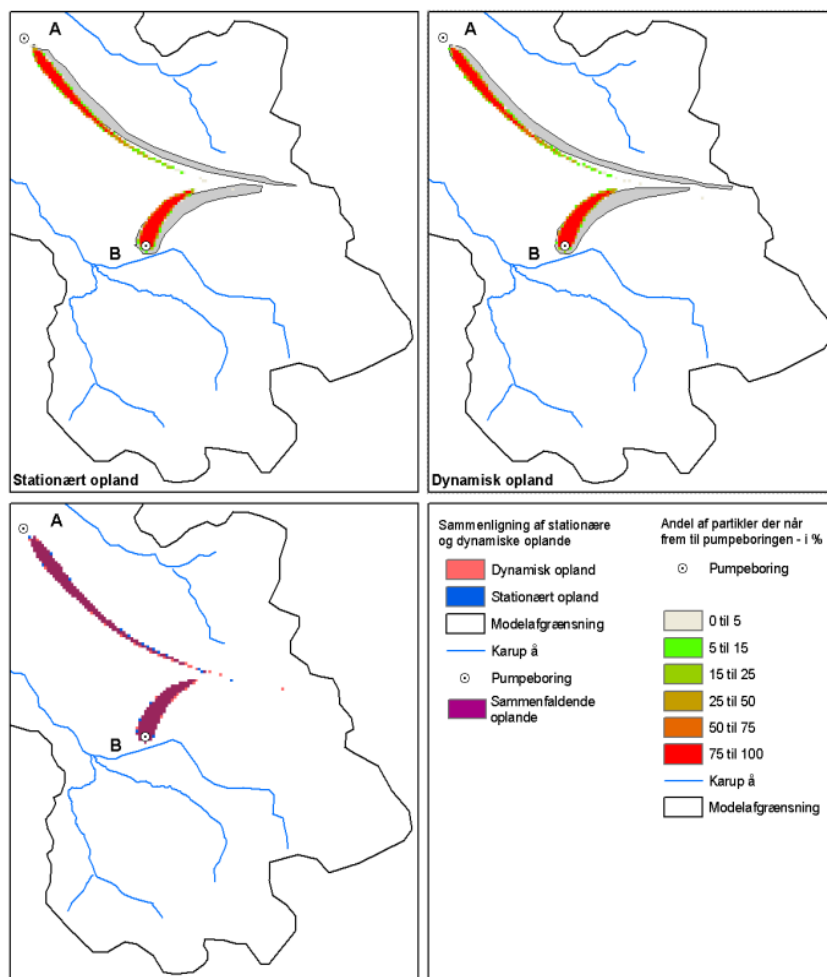
På figur 23 ses de beregnede GO for boring A og B for Scenarium 12 (Hedeslette-model identisk med scenarie 1, men med B2 klimascenarium der har mindre sommer nettonedbør

og mere vinter nettonedbør). Oplandene vist med grå legende er dem, som er beregnet i det tilsvarende scenarie 1 med den "normale" nettonedbørsfordeling. Som det fremgår af figur 23, at der som ved de andre scenarier ikke er stor forskel på om de GO er beregnet stationært eller dynamisk. Af Tabel 12 fremgår det, at areal forskellen er 3%, mens arealafvigelsen er 5%

Tabel 12 Areal sammenligning for scenarie 12 og 13

Scenarier	Areal forskel	Areal afvigelse
	$[(GO_{stat} - GO_{dyn}) / GO_{dyn}]$	$[(GO_{stat} - FO) / GO_{dyn}]$
Scenarium 12	-3%	5%
Scenarium 13	-1%	11%

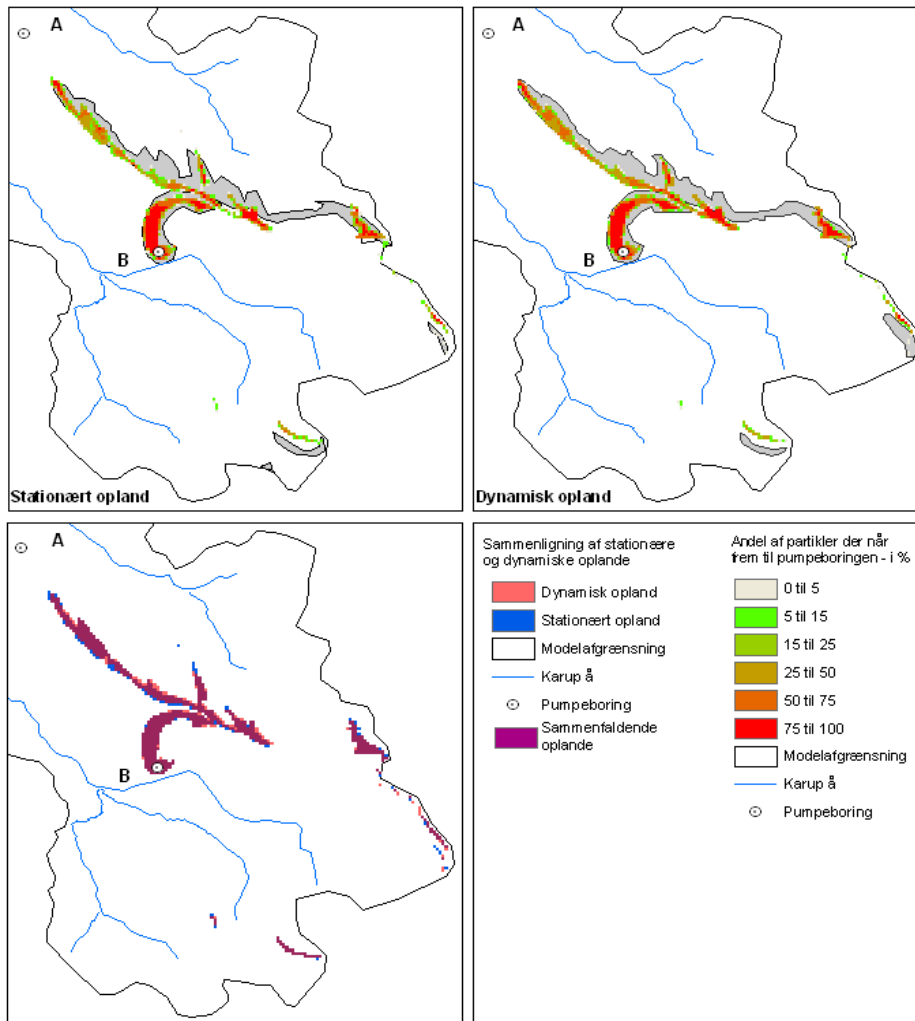
Sammenlignes det gvd-opland for klimascenariet med større nettonedbør med den "normale" nedbørssituation, ses det ikke overraskende, at de GO i klimascenariet har et noget mindre areal. Dette er forventeligt, da der samlet set tilføres mere nettonedbør til modellen under klimascenariet. Det bemærkes, at den forøgede nettonedbør giver anledning til, at især oplandet til boring B skifter retning (fra ØNØ til NØ).



Figur 24 Stationære og dynamiske GO for scenarie 12 (Hedeslette med klimascenarie). De grå oplande er beregnet med "normal nedbør". Det skal bemærkes at det grå område

på figuren er håndoptegnet, hvilket kan give indtryk af noget større arealforskel end der faktisk beregnes.

På Figur 25 ses de beregnede GO for boring A og B for scenarium 13 (morænelandskabsmodellen identisk med scenarium 5, men med ændret klima). Oplandene vist med grå legende er de oprindelige scenarium 5-oplande beregnet med den "normale" nettonedbørsfordeling. Det fremgår af figuren, at der i scenarium 13 er lidt forskel på beliggenheden af GO alt efter om den er beregnet stationært eller dynamisk. Af Tabel 12 fremgår det, at arealforskellen er 1%, men at arealafvigelsen er 11%. Sammenlignes de GO for klimascenariet med normal-nedbørs-oplandene ses det som under scenarie 12, at der er forskel.



Figur 25 Stationære og dynamiske GO for scenarie 13 (Moræneslette med klimascenarie). De grå oplande er beregnet med "normal nedbør". Det skal igen bemærkes at det grå område på figuren er håndoptegnet, hvilket kan give indtryk af noget større arealforskel end der faktisk beregnes.

5.6 Transporttider alle scenarier

Nedenstående (Tabel 13 og Tabel 14) vises de gennemsnitlige partikelaldrer for boring A og B for alle gennemregnede scenarier. Det ses ikke uventet, at partikelalderen stiger med den dybde, som borerne indvinder fra. Dette ses f.eks. ved sammenligning af scenarie

1, 2 og 3, hvor boringerne flyttes fra lag 7 til lag 5 og videre til lag 2: alderen for boring A mindskes fra 63 år til 42 år og endelig til 27 år. Tilsvarende for boring B, hvor alderen mindskes fra 84 år til 64 år og endelig til 41 år. Tilsvarende tendens ses ved at sammenligne scenarie 5 med 5.1, hvor indvindingen ligger i lag 7 henholdsvis lag 2: alderen ændres fra 329 og 481 år (boring A og B) til 28 og 51 år.

Sammenlignes partikelaldrene for de stationære og de dynamiske kørsler, ses der en svag tendens til yngre vand (kortere transporttider) simuleret med de stationære kørsler i forhold til de dynamiske kørsler, men ellers er der ingen nævneværdig forskel på aldrene. Scenarium 4 sammenlignet med scenarium 1 viser betydningen af et lækagelag i det 4. beregningslag: den gennemsnitlige partikelalder 4-dobles ved indførelse af et lækagelag i modellen. I scenarierne 3.1 og 3.2, hvor porøsiteterne gradvis reduceres, ses der som forventet en tilsvarende reduktion af partikelaldrene. Endelig bemærkes det, at der ikke kan siges noget entydigt om aldersudviklingen under ændrede klimaforhold idet alderen for boring A falder fra 63 til 40 år ved sammenligning af scenarierne 1 og 12, mens de tilsvarende stiger for boring A fra 329 til 363 år ved sammenligning af scenarierne 5 og 13. Det skal siges, at scenarierne 1 og 12 samt 5 og 13 ikke er helt ens, idet der ud over klima forandringen også er ændret på indvindingsstrukturen således, at der i scenarie 1 og 5 indvindes fra lag 7 både fra boring A og B, mens der i scenarie 12 og 13 indvindes i lag 7 fra boring A og i lag 2 fra boring B.

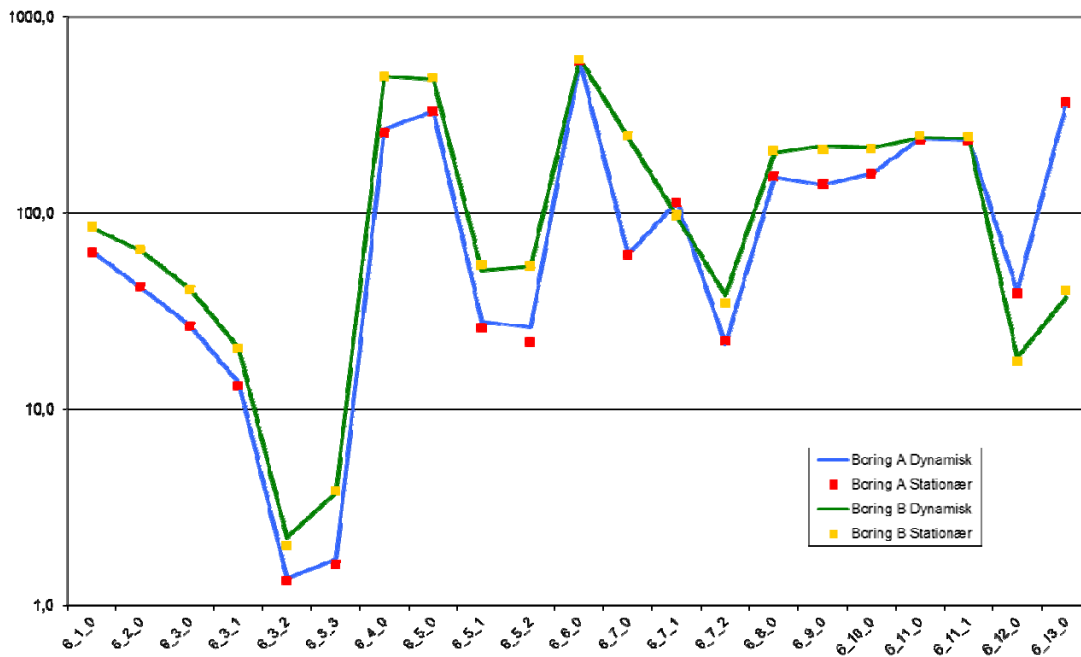
Tabel 13 Aldersstatistik for transporttider [år] til boring A

Scenarie	Dynamiske kørsler				Stationære kørsler			
	Middel alder	Std,afv,	Minimum	Maksimum	Middel alder	Std,afv,	Minimum	Maksimum
1	63,4	51,1	7,3	434,1	62,7	50,7	6,7	402,4
2	41,5	33,0	1,4	211,2	42,0	32,8	1,5	193,4
3	26,9	20,8	0,1	102,1	26,4	20,5	0,1	103,5
3,1	13,6	10,6	0,0	51,9	13,1	10,2	0,0	51,6
3,2	1,4	1,1	0,0	5,4	1,3	1,0	0,0	5,2
3,3	1,7	1,2	0,0	5,8	1,6	1,2	0,0	6,0
4	267,7	151,7	113,5	1191,0	255,6	153,4	100,1	1383,6
5	328,8	195,8	98,7	1402,0	330,0	199,0	97,5	1325,1
5,1	28,0	58,1	0,3	1088,5	26,0	46,2	0,1	498,2
5,2	26,2	48,5	0,0	787,9	21,9	39,4	0,1	629,8
6	597,5	219,1	185,9	1478,8	596,5	223,3	175,9	1479,2
7	61,5	52,7	7,1	450,4	60,9	51,4	7,2	381,5
7,1	113,9	182,2	0,4	1443,5	112,6	180,2	0,2	1302,3
7,2	21,3	42,8	0,1	1105,9	22,2	42,0	0,1	732,9
8	152,2	88,1	64,0	1462,7	152,6	84,5	63,8	1398,4
9	138,9	78,7	60,7	1410,1	140,1	85,2	60,9	1467,5
10	159,2	94,4	56,7	1347,0	157,9	94,7	56,0	1469,8
11	238,5	145,5	98,0	1462,7	235,8	138,2	98,4	1354,5
11,1	234,5	133,1	97,7	1406,6	234,1	135,5	97,8	1476,3
12	40,2	32,1	6,2	342,6	39,0	30,1	5,5	271,1
13	363,4	210,9	89,0	1323,8	365,4	214,3	82,8	1287,1

Tabel 14 Aldersstatistik for transporttider [år] til boring B

Scenarie	Dynamiske kørsler				Stationære kørsler			
	Middel alder	Std.afv,	Minimum	Maksimum	Middel alder	Std.afv,	Minimum	Maksimum
1	83,7	74,1	8,5	600,3	85,1	76,5	8,5	581,2
2	64,0	59,3	2,3	568,1	65,3	60,1	2,6	502,4
3	41,0	37,6	0,1	179,4	40,6	37,3	0,1	171,2
3,1	20,5	18,6	0,0	96,4	20,3	18,7	0,0	87,7
3,2	2,2	2,2	0,0	13,8	2,0	1,9	0,0	8,5
3,3	3,8	4,1	0,0	22,8	3,8	4,2	0,0	20,9
4	497,1	219,1	252,8	1461,1	492,8	231,9	220,3	1477,4
5	481,7	208,6	222,3	1478,4	485,2	209,3	225,1	1438,2
5,1	50,9	125,4	0,1	1322,2	54,1	137,9	0,3	1328,9
5,2	53,6	130,7	0,1	1302,7	53,6	134,0	0,2	1309,7
6	607,3	223,2	314,7	1476,8	602,5	219,2	315,8	1473,7
7	243,2	184,6	28,8	1461,2	247,0	176,3	29,8	1472,1
7,1	95,7	141,6	0,4	1126,2	96,8	147,9	0,2	1438,3
7,2	38,0	121,9	0,0	1409,8	34,7	109,6	0,1	1288,5
8	202,7	154,5	63,9	1473,9	206,6	160,7	64,5	1454,3
9	218,2	188,4	58,2	1474,9	209,8	189,0	59,2	1464,1
10	215,6	186,0	67,3	1458,5	212,4	186,2	66,8	1460,4
11	241,8	162,4	105,1	1474,1	246,6	173,2	104,8	1474,7
11,1	239,3	158,6	102,1	1445,4	242,9	166,5	104,3	1477,3
12	18,4	15,9	0,1	75,5	17,4	15,2	0,1	72,8
13	37,4	94,2	0,1	1097,8	40,3	105,1	0,1	1201,8

Ses der på forholdet mellem svingningstiden på nettonedbøren (som er ca. 1 år for alle scenarier) og den gennemsnitlige partikelalder, så er forholdet ca. 1: 20 for scenarium 3.0, hvor porøsiteten er 0.2, ca. 1:10 for scenarium 3.1 (porøsitet på 0,1) og ca. 1:1 for scenarium 3.2, hvor porøsiteten er 0,01. Ud fra Reilly og Pollock (1996) kan man forvente, at der kan observeres en forskel mellem det stationære og det dynamiske opland for scenarium 3.2 på ca. 50% større opland under dynamiske simuleringer end for stationære simuleringer, ca. 10% for scenarium 3.1 og under 10% for scenarium 3. De beregnede forskelle er på henholdsvis 6%, 3% og 2% for scenarie 3.2, 3,1 og 3, hvorfor vi ikke synes at kunne eftervise Reilly og Pollocks empiriske sammenhænge. Hvorvidt dette skyldes helt at deres empiri kun er gældende for deres specifikke system eller (mere sandsynligt) at de i vores system inducerede forskelle i vandbalancer også har en påvirkning er dog ikke umiddelbart til at afklare. Sikkert er det, at forholdet mellem gennemsnitlig transportalder og svingningstid (sæsonvariation i nedbør) for de undersøgte typiske geologiske forhold alle ligger over den af Reilly og Pollock beregnede nedre kritiske grænse på 1:1. Kigges der på forholdet mellem de stationære og dynamiske kørsler for så vidt angår transporttider, ses det af Figur 26, at der ikke er nævneværdig forskel



Figur 26 Sammenhæng mellem transporttider og model scenarier

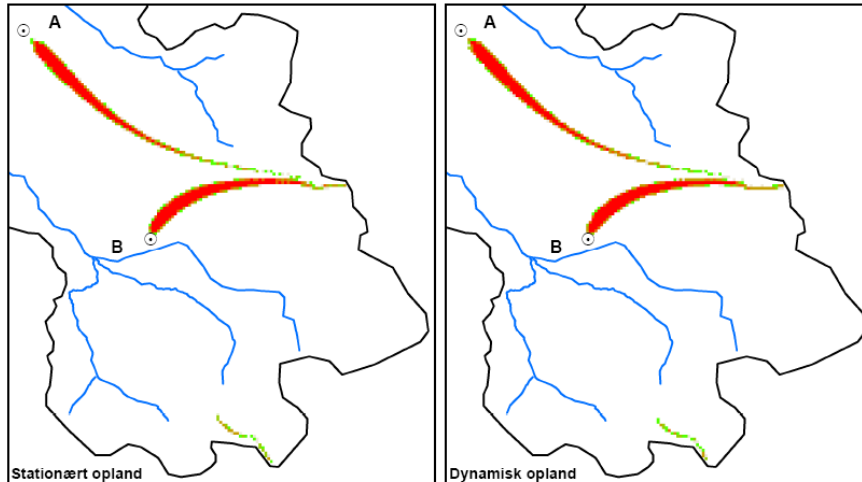
6. Diskussion

I scenarierne, hvor der blev indvundet fra det øvre lag, viste sammenligninger mellem de stationært og de dynamisk beregnede GO, at der kun er en lille areal forskel på op til 4 % mellem de beregnede oplandsarealer (scenarie 3, 5.1 og 7.2). Dette resultat synes umiddelbart at være i overensstemmelse med litteraturen, da modellerne, selv om indvindingen sker forholdsvis tæt på terræn, beregner den gennemsnitlige alder af det indvundne grundvand til sjældent mindre end 20 til 30 år, hvilket giver et forhold på mere end 20:1 i forhold til periodelængden (svingningstiden) på de her betragtede variationer i grundvandsdannelse (primært årstidsvariationer). For scenarie 3.1 og 3.2 er porøsiteten mindsket til 0,01 henholdsvis 0,02 så det beregnede forholdstal (mellem simuleret transporttid og sæsonvariation i nedsvining) reduceres til 1:1, men heller ikke i dette tilfælde kan iagttages væsentlige forskelle mellem de stationært – og dynamisk beregnede oplande. Det er under alle omstændigheder vanskeligt at opstille modeller under anvendelse af typiske danske nedbørsvariationer og realistiske geologiske modeller, hvor den gennemsnitlige transport tid til indvindingerne er kortere end eller sammenlignelig med den tidlige variation i nedsviningen. Reilly and Pollock (1996) påviser væsentlige forskelle mellem et stationært og et dynamisk beregnet opland når forholdet imellem periodelængde og gennemsnitlig alder er mindre end 1:1, mens der kun er mindre forskelle hvis forholdet er større end 10:1. Typiske gennemsnitlige transporttider for scenarierne er 100-400 år, hvilket i parentes bemærket ikke skal forveksles med grundvandsaldre dateret med f.eks. CFC, da der er betydelig aldersspredning gemt i disse scenarier.

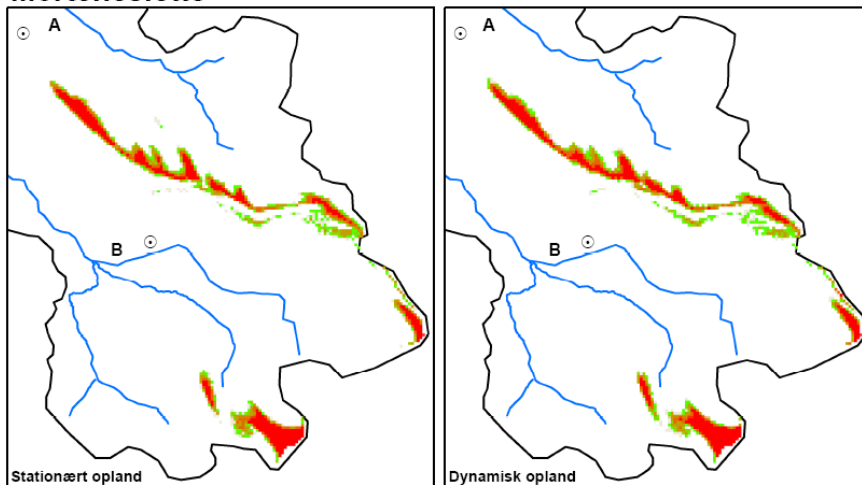
Det skal bemærkes, at de dynamiske og stationære kørsler i rapporten afviger ved at der i den stationære model er konstant nedbør (middel af 1975-2005), mens der i den dynamiske model er en døgn til døgn nedbørsvariation svarende til en faktisk nedbørssituation år 1975 – 2005. Dvs. den i rapporten anvendte metode svarer til det valg modelløren står overfor i virkelighedens verden: "skal der modelleres med en stationær model eller en dynamisk model?". Det er åbenlyst ved sammenligning af vandbalancerne, at det er ganske umuligt at skabe præcis ens vandbalancer med denne fremgangsmåde og at det vil påvirke beregningen af grundvandsdannende oplande.

For de gennemregnede scenarier ses der størst forskel mellem de stationært og de dynamisk beregnede GO for Morænelandskabmodellen, selvom ovennævnte forholdstal er 30:1 eller højere. En forklaring kunne være at den større, heterogenitet (og dermed også i dette tilfælde større effektive anisotropi) var den direkte årsag hertil, men dette synes ikke at kunne forventes ud fra litteraturen. Tværtimod tilskrives øget anisotropi en dæmpende effekt (f.eks. Zijl, 1998 – afsnit med litteratur gennemgang). Der blev udført et scenarie for Hedeslettemodellen, hvor anisotropien ($K_v:K_h$) blev ændret fra 1:10 til 1:100 i alle beregningslag, som bestod af homogene sandlag. Det viste, at anisotropien har betydning for beliggenheden af de GO til boring A og B, mens det ikke ændrede på størrelsen af forskellen mellem et stationært og et dynamisk beregnet opland.

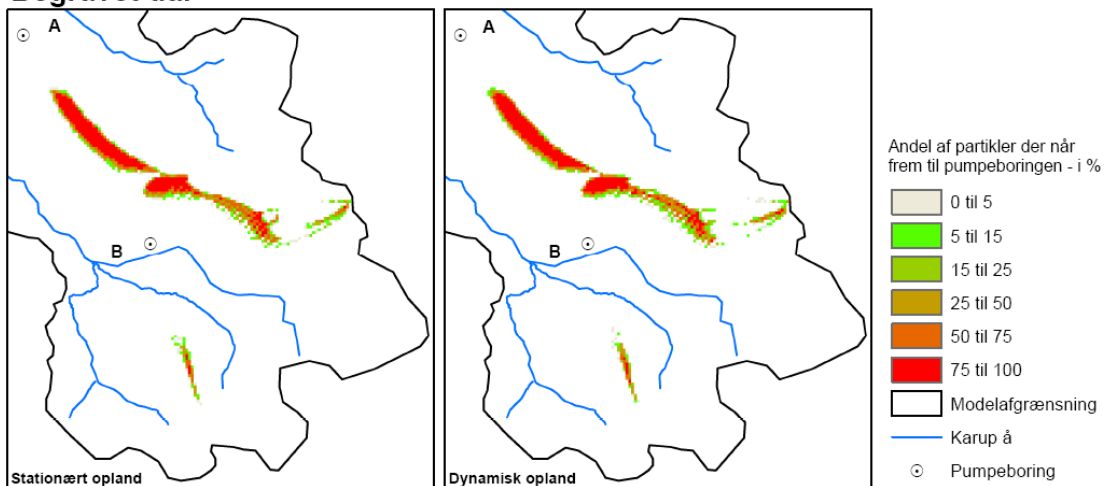
Hedeslette



Moræneslette



Begravet dal



Figur 27 GO med indvinding i lag 7 for Hedeslette, Morænelandskab og Begravet dal.

Tilsvarende er der vist meget store forskelle mellem grundvandsdannende oplande på tværs af de forskellige geologityper (Figur 27): der ses en tydelig forskel i såvel form som udbredelse. Specielt scenarierne med vandstandsede lag og begravede dale synes at påvirke oplandene. I Hedeslattermodellerne er oplandene pænt sammenhængende, mens

oplandene for Morænelandsskab- og de begravede dal-modeller synes opsplittede og mere komplekse i form. Det er i denne rapport ikke undersøgt hvordan kalibrering af modellerne i forhold til trykniveau-observationer vil kunne ujevne de store forskelle i beregnede oplande på tværs af geologi, men oplands forskellene må forventes at være væsentligt mindre i det omfang modelopsætningerne skal tunes (kalibreres) til målinger af trykniveau (jo' flere trykniveau målinger des mindre effekt af forskelle i modelopsætninger).

For to scenarier blev det undersøgt, hvilken betydning et fremtidigt klima har for formen og udbredelsen af det grundvandsdannende opland (GO). En sammenligning mellem GO beregnet ud fra en normal nedbørssituation og GO beregnet for klimascenariet viste, at størrelsen af GO reduceres under klimascenariet i forhold til den nuværende situation. Dette forklares ved, at grundvandsdannelsen forøges under klimascenariet (25-50% mere ned-sivning om vinteren), hvorved det grundvandsdannende opland ikke behøver at være så stort som under NU scenariet for at balancen med indvundet vand kan gå op. Det var mere overraskende, at oplandene især for Hedeslettemodellen skiftede beliggenhed fra ØNØ retning til NØ retning. Den forøgede amplitude (forskellen mellem vinter- og sommerned-sivning) i klimascenariet havde en beskeden effekt på forskellene mellem stationært og dynamisk beregnede oplande.

Det er med scenarierne ikke forsøgt at regne på om længerevarende ændringer i netto-nedbør eller indvinding kan ændre såvel beliggenhed som størrelse af oplandet til en indvinding, ligesom aldersfordelingen af indvundet vand påvirkes. Litteraturstudiet viste klart at der altid bør tages stilling til om markante tidlige ændringer kan eller er sket indenfor modelområdet. I givet fald bør oplandene beregnes med dynamiske simuleringer (hvor variationerne skal medtages i modelleringen), idet udviklingen af oplande sker væsentligt langsommere end udviklingen i potentiale. Typiske eksempler på markante ændringer kunne være placering af ny kildepladser eller omlægning af gamle kildepladser, som vil påvirke oplandene for nærliggende borer og kildepladser. Hvor det kan tage år fuldt at udvikle området der påvirkes trykmæssigt som følge af indvindingen, så er det i litteraturen vist at det kan tage årtier fuldt at udvikle det grundvandsdannede opland. Dette er specielt interessant ift. simulering af forureningsudvikling og ved sammenligning med grundvandsdatering, omvendt er det af mindre betydning hvis det udelukkende er det fuldt udviklede opland man er interesseret i at beregne.

7. Konklusioner

Hovedformålet med denne undersøgelse har været, at belyse om der under nogle danske forhold kan være signifikant forskel mellem et grundvandsdannende opland (GO) beregnet på grundlag af stationær grundvandsmodellering og et opland beregnet på grundlag af dynamisk grundvandsmodellering. I undersøgelsen har der udelukkende været fokus på betydningen af at inddrage tidlige variationer i nettonedbør i oplandsberegningen. Det er i den forbindelse vigtigt at fastslå, at det potentielt kan være ligeså vigtigt at inddrage andre tidlige variationer i f.eks. indvinding eller andre randbetingelser i en oplandsberegning, men det er ikke undersøgt her.

I undersøgelsen er der opstillet Mike-SHE modeller til beregning af GO for tre typiske danske landskabs- og geologityper: en Hedeslette, et Morænelandskab, og et landskab med en begravet dal. Oplandsberegningen er foretaget ved brug af Mike-SHE's partikelbanemodul. I hvert gennemregnet scenarie er oplandsberegningen sket på to måder: på grundlag af en stationært beregnet trykniveaufordeling (beregnet ved anvendelse af gennemsnitlig nettonedbør for en 20 års periode); og på grundlag af en dynamisk beregnet 20 års trykniveau-tidsserie (beregnet ved brug af 20 års daglig nettonedbør). For hver af de tre modeller er der gennemregnet en række scenarier, hvor der bl.a. er varieret på antallet af lækagelag, dybden hvorfra der indvindes, og på den effektive porøsitet af de geologiske lag.

For alle 3 type geologier er det fundet, at der ikke er stor forskel på, om de GO er beregnet på grundlag af en stationær eller en dynamisk grundvandsmodel. Areal afvigelse udgør typisk 10% eller mindre men er i et enkelt tilfælde så stor som ca. 20%. De største afvigelser er fundet for modeller, hvor indvindingen sker dybt fra et grundvandsmagasin med højere liggende lækagelag. Der er tilsyneladende en vis sammenhæng mellem kompleks geologi og forskellen mellem stationært og dynamisk beregnede oplande. Det skyldes formentlig, at der for komplekse geologiske forhold er en forøget tidlig og stedlig variabilitet i vandbalance- og strømningsforhold.

Undersøgelsens resultater viser således, at årstidsvariationer i nettonedbøren kun har ringe betydning for beliggenheden af de beregnede oplande. I litteraturstudiet fandtes, at forskel mellem de to typer beregnede oplande primært vil forekomme for borer, hvor den gennemsnitlige alder for det oppumpede grundvand er af samme størrelse som, eller yngre end, svingningstiden (periodelængden) for nettonedbørsvariationerne (Reilly og Pollock, 1996). For de her gennemregnede modeller er den gennemsnitlige alder af det indvundne grundvand typisk fra 10 til 250 år, mens svingningstiden for nettonedbørsvariationerne er omkring 1 år (svarende til årstidsvariationer). Dvs., i alle scenarier (undtagen dem hvor den effektive porøsitet for hele lagserien er sat lavt til 1-5 %) er den gennemsnitlige alder for det oppumpede vand en til to størrelsesordner større end svingningstiden.

Konklusionen på denne undersøgelse er derfor, at det under danske forhold i mange tilfælde vil være af underordnet betydning isoleret set for beregning af grundvandsdannende oplande, at der tages højde for årstidsvariationer i nettonedbøren. Det kan derimod være væsentligt at tage højde for mere langvarige fluktuationer eller ændringer i nettonedbør, indvinding eller andre randbetingelser. Hvor "langvarig" kan bedømmes på grundlag af den beregnede gennemsnitsalder af det fra en boring oppumpede grundvand.

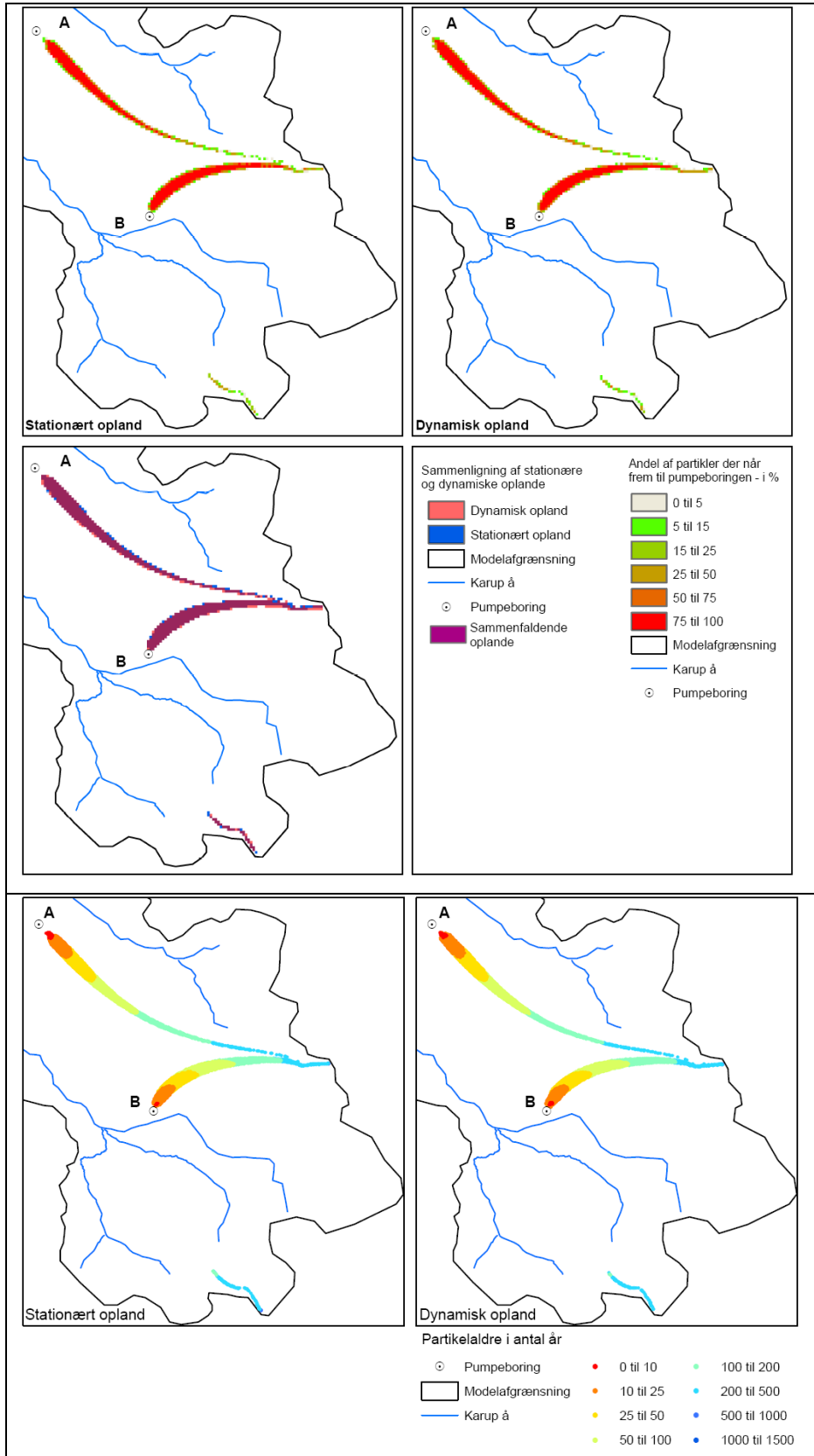
Det skal fremhæves, at selv om det kan være forsvarligt at beregne et grundvandsdannende opland til en boring eller en kildeplads ved stationær modelberegning, kan det være yderst hensigtsmæssigt, at den benyttede model er kalibreret dynamisk. Det skyldes, at dynamisk kalibrering kan forventes at lede frem til en bedre kalibreret og mere velunderbygget model, samt at en dynamisk beskrivelse vil give en mere retvisende vandbalance specielt i den øvre del af grundvandssystemet.

8. Referencer

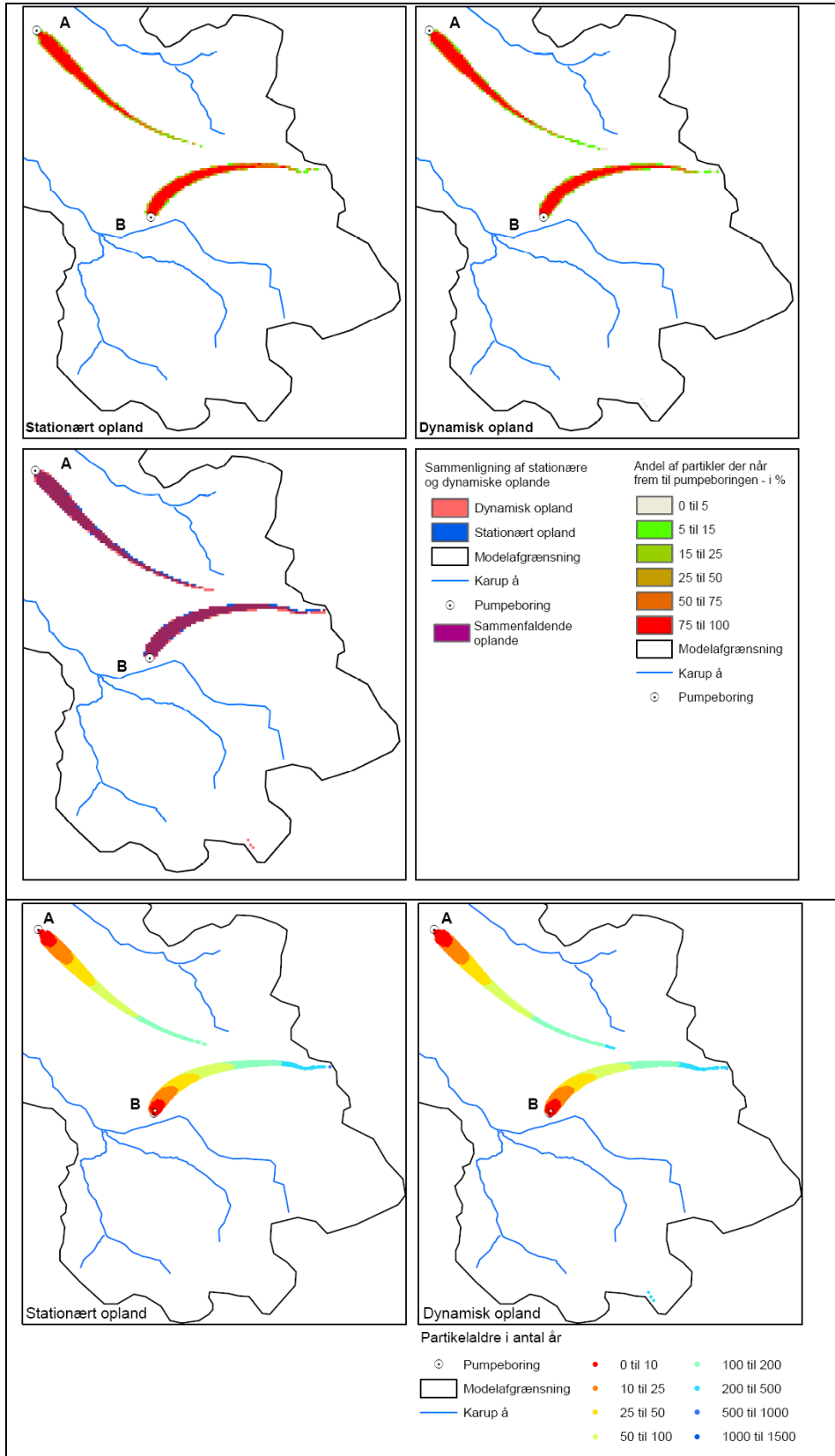
- Barry, F., Ophori, D., Hoffman, J., og Canace, R., 2009. Groundwater flow and capture zone analysis of the Central Passaic River Basin, New Jersey. *Environmental Geology*, 56 (8): 1593-1603.
- Festger, A.D. and Walter, G.R., 2002. The capture efficiency map: The capture zone under time-varying flow. *Ground Water*, 40 (6): 619-628.
- Forster, C.B., Lachmar, T.E., and Oliver, D.S., 1997. Comparison of models for delineating well-head protection areas in confined to semiconfined aquifers in alluvial basins. *Ground Water*, 35 (4): 689-697.
- Iversen C.H., Lauritsen, L.U., Nyholm T. og Kürstein, J., 2008. Geovejledning 2. Udpegning af indvindings- og grundvandsdannende oplande, GEUS.
- Lu, N., 1994. A Semianalytical Method of Path Line Computation for Transient Finite-Difference Groundwater-Flow Models. *Water Resources Research*, 30 (8): 2449-2459.
- Masterson, J.P., Walter, D.A., and LeBlanc, D.R., 2004. Transient analysis of the source of water to wells: Cape Cod, Massachusetts. *Ground Water*, 42 (1): 126-134.
- Pollock, D.W., 1988. Semianalytical computation of path lines for finite-difference models. *Ground Water*, 26 (6): 743-750.
- Rayne, T.W., Bradbury, K.R., and Muldoon, M.A., 2001. Delineation of capture zones for municipal wells in fractured dolomite, Sturgeon Bay, Wisconsin, USA. *Hydrogeology Journal*, 9 (5): 432-450.
1995. Effect of seasonal and long-term changes in stress on sources of water to wells. U. S. Geological Survey Water-Supply Paper, U. S. Geological Survey. Reston, VA, United States, Reston, VA, United States, -25 pp.
- Reilly, T.E. and Pollock, D.W., 1996. Sources of water to wells for transient cyclic systems. *Ground Water*, 34 (6): 979-988.
- Rock, G. and Kupfersberger, H., 2002. Numerical delineation of transient capture zones. *Journal Of Hydrology*, 269 (3-4): 134-149.
- Sonnenborg T. 2006, GEUS
- Stolwijk, N.H.M., Zijl, W., and Boekelman, R., 1996. The penetration depth in modelling natural groundwater flow. *Journal Of Hydrology*, 185 (1-4): 171-182.
- Toth, J., 1999. Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal*, 7 (1): 1-14.
- Troldborg, L., Jensen, K.H., Engesgaard, P., Refsgaard, J.C., and Hinsby, K., 2008, GEUS. Using Environmental Tracers in Modeling Flow in a Complex Shallow Aquifer System. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13 (11): 1037-1048.
- Zijl, W., 1999. Scale aspects of groundwater flow and transport systems. *Hydrogeology Journal*, 7 (1): 139-150.

BILAG 1 Figurer af model scenarie beregninger af grundvandsdannede oplande og aldersfordeling til boring A og B

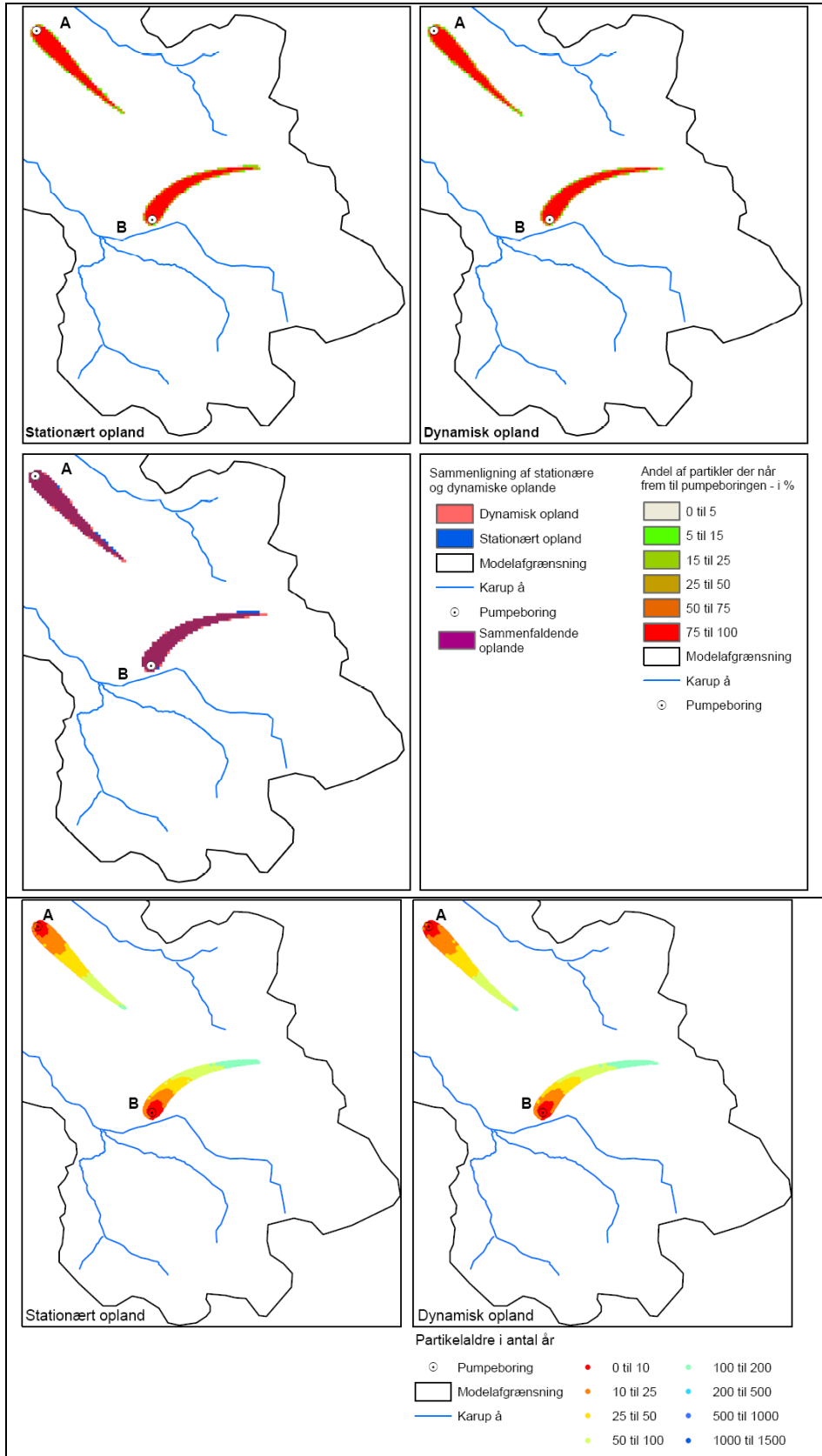
Scenarium 1, Hedeslettemodel homogen hydrostratigrafi, filter lag 7



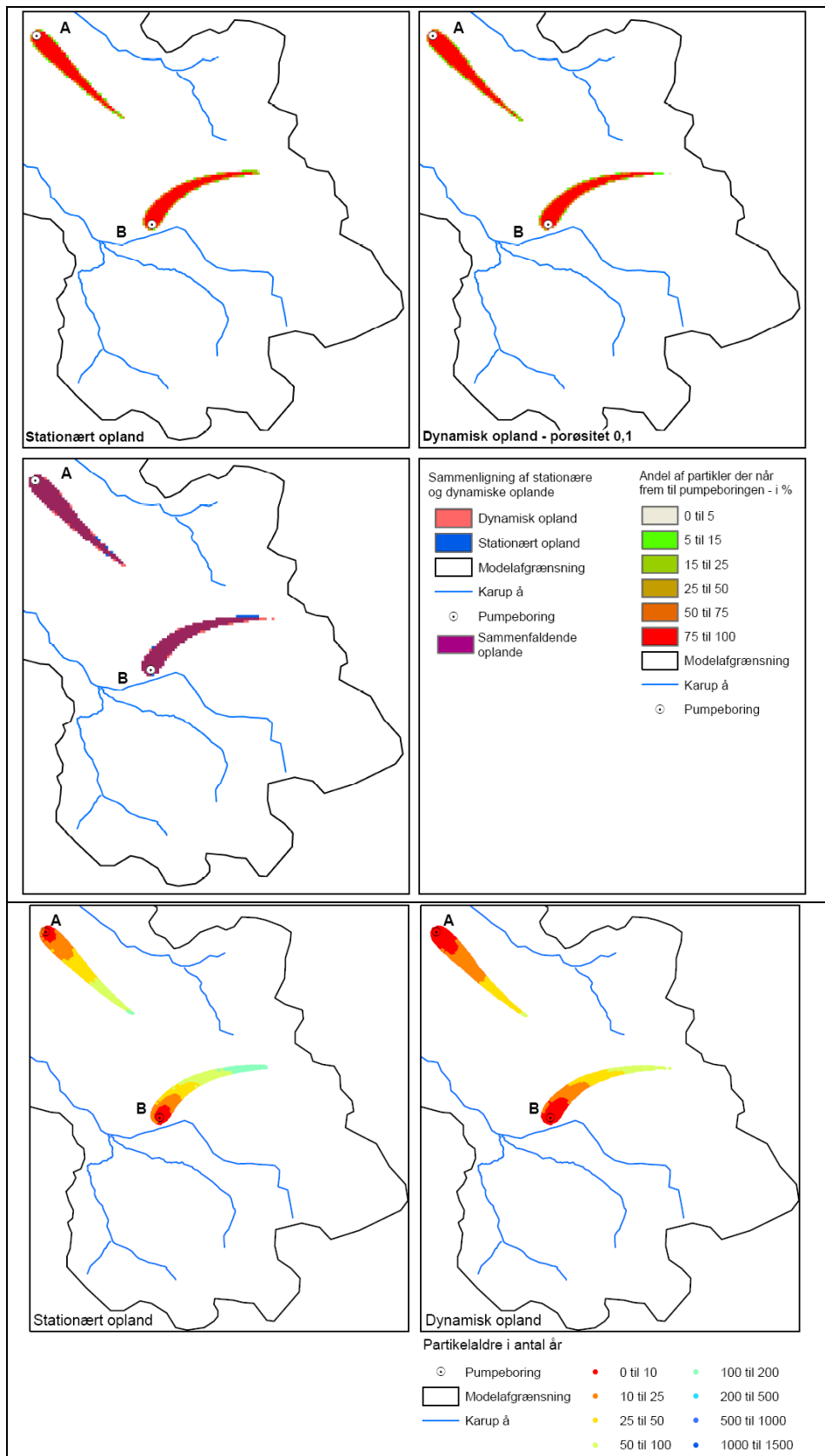
Scenarium 2, Hedeslettemodel homogen hydrostratigrafi, filter i lag 5.



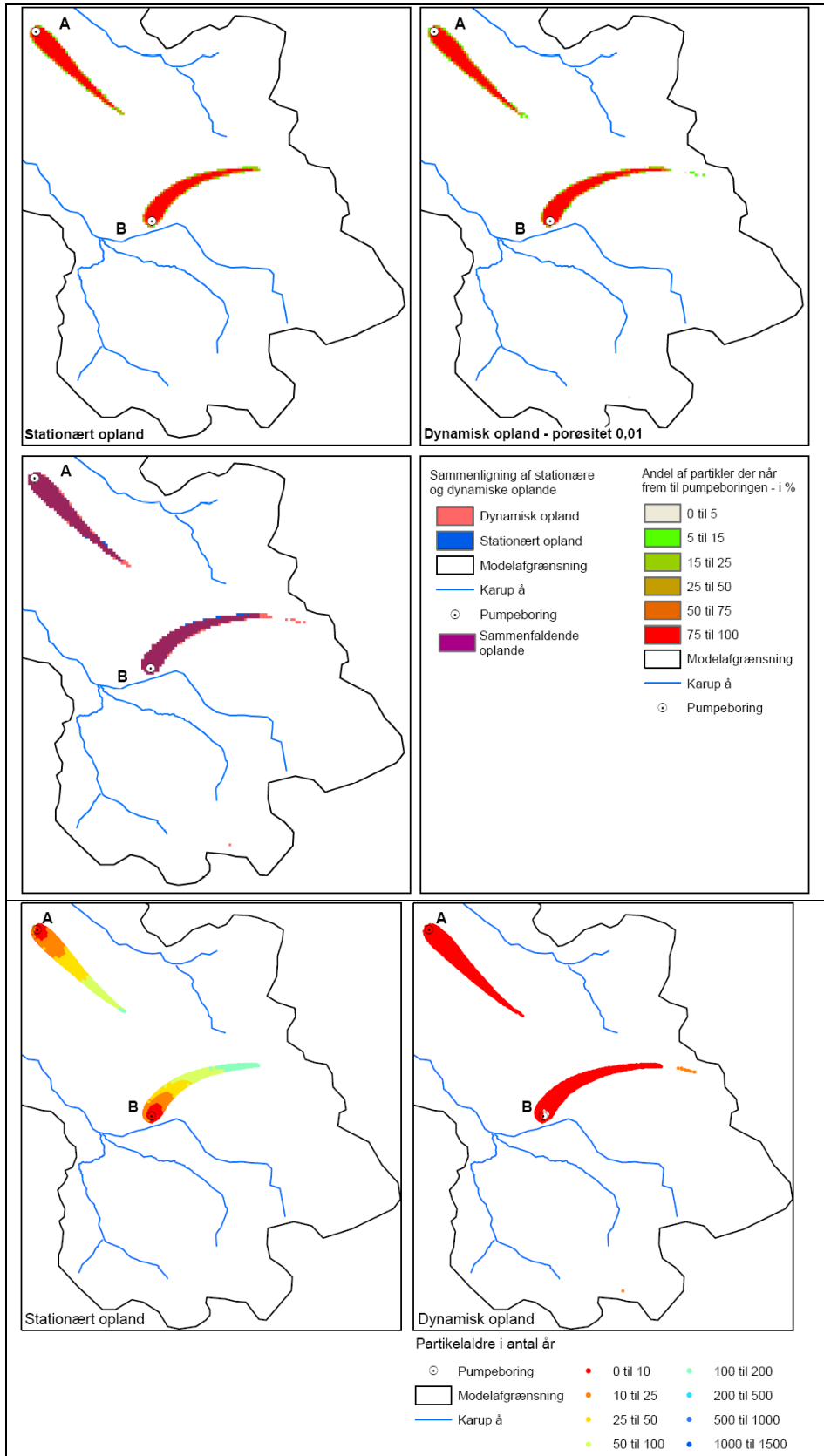
Scenarium 3, Hedeslettemodel homogen hydrostratigrafi, filter i lag 2



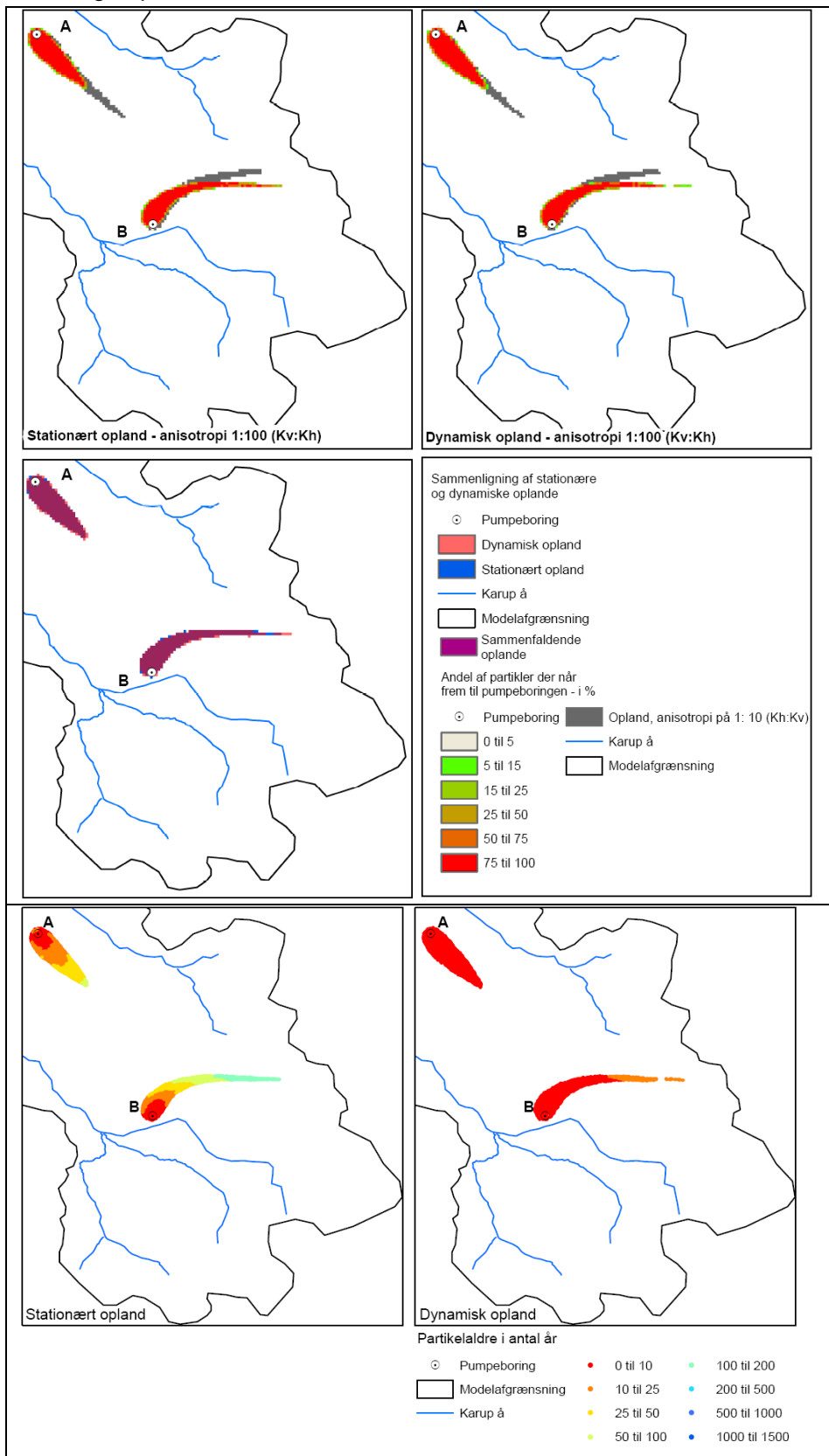
Scenarium 3,1 Hedeslette, homogen hydrostrategafi, K ens i alle lag, Filter i lag 2, porøsitet = 0.1



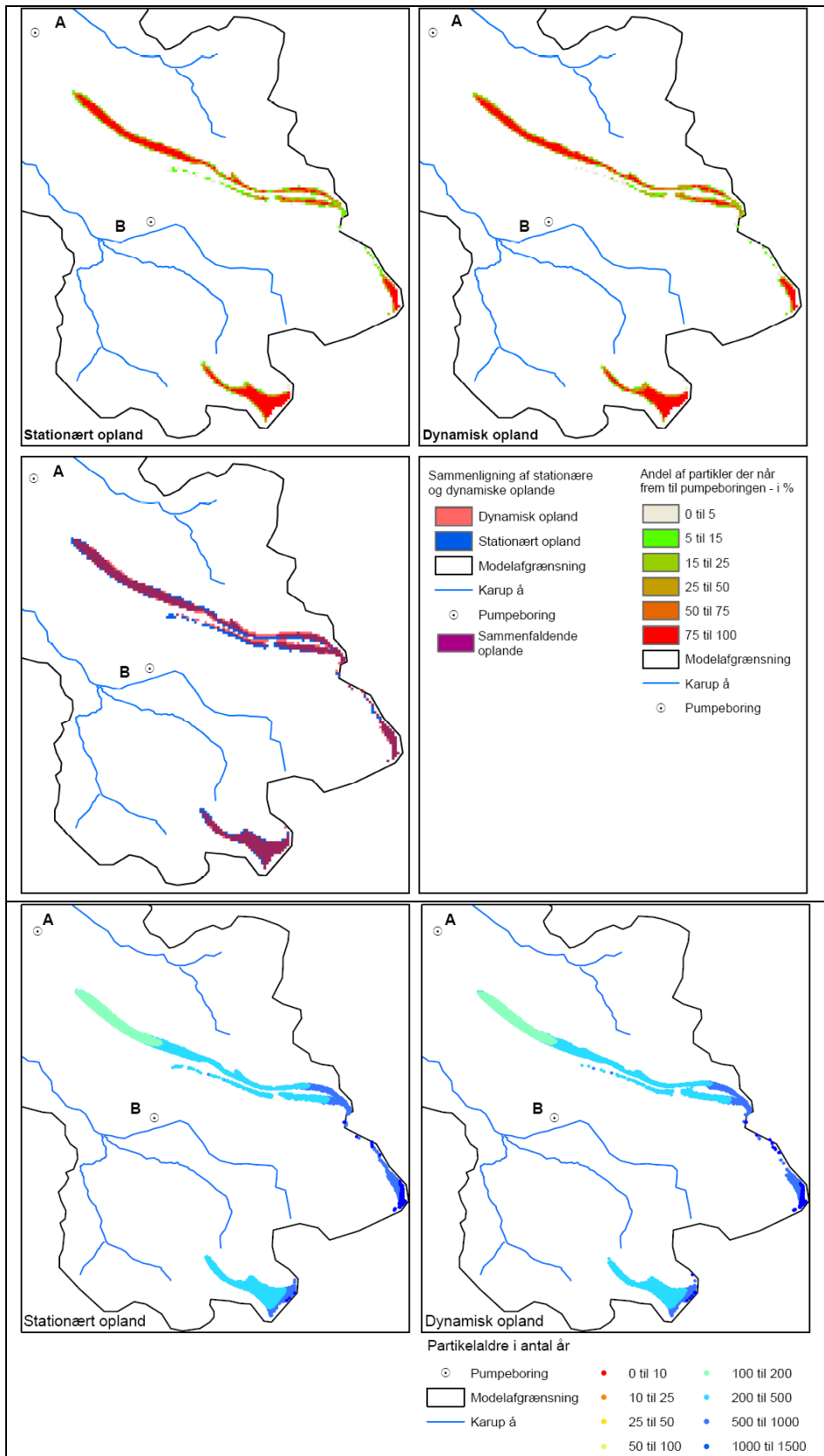
Scenarium 3.2 Hedeslette, homogen hydrostrategi, K ens i alle lag, Filter i lag 2, porøsitet = 0.01



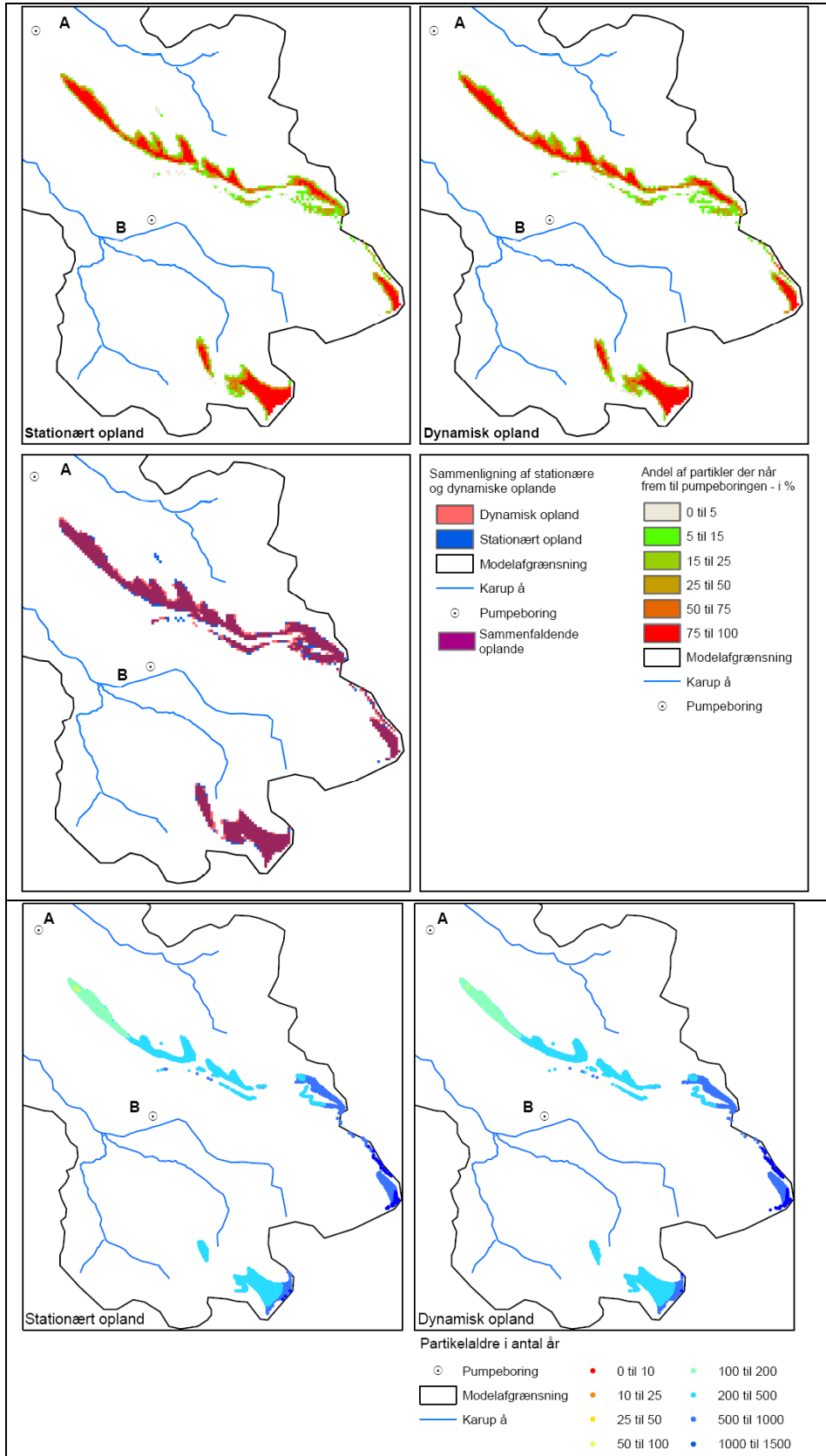
Scenarium 3,3 Hedeslette, homogen hydrostrategi, K anisotropi fakt 1:100 (Kv:Kh) , Filter i lag 2, porøsitet = 0.02



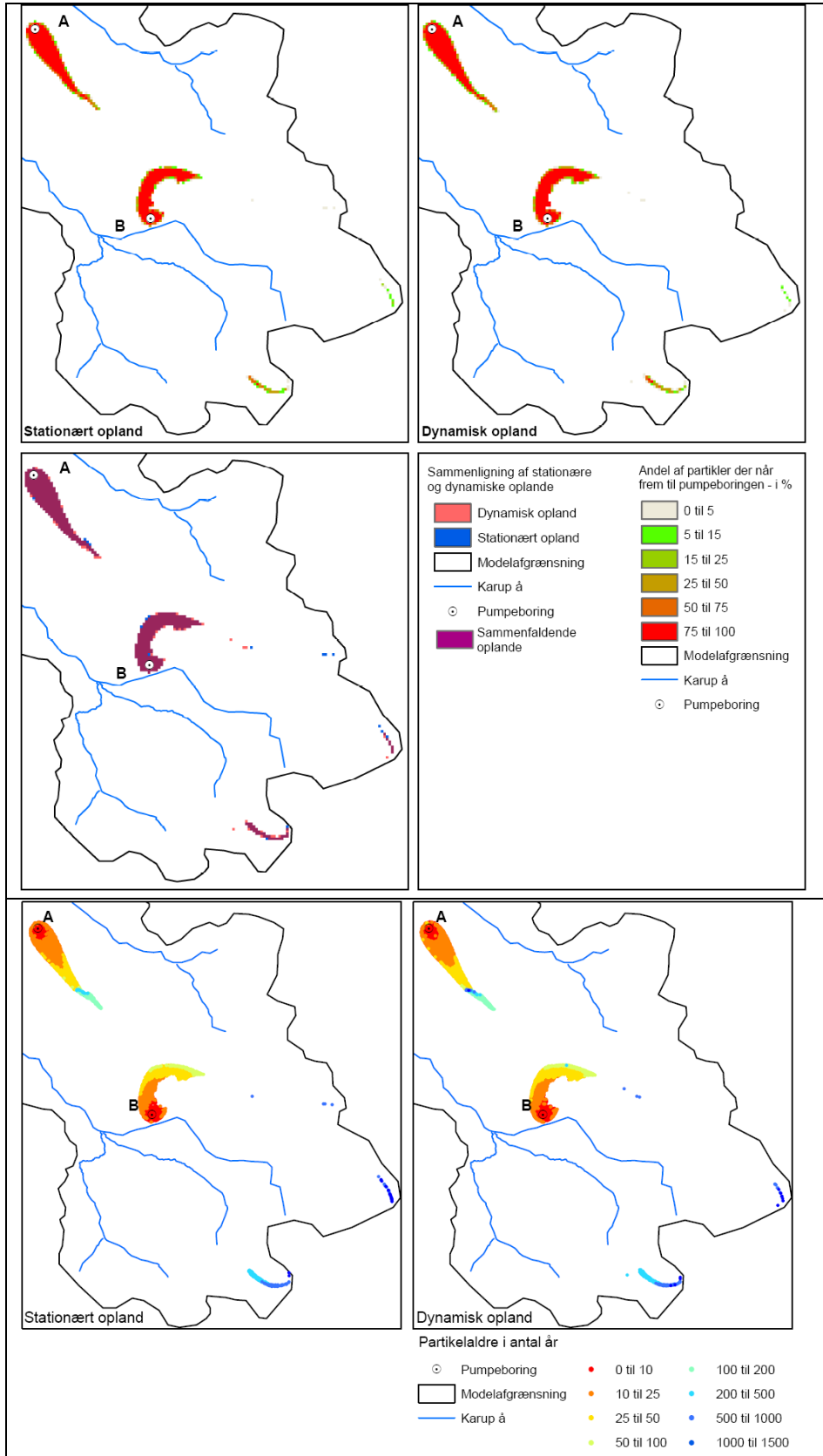
Scenarium 4 Hedeslette med lækagelag, lag 4 er som lækagelag, Filter placeret i lag 7



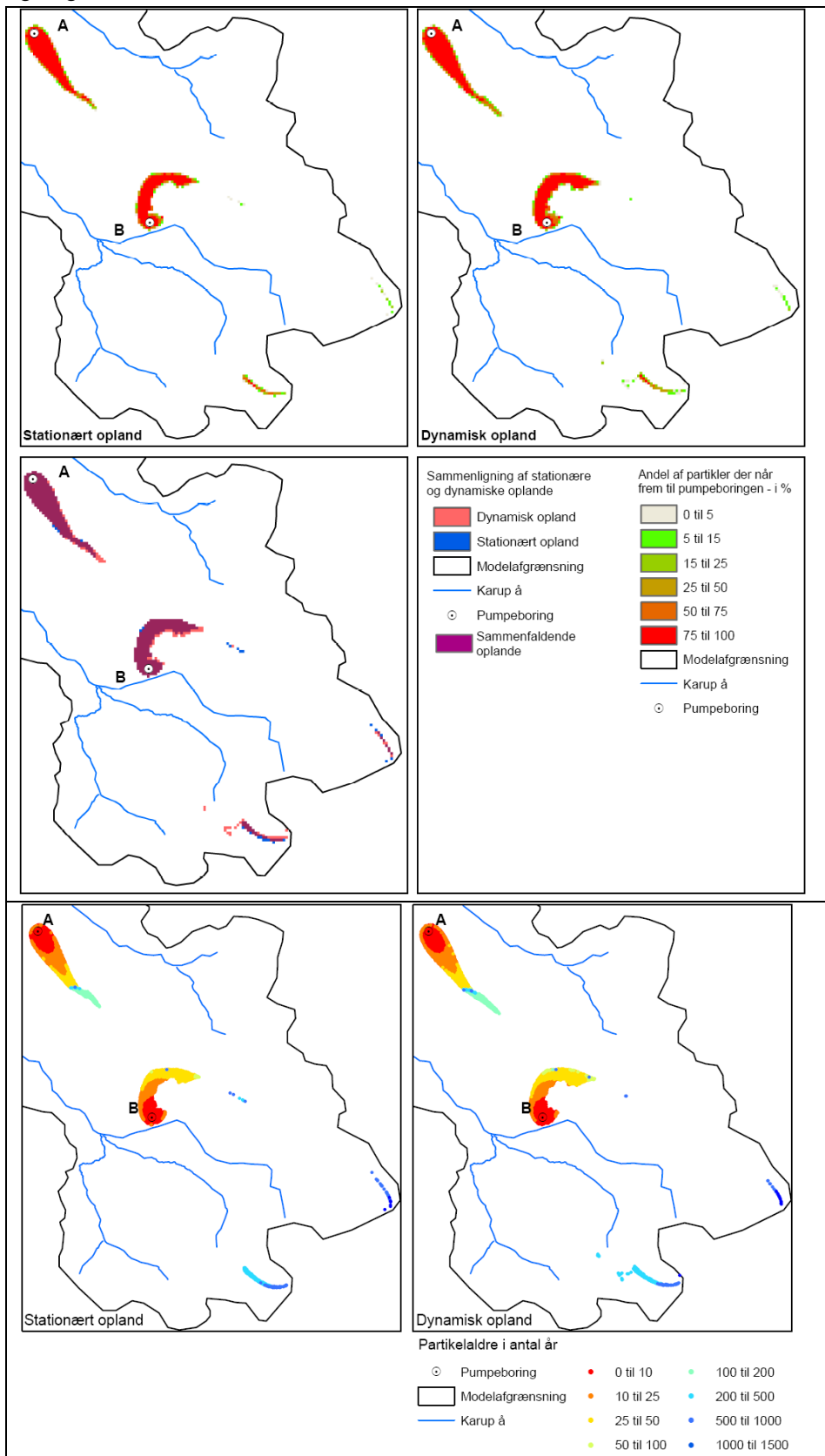
Scenarium 5 Morænelandskab, lag 1+ 4 lækagelag, filter placeret i lag 7



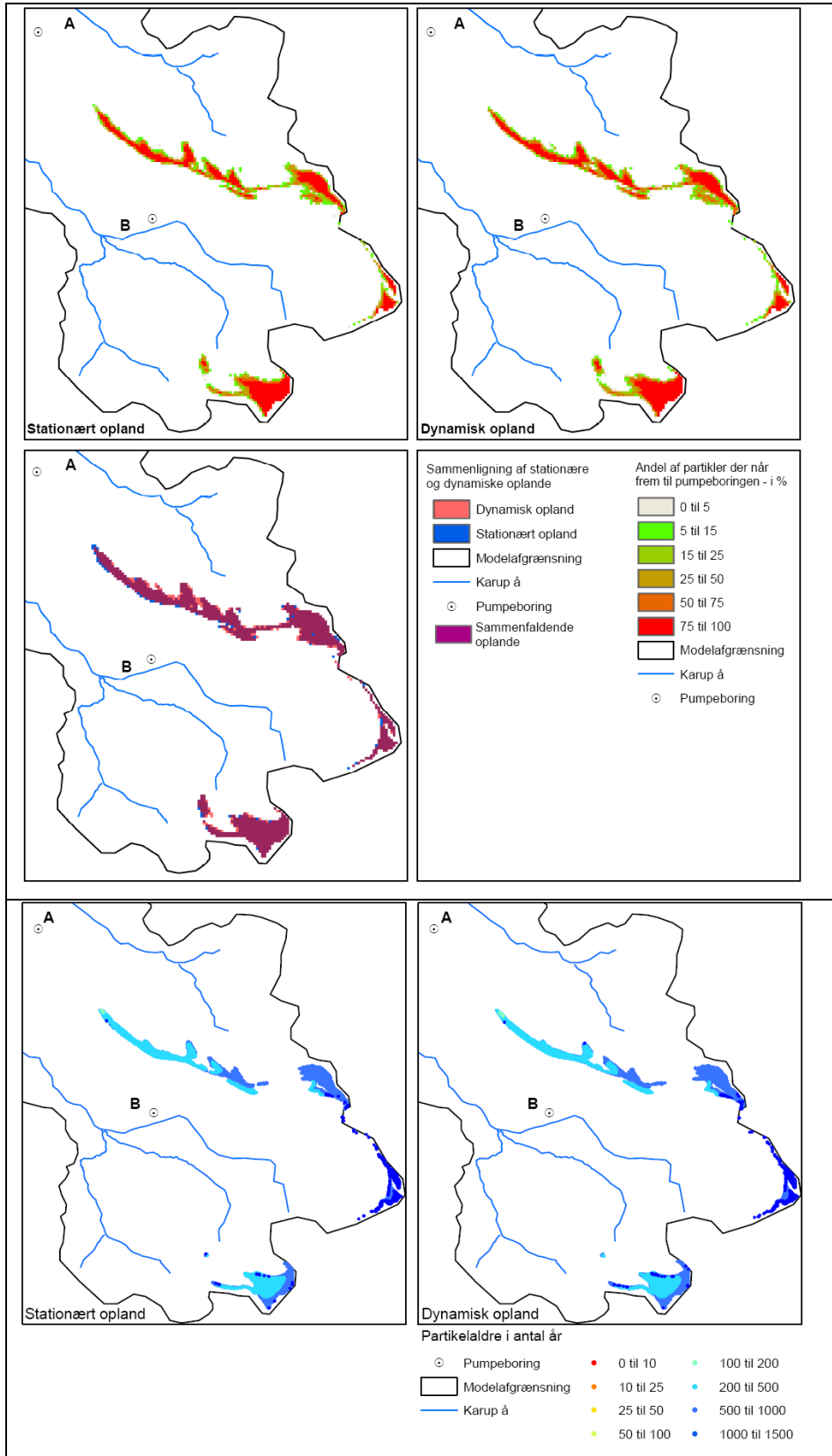
Scenarium 5.1 Morænelandskab, lag 1+ 4 lækagelag, filter placeret i lag 2



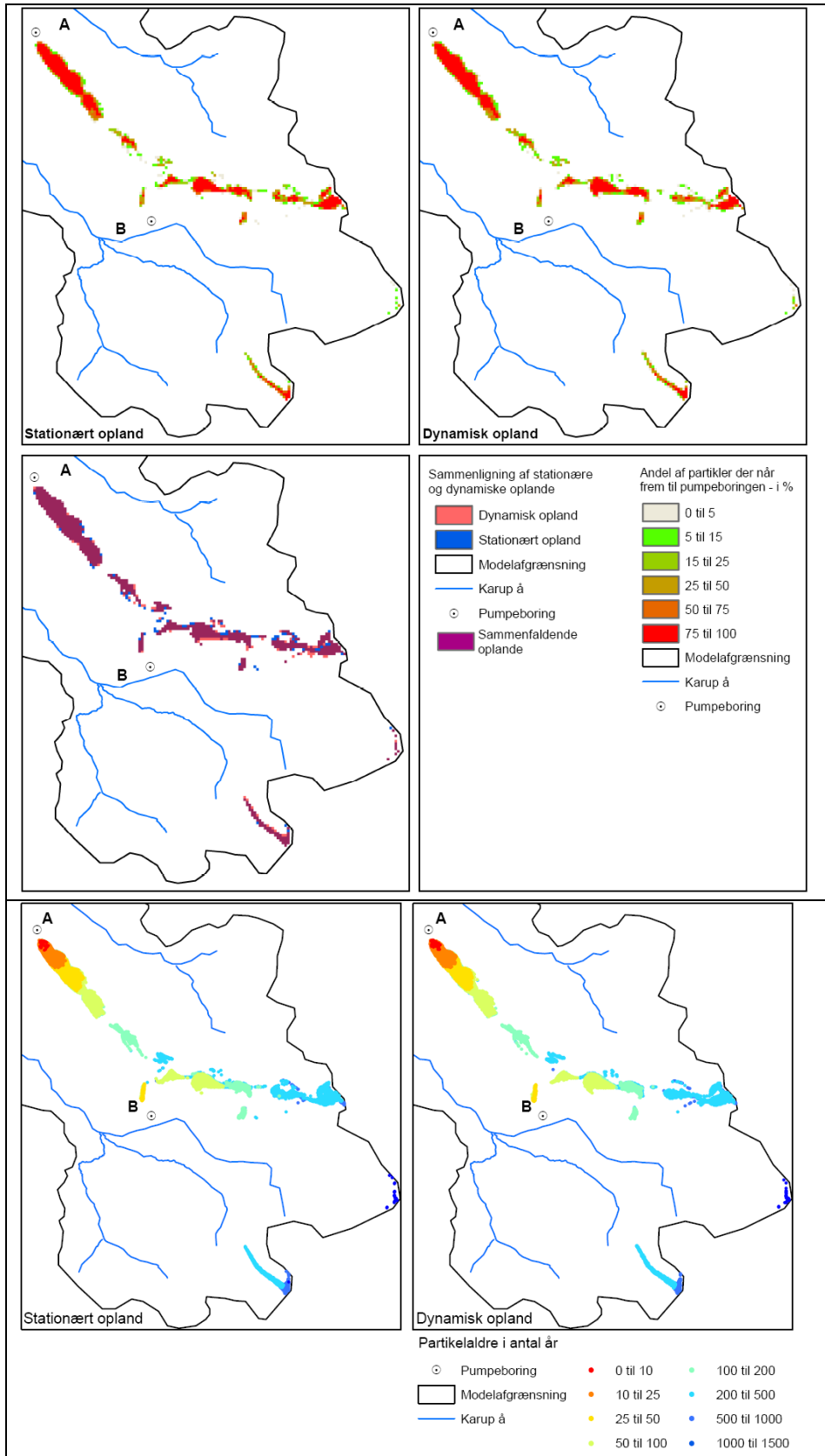
Scenarium 5.2 Morænelandskab, lag 1+ 4 lækagelag, filter placeret i lag 2, porøsitet læka-
gelag = 0.05



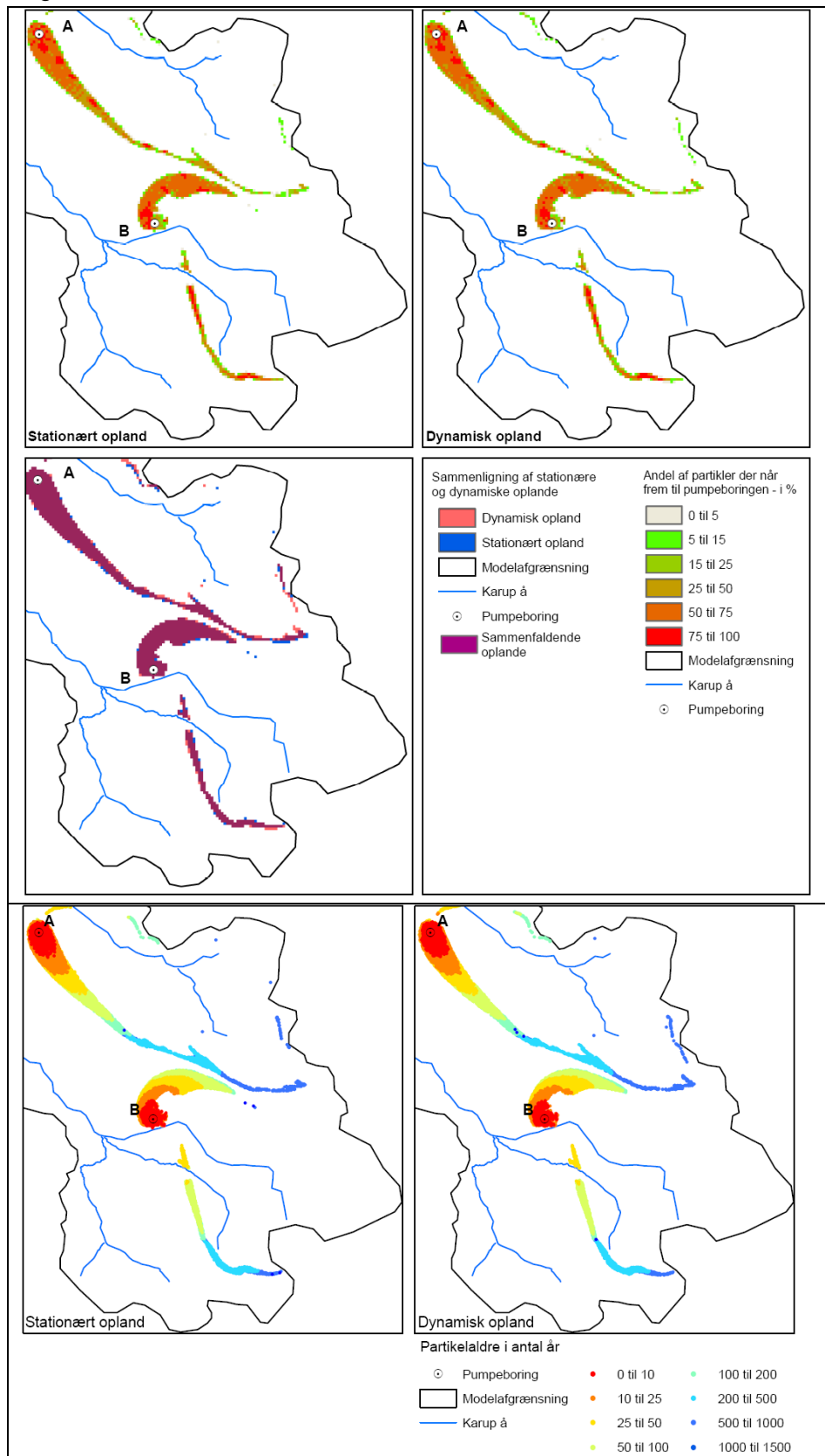
Scenarium 6 Morænelandskab, lag 1+ 4 +6 lækagelag, filter placeret i lag 7



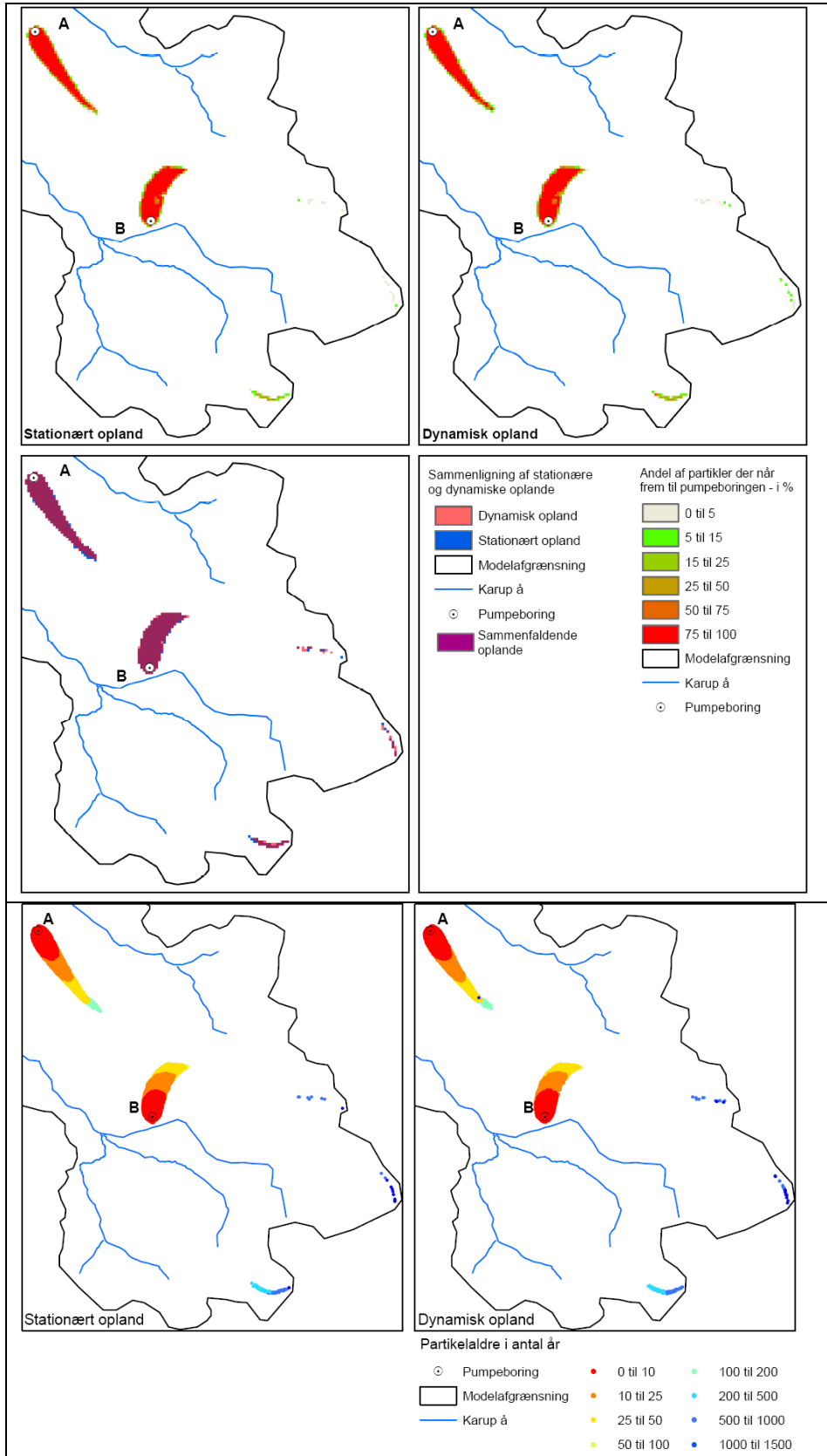
Scenarium 7 Morænelandskab, lag 1 lækagelag, geologiske sandvinduer i lag 3, filter i lag 7



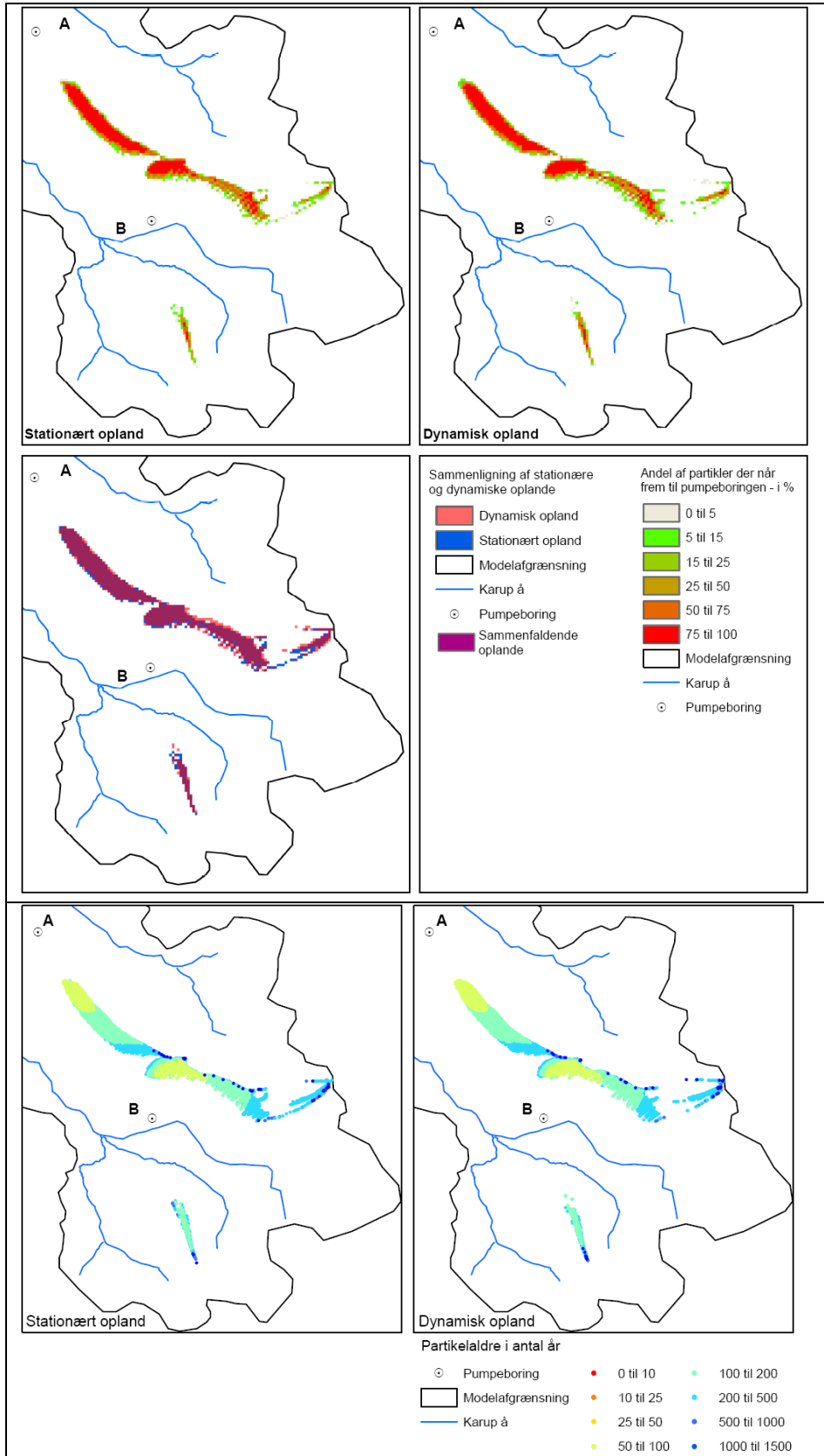
Scenarium 7.1 Morænelandskab, geologiske sandvinduer i lag 1 + lag 4 lækagelag, filter i lag 2



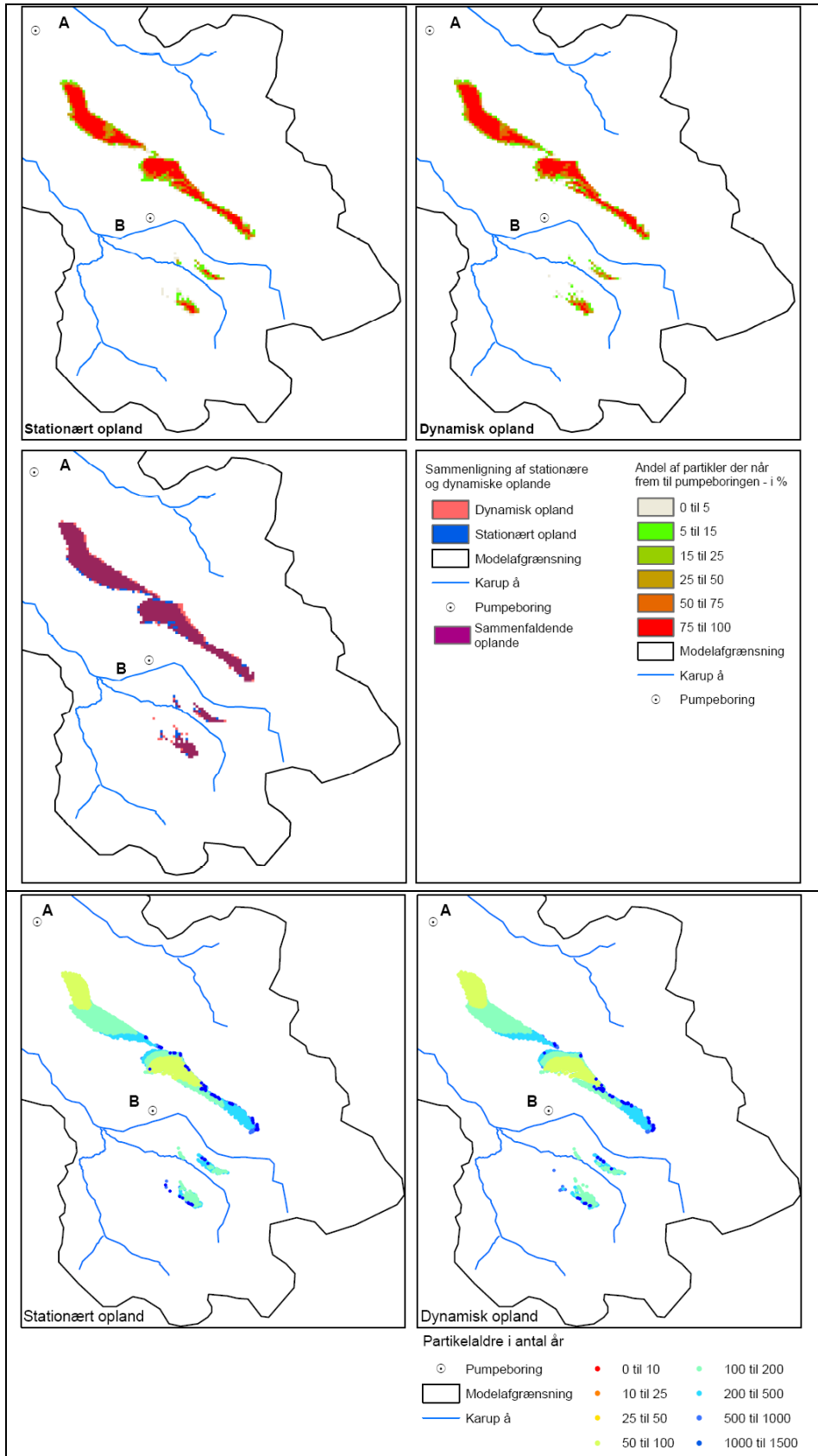
Scenarium 7.2 Morænelandskab, lerlinser i lag 1, lag 4 lækagelag, filter i lag 2



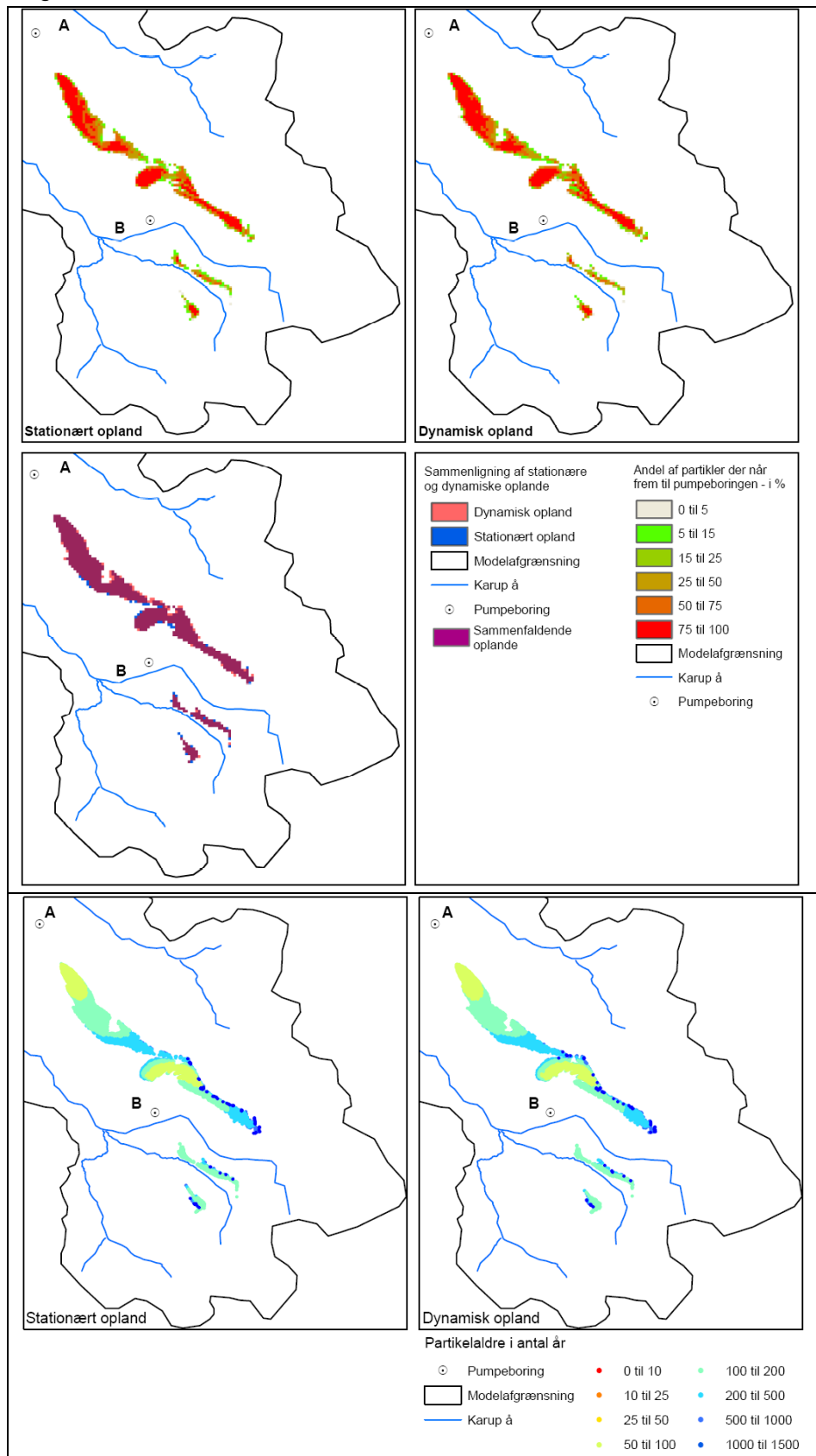
Scenarium 8 Den begravede dal, lag 4 er lækagelag, Filter placeret i lag 7



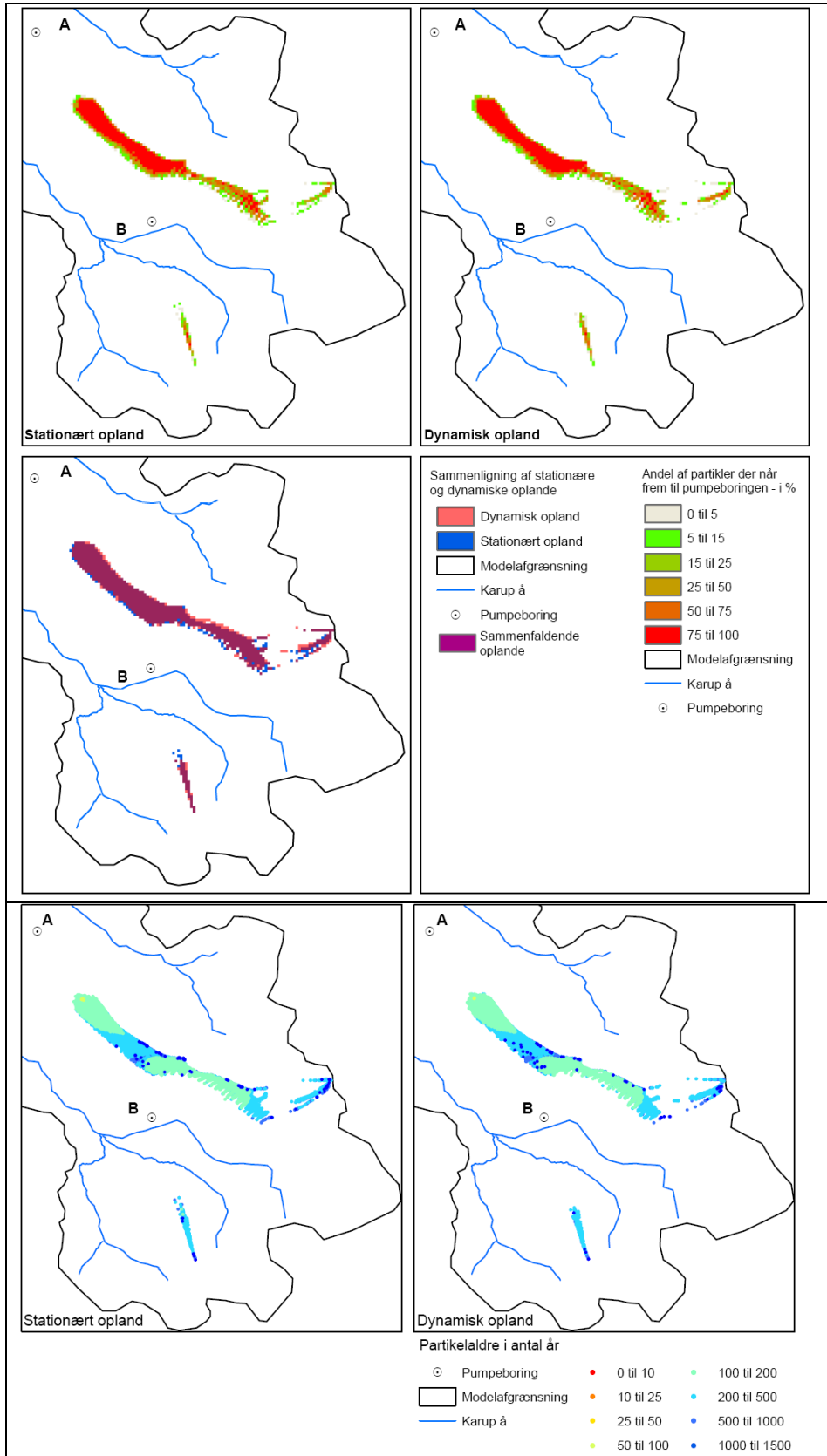
Scenarium 9 Den begravede dal, Ierlinser/bakkøer i lag 1+2, lag 4 er lækagelag, Filter placeret i lag 7



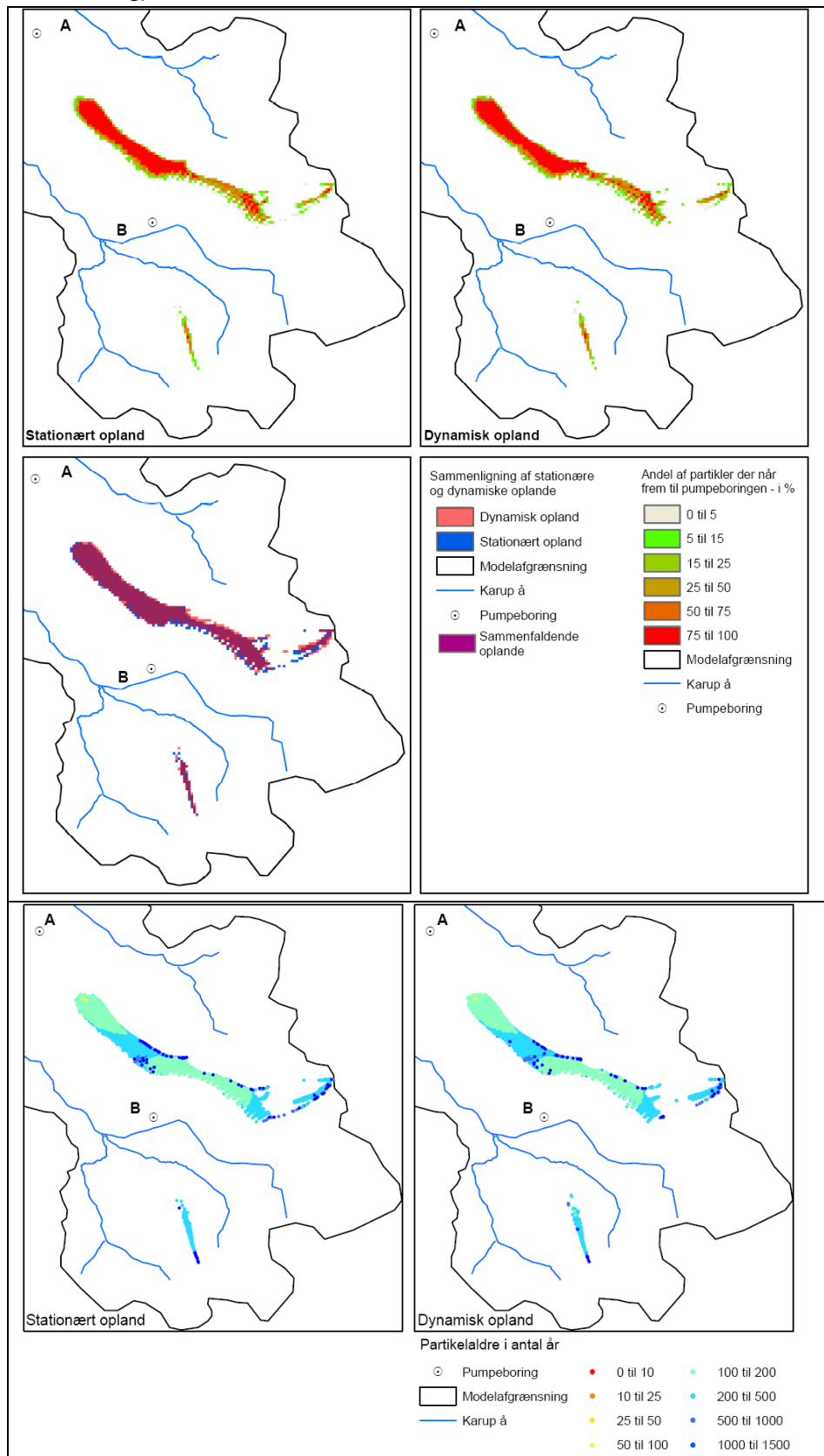
Scenarium 10 Den begravede dal, vinduer i lag 2, lag 1 + 4 er lækagelag, Filter placeret i lag 7



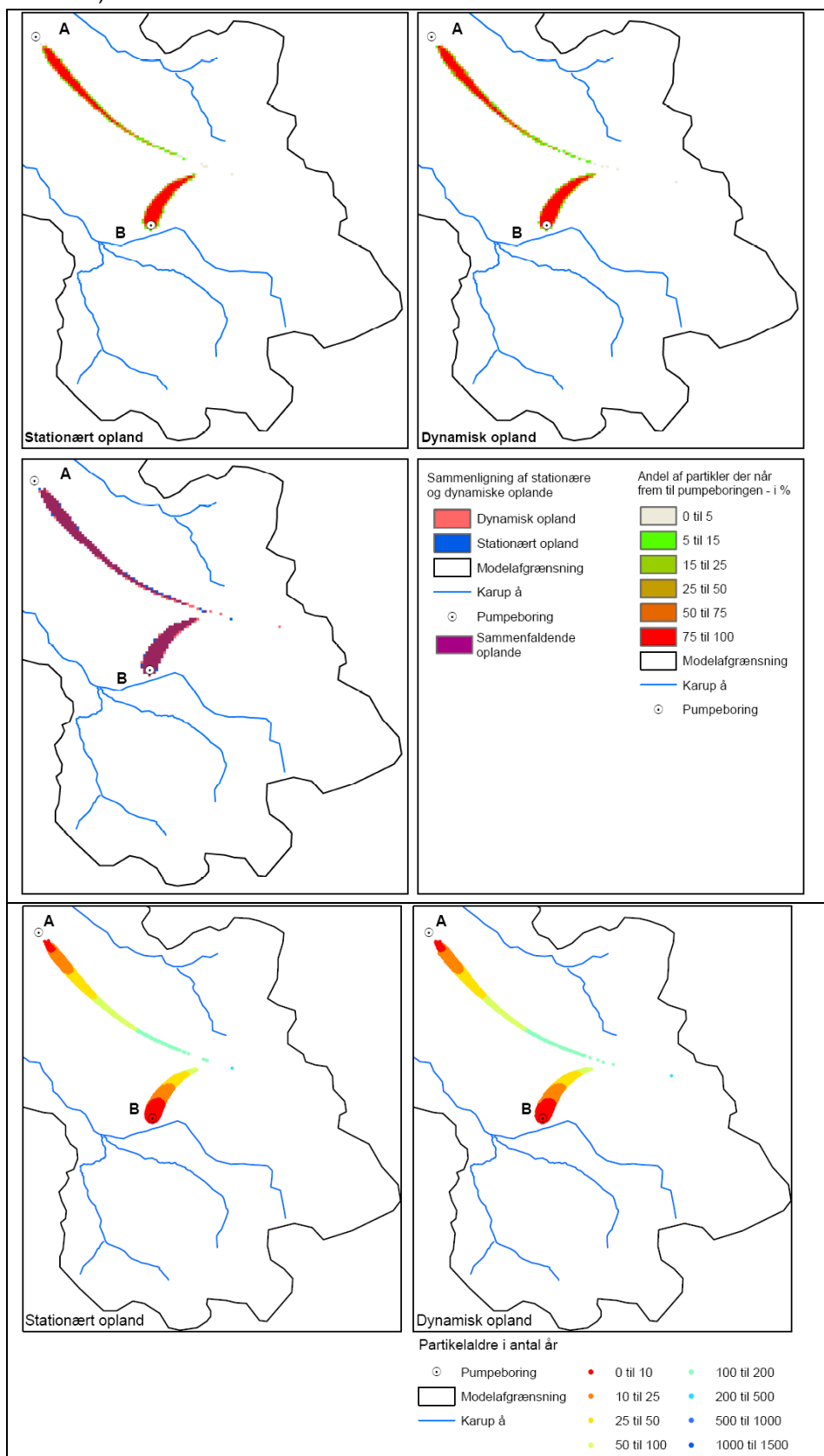
Scenarium 11 Den begravede dal, lag 4 + 6 er lækagelag, Filter placeret i lag 7



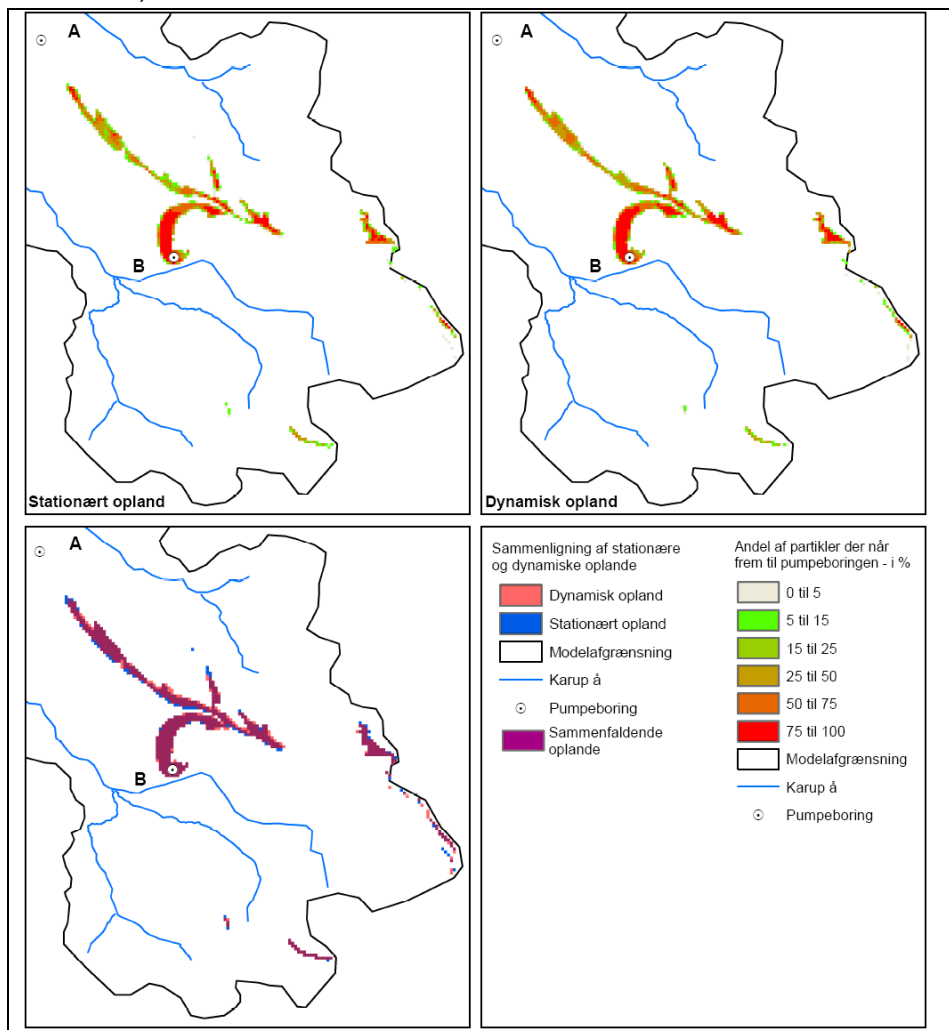
Scenarium 11.1 Den begravede dal, lag 4 + 6 er lækagelag, Filter placeret i lag 7 (model med 12 lag)

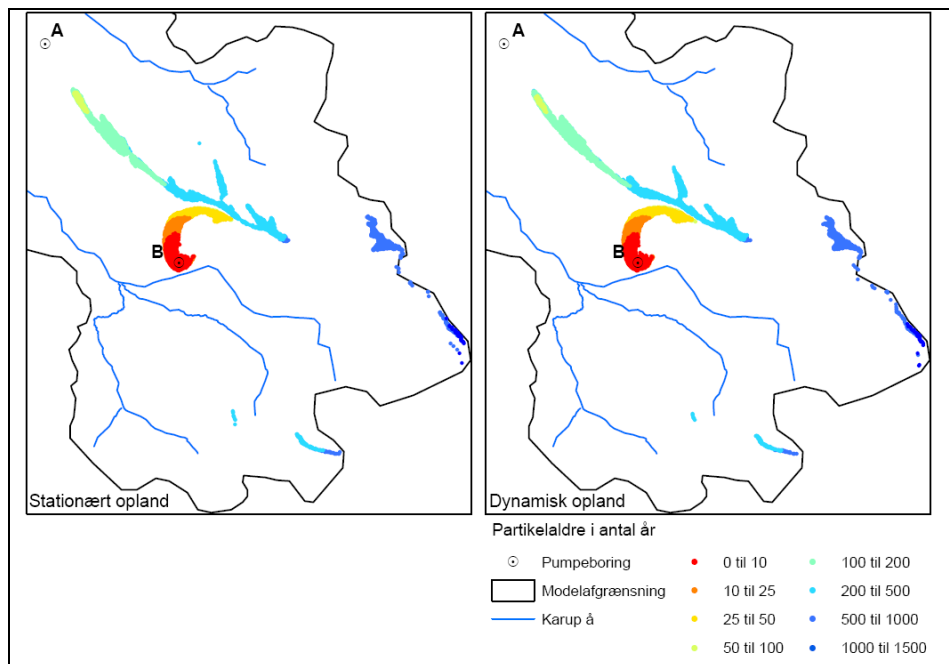


Scenarium 12 Klima ændring Hedeslette som scenarium 1 (dog indvinder A fra filter 7 og B i filter 2)



Scenarium 13 Klima ændring Morænelandskab som scenarium 5 (A indv. fra filter 7 og B fra filter 2)





BILAG 2 Tabel af areal opgørelser for model scenarie beregninger af grundvandsdannede oplande til boring A og B

Tabel med beregnede areal opgørelser, areal forskelle og areal afvigelser. GO står for grundvandsdannende opland. FO står for fællesmængde opland. Dyn står for model simulering med dynamiske nettonedbørsvariationer. Stat står for model simulering med stationær (konstant) nettonedbør.

Scenarier	Grundvandsdannende opland for stationære beregninger	Grundvandsdannende opland for dynamiske beregninger	Fællesmængde (fællesopland)	Fællesareal %	Fællesareal %	Areal forskel	Areal afvigelse
	[GO_stat]	[GO_dyn]	[FO]	[FO / GO_stat]	[FO / GO_dyn]	$[(GO_stat - GO_dyn) / GO_dyn]$	$[(GO_stat - FO) / GO_dyn]$
Scenarium 1	5800000	5890000	5300000	91%	90%	-2%	8%
Scenarium 2	5280000	5420000	4880000	92%	90%	-3%	7%
Scenarium 3	4720000	4810000	4550000	96%	95%	-2%	4%
Scenarium 3.1	4720000	4840000	4560000	97%	94%	-2%	3%
Scenarium 3.2	4720000	5020000	4600000	97%	92%	-6%	2%
Scenarium 3.3	4590000	4760000	4460000	97%	94%	-4%	3%
Scenarium 4	6960000	6520000	5580000	80%	86%	7%	21%
Scenarium 5	11030000	11320000	10150000	92%	90%	-3%	8%
Scenarium 5.1	5070000	5290000	4900000	97%	93%	-4%	3%
Scenarium 5.2	4950000	5540000	4700000	95%	85%	-11%	5%
Scenarium 6	9850000	10190000	9320000	95%	91%	-3%	5%
Scenarium 7	6800000	6770000	6090000	90%	90%	0%	10%
Scenarium 7.1	11390000	11420000	10580000	93%	93%	0%	7%
Scenarium 7.2	4900000	4880000	4690000	96%	96%	0%	4%
Scenarium 8	7600000	7720000	6840000	90%	89%	-2%	10%
Scenarium 9	7020000	7100000	6480000	92%	91%	-1%	8%
Scenarium 10	7440000	7520000	7050000	95%	94%	-1%	5%
Scenarium 11	7470000	7550000	6750000	90%	89%	-1%	10%
Scenarium 11.1	7390000	7460000	6610000	89%	89%	-1%	10%
Scenarium 12	3430000	3530000	3250000	95%	92%	-3%	5%
Scenarium 13	5920000	6010000	5280000	89%	88%	-1%	11%



DYNAMISKE OG STATIONÆRE OPLANDSBEREGNINGER UDFØRT MED TRE SEMI-SYNTETISKE MODELLER

(Delprojekt 2 om oplande)

Som støtte for den nationale grundvandskortlægning udarbejder GEUS i samarbejde med Naturstyrelsen faglige vejledninger i forskellige aspekter inden for grundvandskortlægningen.

I 2008 udgav GEUS en Geo-Vejledning nr. 2 "Indvindings- og grundvandsdannende oplande". I forlængelse af denne udgivelse blev der igangsat nogle delprojekter, med specifikke underemner der anvendes i afgrænsning af oplande.

Denne rapport beskriver de undersøgelser, som er foretaget ud fra tre semisyntetiske modeller, som hver dækker en typisk dansk geologitype: en hedeslette, et østdansk morænelandskab og en øst- eller vest-dansk geologi, indeholdende en begravet dal. For hver af de tre modeller er der udført både stationære og dynamiske partikelbane-simuleringer.

Undersøgelsen har bl.a. haft til formål at afdække, om det er tilstrækkeligt, at anvende stationære modeller i detailkortlægningen, eller om man skal opstille mere avancerede dynamiske modeller i forbindelse med bestemmelse af indvindings- og grundvandsdannende oplande.