

Fælles grundvand - Fælles ansvar: WP2 Hydrologisk model

Jacob Kidmose & Torben O. Sonnenborg

DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER
FOR DANMARK OG GRØNLAND,
ENERGI-, FORSYNINGS- OG KLIMAMINISTERIET



GEUS

Fælles grundvand – Fælles ansvar: WP2 Hydrologisk model

Jacob Kidmose & Torben O. Sonnenborg

Indhold

Forord	4
1. Indledning	6
2. Modelområde og datagrundlag	8
2.1 Modelområde	8
2.2 Data	8
3. Metode	12
3.1 Hydrologisk model.....	12
3.2 Kalibrering af model	13
3.3 Validering af model.....	13
3.3.1 Pumpestop.....	13
3.3.2 Aldersbestemmelser	14
3.3.3 Historisk analyse – klima og grundvandsindvinding	15
3.4 Indvindingsoplande	17
3.5 Vandforvaltningsscenarier.....	17
4. Resultater	20
4.1 Kalibreringsresultat.....	20
4.2 Valideringsresultater.....	23
4.2.1 Pumpe-stop	23
4.2.2 Aldersbestemmelser	24
4.2.3 Historisk analyse	24
4.3 Analyse af eksisterende system.....	28
4.3.1 Trykniveau	28
4.3.2 Gradient-forhold.....	30
4.3.3 Indvindingsoplande og aldersfordeling.....	32
4.4 Vandforvaltningsscenarier.....	36
5. Konklusion	48
6. Referencer	50
Appendix A	51
Appendix B	57

Forord

Den 23. september 2015 indgik Region Syddanmark, Odense Kommune og VandCenter Syd en partnerskabsaftale om grundvandsbeskyttelse. Formålet med partnerskabet er at styrke samarbejdet om beskyttelse af grundvandet i området vest for Odense, hvor der er store grundvandsinteresser. Som det første projekt i partnerskabets regi blev partnerskabsprojektet "Fælles grundvand fælles ansvar" igangsat i efteråret 2015. Partnerskabsprojektet gennemføres som et pilotprojekt i et tæt samarbejde mellem Region Syddanmark, Odense Kommune, VandCenter Syd og GEUS.

Formålet med partnerskabsprojektet er at udvikle værktøjer, metoder og processer, der kan bidrage til optimering af den langsigtede indsats i relation til beskyttelse, anvendelse og forvaltning af grundvandsressourcen i oplandene til VandCenter Syds kildepladser vest for Odense. Samtidig skal projektets innovative samarbejdsmodel inspirere til øget samarbejde om grundvandsbeskyttelse i Danmark.

I forbindelse med partnerskabsprojektet vil der med udgangspunkt i statens grundvandskortlægning og med inddragelse af supplerende viden blive foretaget risikovurdering og prioritering af indsatserne med henblik på at beskytte grundvandet. Indsatserne kan blandt andet omfatte forebyggelse af forurening, undersøgelser og oprensning af forureningskilder, overvågning, optimering af indvindingsstrategier, særlige arealdispositioner og forvaltningsmæssige tiltag mv.

Partnerskabsprojektet gennemføres indenfor indvindingsoplandene til VandCenter Syds kildepladser Bolbro og Eksercermarken, som forsyner store dele af Odense med drikkevand. De to kildepladser er velegnede som projektområde, fordi der foreligger væsentlig viden om de geologiske og hydrogeologiske forhold fra tidligere kortlægningsarbejde, blandt andet statens grundvandskortlægning og vandselskabets arbejde med grundvandsbeskyttelsen i området. Desuden er der kendskab til flere forurenede og muligt forurenede lokaliteter inden for oplandene til de to kildepladser, hvilket støtter valget af projektområdet.

Projektet er opdelt i 5 arbejdsplaner (Work Packages; WP):

- WP0: Projektledelse
- WP1: Geologisk model, hvor formålet er at opstille en detaljeret geologisk model, der kan danne grundlag for arbejdet i WP2, WP3 og WP4
- WP2: Hydrologisk model, hvor formålet er at opstille en detaljeret, fuldt integreret hydrologisk model, der kan danne grundlag for arbejdet i WP3 og WP4
- WP3: Stoftransport, risikovurdering og prioritering, hvor formålet er at vurdere risikoen for forurening af de dybereliggende grundvandsmagasiner til brug for prioritering af indsatser
- WP4: Vandbalance og klima, hvor formålet er at belyse sammenhænge mellem grundvand og overfladevand i byen

Den overordnede projektledelse (WP0) er varetaget af Troels Kærgaard Bjerre, VandCenter Syd, og projektledelsen af de enkelte arbejdsplaner er varetaget af: WP1: Jørgen Fjeldsø

Christensen, Region Syddanmark (WP1), Torben Sonnenborg, GEUS (WP2), Anette Hansen, Region Syddanmark (WP3), og Hans Peter Birk Hansen, Odense Kommune (WP4).

Nærværende rapport udgør afrapporteringen af WP2 – Hydrologisk model.

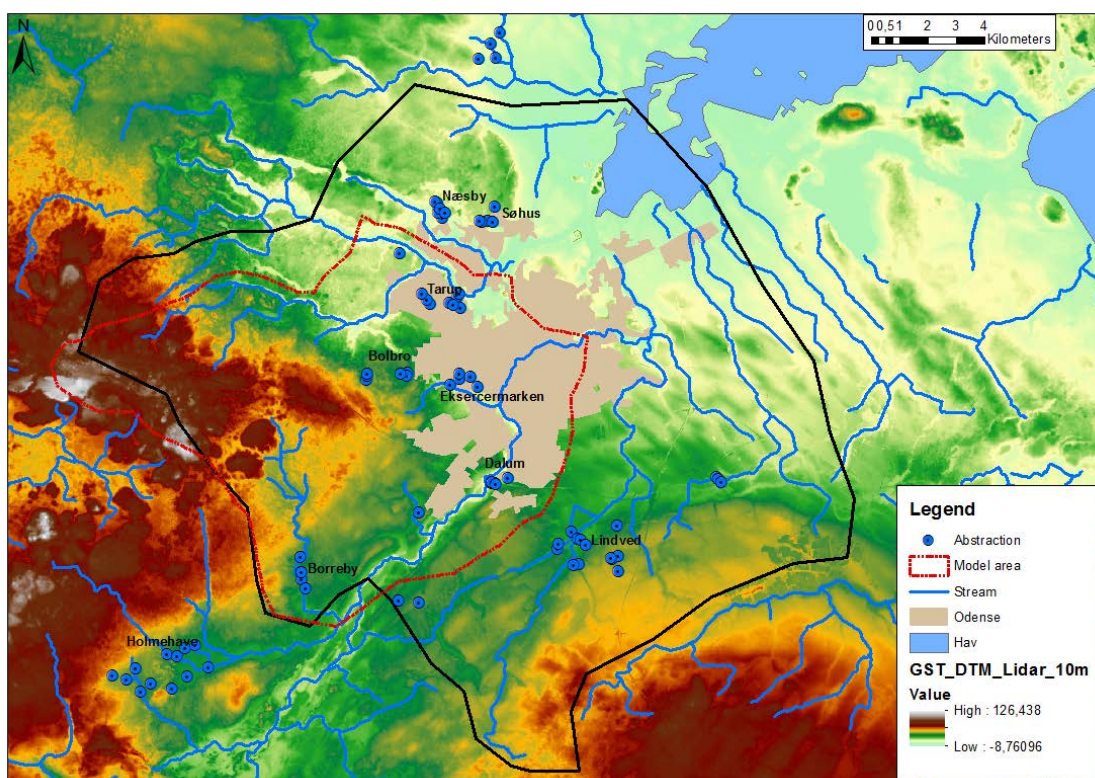
1. Indledning

Formålet med arbejdspakke 2 er at opstille en hydrologisk model for indvindingsoplandene til kildepladserne Bolbro og Eksercermarken, så det vil være muligt:

- At gennemføre en sårbarhedsvurdering for de to kildepladser, herunder en analyse af indvindingsoplande, transportveje og transporttider, under hensynstagen til gældende indvindingstilladelser.
- At vurdere effekten af ændrede indvindingsmønstre i den historiske periode 1900-1989.
- At konstruere en model, som efterfølgende kan danne udgangspunkt for evaluering af effekten af fremtidige klimaændringer samt beregninger af transporten fra forureningskilder i modelområdet.

Den hydrologiske model tager afsæt i DK-modellen for Fyn samt den såkaldte Odense City model, der blev udviklet for Region Syddanmark i 2016. Formålet for Odense City modellen var at synliggøre omfanget af de klimabetingede grundvandsstigninger i Odense Kommune, som i store områder er stærkt urbaniseret. Derfor blev forhold vedrørende befæstelse og afdræning via utætte kloakker prioriteret i opsætningen af modellen.

I den aktuelle opgave er der fokuseret på et mindre område, se figur 1.1, og for dette område er en nyudviklet geologisk model (Sandersen og Kallesøe, 2017) indbygget i den hydrologiske model. Der er fokuseret på de primære magasiner, som Vandcenter Syd (VCS) indvinder vand fra, og der er hermed opnået en beskrivelse af de geologiske variationer på et detaljeret niveau.



Figur 1.1 Afgrænsning af modelområde for Odense Vest modellen (rød stiplede linje). Den sorte streg angiver placeringen af Odense City modellen.

2. Modelområde og datagrundlag

2.1 Modelområde

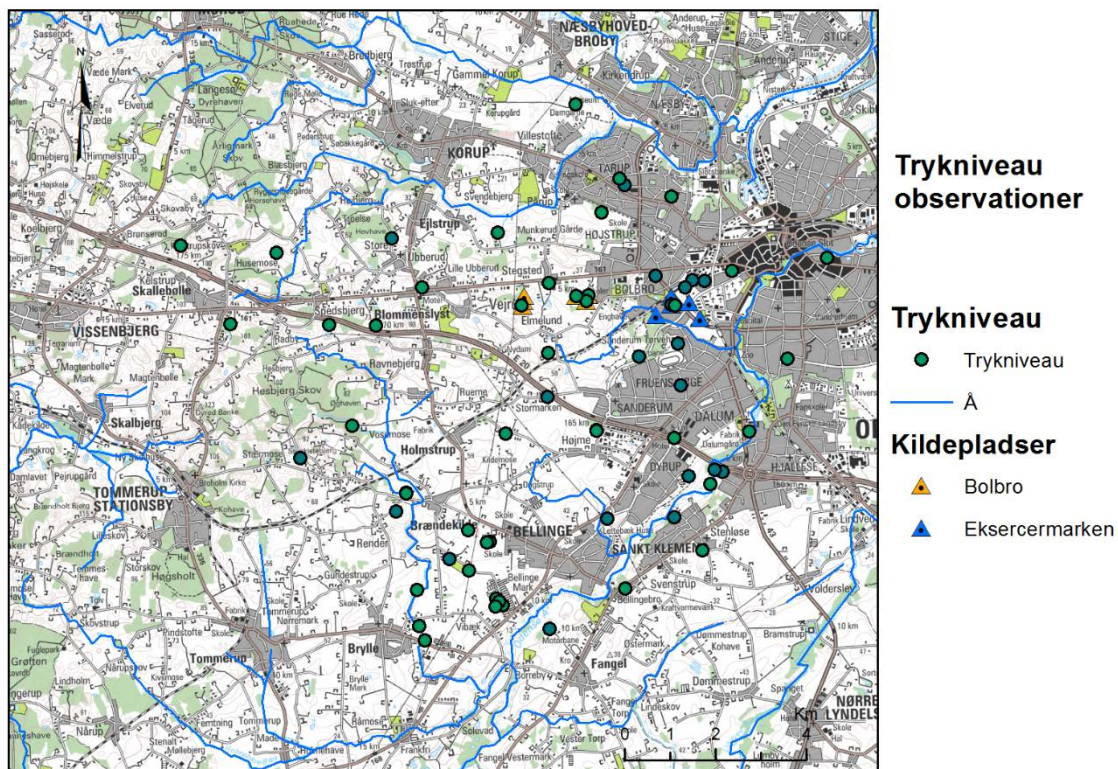
Den hydrologiske model er opstillet for oplandet til Bolbro og Eksercermarken Kildepladser, som begge er beliggende i den vestlige del af Odense, se figur 1.1. Modelområdet, som er afgrænset på baggrund af grundvandets strømningsretning, har et areal på i alt 149 km². Området er karakteriseret som et typisk østdansk morænelandskab, med et kuperet terræn domineret af moræner i de overfladenære lag (se Sandersen og Kallesøe, 2017). Arealanvendelse udgøres i den vestlige del primært af landbrug, mens by, skov, vådområder m.m. kun udgør en mindre del af området. I den østlige del er arealanvendelsen domineret af by. Modelområdet inkluderer fire af VCS' kildepladser, herunder Borreby, Dalum, Bolbro og Eksercermarken Kildepladser. Der fokuseres imidlertid kun på de to sidstnævnte i nærværende opgave.

2.2 Data

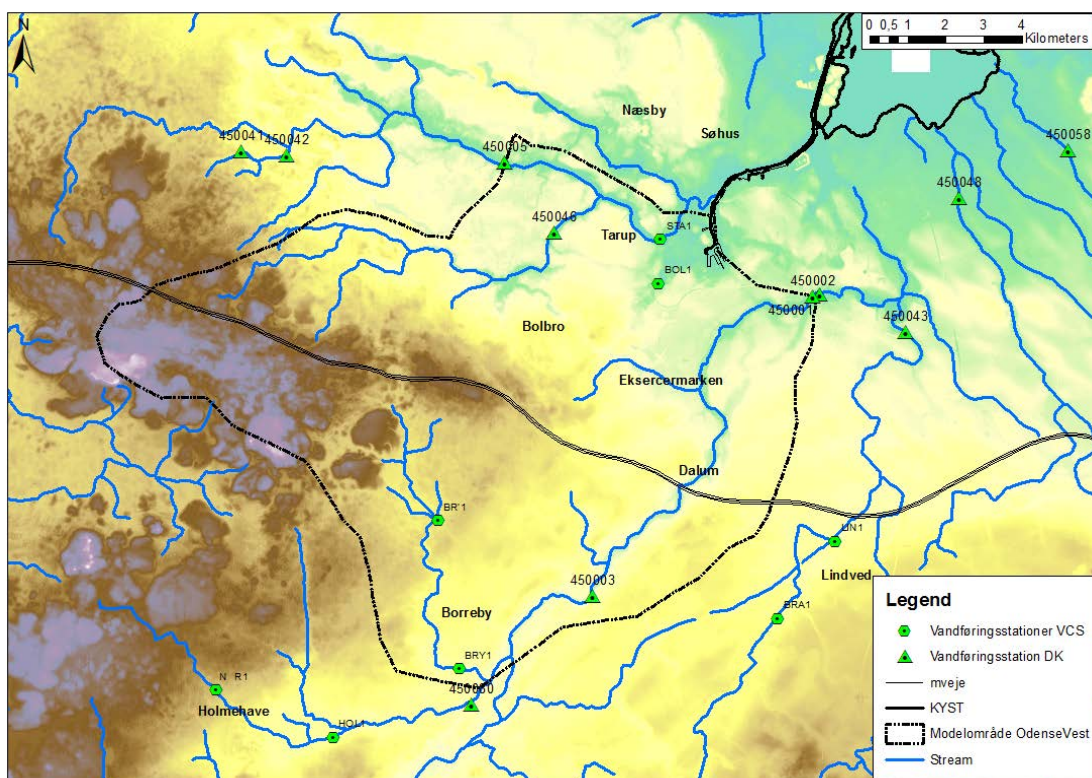
Følgende hydrogeologiske observationsdata er anvendt til opstilling af modellen: Hydraulisk trykniveau, dels fra Jupiter, dels fra VCS's database, vandløbsafstrømning, og aldersdateringer.

I figur 2.1 ses placeringen af de borer, som der er anvendt data fra i forbindelse med opsætning af modellen. Der er en forholdsvis god og jævn dækning af trykniveauobservationer, specielt omkring Bolbro og Eksercermarken kildepladser. Observationerne er fortrinsvis indsamlet fra de vigtigste magasiner i området.

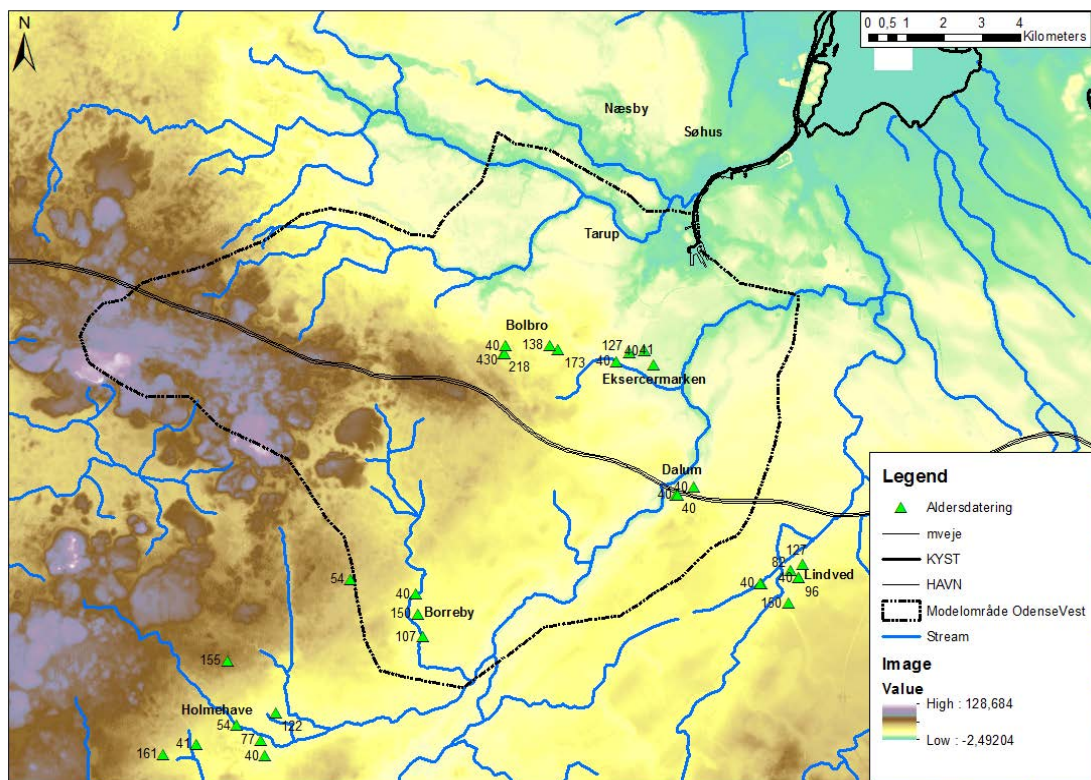
Tilgængelige vandføringsstationer er vist i figur 2.2. Modellen inkluderer kun i få tilfælde hele vandløbsoplande, og den beskriver dermed i de fleste tilfælde kun en delstrækning af det pågældende vandløb. Hvis tilstrømningen på denne delstrækning udgør en mindre del af den samlede målte afstrømning, kan der være stor usikkerhed behæftet med opgørelsen. Det er derfor vanskeligt at trække information ud af data. Alle vandløbsstationer er imidlertid inkluderet i modelopsætningen.



Figur 2.1 Placering af borer med observationer af trykniveau, som anvendes til kalibrering.



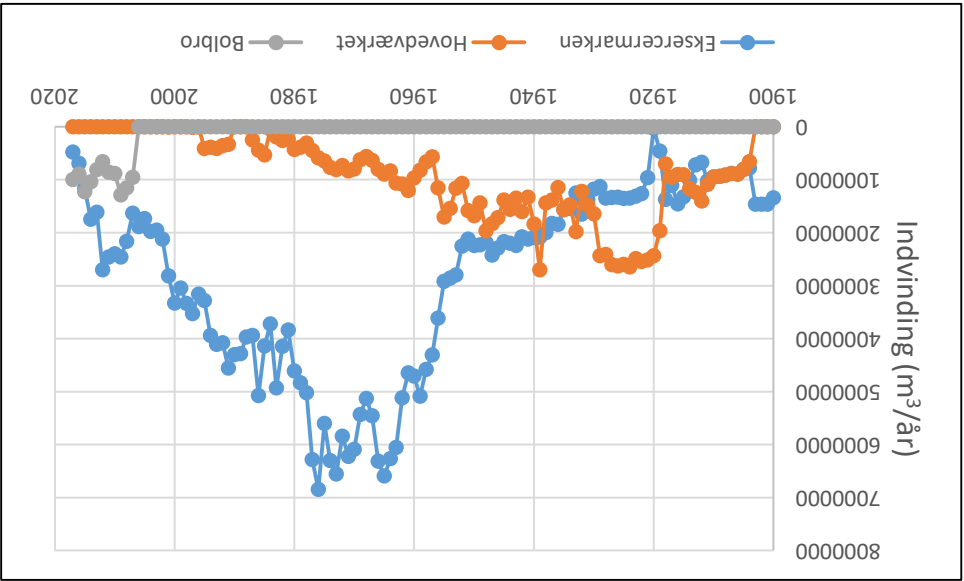
Figur 2.2 Vandføringsstationer, hhv. nationale (DK) og Vandcenter Syds stationer (VCS).



Figur 2.3 Aldersdateringer (^{39}Ar).

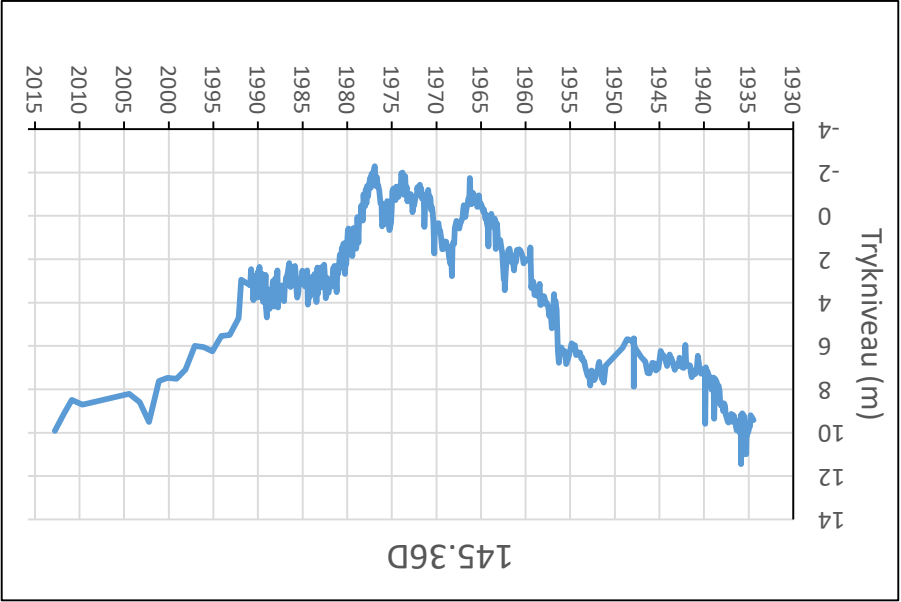
I figur 2.3 ses estimater for alderen på det oppumpede vand fra borerer på VCS's kildepladser, baseret på ^{39}Ar -målinger foretaget i 2009-2010 (Purtschert 2009, 2010). Ved Bolbro er der estimeret forholdsvis høje aldre, op til 430 år, mens der for Eksercermarken er estimeret noget lavere aldre (ca. 40 år for flere borerer).

I figur 2.4 ses indvindingen fra Hovedværket samt Eksercermarken og Bolbro kildepladser tilbage fra 1900. Allerede før 1920 er den samlede indvinding oppe på over 2 mio. m^3 pr. år. Efter 2. verdenskrig stiger indvindingen ved Eksercermarken markant, og toppe i perioden 1960-80, hvor der indvindes op til 8 mio. m^3 pr. år fra Eksercermarken og Hovedværket. I takt med vandbesparelser og etablering af nye kildepladser falder indvindingen herefter jævnt og når værdier på under 1 mio. m^3 pr. år, hvilket er et stykke fra den aktuelle vandindvindingstilladelsen for Eksercermarken på 1,2 mio. m^3 pr. år. I 2007 påbegyndtes indvinding fra Bolbro kildeplads, hvorfra der oppumpes omkring 1 mio. m^3 pr. år. Her er den aktuelle vandindvindingstilladelse på 1,8 mio. m^3 pr. år.



Figur 2.4 Indvinding ved hhv. Hovedværket, Eksercermarken og Bolbro kildepladser fra 1900 til 2017.

I figur 2.5 er udviklingen i trykniveauet ved boring 145.36D, som er placeret ca. 30 m fra indvindingsboring 145.36L ved Eksercermarken kildeplads. Der ses at være en god sammenhæng med indvindingen vist i figur 2.4, hvor høje indvindingsrater resulterer i lave målinger af trykniveauet. De laveste værdier observeres i 1970'erne, hvor trykniveauet registreres til knap -2 m. I takt med den reducerede indvinding fra slutningen af 1970'erne stiger trykniveauet igen og når til slut op på 10 m, hvilket svarer til det vandspejl, der blev målt i midten af 1930'erne, hvor indvindingen fra Eksercermarken kildeplads var sammenlignelig med den nutidige.



Figur 2.5 Udvikling i trykniveauet ved Eksercermarken kildeplads 1930-2015 (boring 145.36D).

3. Metode

Der er opstillet en integreret hydrologisk model med modelsystemet MIKE SHE for oplandet til Bolbro og Eksercermarkens kildepladser (betegnet Odense Vest modellen). Modelområdets størrelse og placering er baseret på resultater fra den model, der blev opstillet i forbindelse med grundvandskortlægningen (NIRAS 2013). Modelområdet har en størrelse der sikrer, at kildepladsernes indvinding har minimal indflydelse på det hydrauliske trykniveau ved modellens rand.

3.1 Hydrologisk model

Opstillingen af modellen bygger videre på den grundvandsmodel, som blev udviklet i projektet "Klimabetingede grundvandsstigninger i urbant område – pilotområde Odense" (Sonnenborg og Kidmose, 2016). I forhold til 2016-modellen er der foretaget ændringer mht. den geologiske model og antallet af beregningslag i grundvandszonen er øget, så det passer til den geologiske model (tabel 6.1, Sandersen og Kallesøe, 2017).

Den MIKE SHE baserede model inkluderer følgende moduler: 3D grundvandsstrømning, drænafstrømning, umættet zone (two-layer), fordampning, og overfladisk afstrømning. Vandløb og dræning er indbygget som beskrevet i Sonnenborg og Kidmose (2016), dog med den ændring, at drænkoefficienten er homogen (mens dybden til dræn varierer). Arealanvendelsen er uændret og det samme er tilfældet for befæstelsesgraden i modelområdet, som er baseret på polygondata fra VCS.

Randbetingelser til modellen defineres af DK-model Fyn, som er opdateret med den geologiske model opstillet i grundvandskortlægningen (den hydrologiske model fra kortlægningen indeholder ikke den sydlige del af oplandet til Odense Å og kan derfor ikke bruges til f.eks. klimaberegninger).

Modellen opstilles med en horisontal opløsning på 50 m x 50 m, hvilket er en forfining i forhold til Odense City modellen (100 m x 100 m) og DK-modellen (500 m x 500 m). Beregningslagene følger de geologiske lag. Den geologiske model er opdateret på basis af resultaterne fra WP1 (Sandersen og Kallesøe, 2017). Her er den geologiske lagfølge nuanceret i forhold til DK-modellen, så mens de to "gamle" modeller arbejder med 9 beregningslag, så kører Odense Vest modellen med 11 beregningslag. Der er indført to ekstra lag for at kunne opløse to "nye" geologiske lag, hhv. Diluvialt ler (lag 6) og Dal2 (lag 7), hvor Dal2 beskriver en begravet dal centralt i modelområdet. De to lag benævnes hhv. HM 6.1 og HM 6.2 i Sandersen og Kallesøe (2017).

3.2 Kalibrering af model

Følgende datasæt anvendes i kalibreringen: Observationer af grundvandsstand fra tilgængelige boringer i perioden 2000-2012 samt vandføringsdata fra vandføringsstationer i modelområdet (se afsnit 2.2). Modellen er kalibreret vha. automatisk kalibrering baseret på programmet PEST. Her er det specificeret, at modellen skal finde parameterværdier som minimerer afvigelsen mellem målt og beregnet trykniveau og vandløbsafstrømning.

3.3 Validering af model

Den hydrologiske model er efter kalibrering blevet testet mod uafhængige datasæt (validering). I det efterfølgende beskrives hvilke test og data der er anvendt.

3.3.1 Pumpestop

I efteråret 2016 er der gennemført en række indvindingspauser eller pumpestop ved Bolbro og Eksercermarken kildepladser. Disse er simuleret i den hydrologiske model efter nedenstående tabel over indvindingsmængder (i m³/måned) fordelt på boringer ved de to kildepladser. Pumpestoppet forløb primært fra september til december 2016. Det skal bemærkes, at den hydrologiske model opererer med en opløsning af indvindingsdata på månedsbasis, og der vil derfor kunne forventes en forskydning i timing på af størrelsesorden en halv måned i forhold til målte data.

Tabel 3.1 Indvindingsmængder (m³/måned) ved Eksercermarken kildeplads under pumpstop i efteråret 2016 – vinteren 2017.

Eksercermarken	E 29	E 30	E 225	E 230	E 233	E 239	E 257	Sum
DGU nr	145.718	145.719	145.203	145.2048	145.205	145.208	145.2399	
jan-2016	55785	28686	6987	0	15342	0	21281	128081
feb-2016	30154	94	21816	0	164	0	595	52823
mar-2016	10197	15783	97	0	3	0	8207	34287
apr-2016	9702	15932	109	0	3	0	8190	33936
maj-2016	68430	6021	674	0	3	0	558	100292
jun-2016	28341	16597	11521	0	32908	0	1424	90791
jul-2016	47400	12119	0	0	13041	0	1085	73645
aug-2016	33424	2	0	0	22324	0	664	56414
sep-2016	39600	129	0	0	8452	0	2	48183
okt-2016	2	2	0	0	25446	0	2	25452
nov-2016	1	1	558	0	39513	0	2	40075
dec-2016	7	13	1	0	18471	0	9572	28064
jan-2017	11188	2845	10401	0	69593	0	6265	100292
feb-2017	49045	30695	26718	0	66578	0	22724	195760
mar-2017	46710	16585	1	0	0	0	1406	64702
apr-2017	37036	16431	44	0	62439	0	2244	118194

Tabel 3.2 Indvindingsmængder ved Bolbro kildeplads under pumpstop i efter 2016.

Bolbro	BB 288	BB 317	BB 318	BB 346	BB 347	BB 348	Sum
DGU nr	145.255	145.274	145.274	145.308	145.308	145.309	
jan-2016	11079	18973	11744	8728	15352	8362	74238
feb-2016	24261	22526	25431	11482	31902	19965	135567
mar-2016	26070	23143	27551	13734	35614	22280	148392
apr-2016	26070	23141	27547	13952	35600	22250	148560
maj-2016	5482	5134	5769	25318	18265	1606	61574
jun-2016	27554	24720	22122	25531	36519	33	136479
jul-2016	17309	26122	29427	28976	26163	0	127997
aug-2016	35	12769	14452	12927	2593	9695	52471
sep-2016	0	0	39	0	0	12	51
okt-2016	0	0	40	0	0	0	40
nov-2016	0	0	42	0	0	0	42
dec-2016	0	1	45	0	105	9936	10087
jan-2017	25611	20007	27347	17643	33701	18409	142718
feb-2017	23970	22647	25349	20643	32796	20081	145486
mar-2017	29978	13043	31797	23672	23284	14621	136395
apr-2017	21833	10385	22901	16416	4630	16033	92198

Alle enheder er i m³/måned.

Det skal bemærkes, at indvindingen fra Eksercermarken Kildeplads kun er delvist stoppet, mens der på Bolbro Kildeplads er tale om et næsten totalt stop i 3-4 måneder.

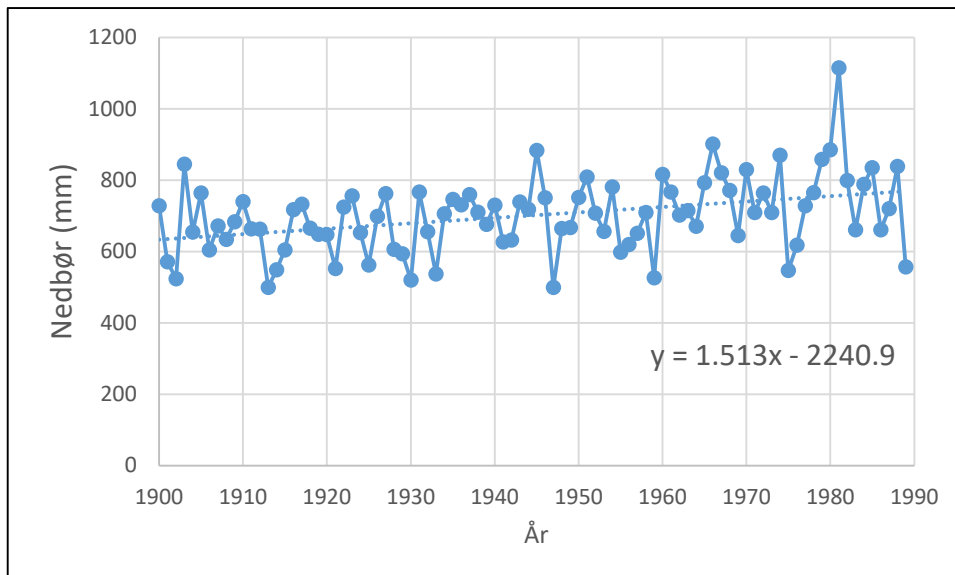
3.3.2 Aldersbestemmelser

Som beskrevet i afsnit 2.2 er der målinger af grundvandets alder til rådighed ved adskillige borer på de to kildepladser. De målte aldre er et resultat af strømningsfeltet ved kildepladserne igennem en lang årrække. Det kan være vanskeligt at tolke de målte aldre, hvis forholdene ved kildepladserne har ændret sig markant. Eksempelvis blev indvindingen ved Bolbro først påbegyndt i 2007, hvilket kun er nogle få år før alderen blev målt. Indvinding vil resultere i et ændret strømningsbillede, med højere hastigheder og måske også ændrede strømningsveje. Det kan forventes, at grundvandet gradvist vil få en lavere alder, pga. den forøgede strømningshastighed, og den fundne alder på eksempelvis 430 år ved Bolbro vil derfor kun være gældende på prøvetagningstidspunktet. Det samme gør sig gældende på Eksercermarken, hvor der tidligere (se figur 2.4) blev indvundet betydeligt mere vand end på tidspunktet for målingen. Strømningsbilledet har derfor ændret sig betydeligt, at for at give en troværdig beskrivelse af aldersfordelingen i området, der svarer til de målte aldre, er det i princippet nødvendigt at reproducere hele det historiske forløb. Specielt perioden efter indvindingen begyndte er vigtig, da det har haft stor indflydelse på strømningshastigheder og strømningsveje, men også grundvandsdannelsens variation tilbage i tiden vil have indflydelse på resultatet. I den foreliggende analyse anvendes der data fra perioden 2000-2012 til at generere resultater for grundvandets alder, og det må derfor forventes, at der kan være store forskelle mellem observeret alder og den alder, som modellen beregner.

3.3.3 Historisk analyse – klima og grundvandsindvinding

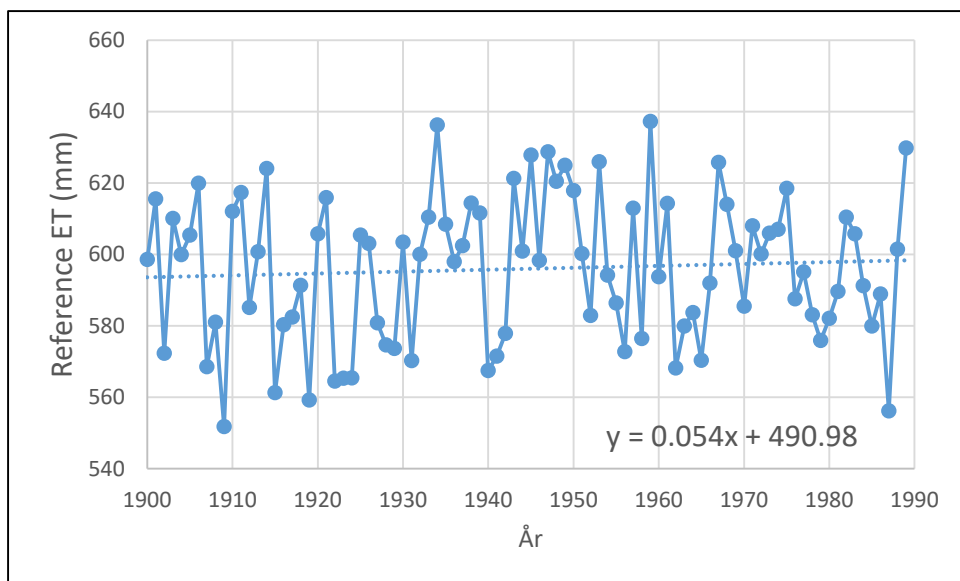
Den historiske analyse baserer sig på en modelkørsel for perioden 1900-1989. Til det formål er indvindingsdata for perioden etableret sammen med Vandcenter Syd (VCS). Klimadata i form af daglig nedbør og temperatur er digitaliseret (nedbør og temperatur) på basis af datablade udlånt af Rigsarkivet, mens referencefordampning er beregnet på basis af temperatur. Der er anvendt data fra de tre stationer 28170 Dalum, 28180 Blangstedgaard (Odense) og 28280 Årslev. Den målte nedbør er efterfølgende korrigeret for målefejl (aerodynamiske effekter) vha. den dynamiske korrektionsmetode (Stisen et al., 2011).

Figur 3.1 viser nedbørsdata, der er brugt til den historiske modelkørsel. Nedbøren ses at stige jævnt igennem den betragtede periode, og der findes en lineær stigning på 1,5 mm/år, svarende til at nedbøren er steget med 150 mm de sidste 100 år eller med 24%. Der findes forholdsvis store forskelle mellem nedbøren de enkelte år, med minimum på knap 500 mm og maksimum på lidt over 1100 mm.



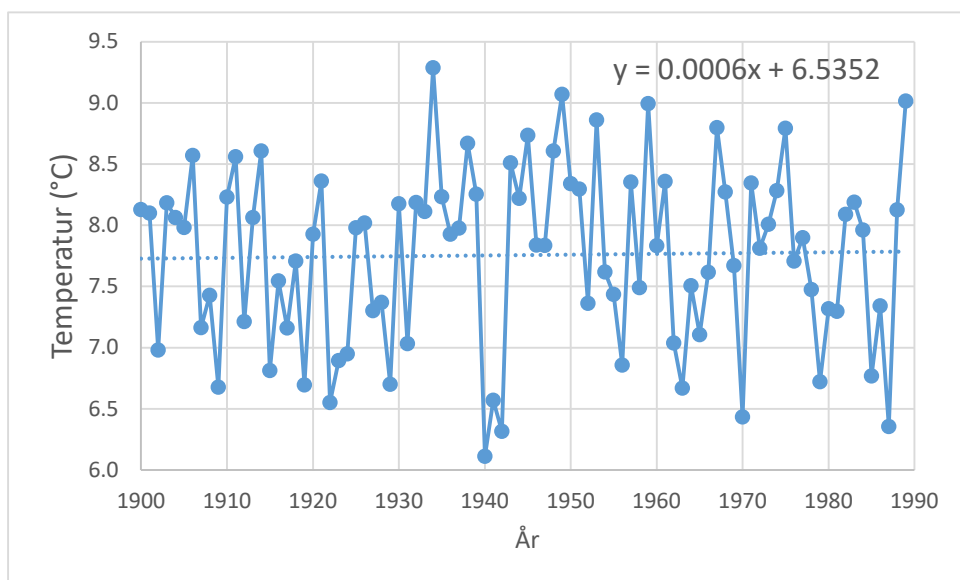
Figur 3.1 Historisk nedbør i Odense. Nedbøren er i gennemsnit på 701 mm/år og stiger i gennemsnit med 1.5 mm/år.

I figur 3.2 ses den beregnede referencefordampning siden 1900. Fordampningen er relativ konstant på omkring 600 mm pr. år, og varierer inden for intervallet 550-640 mm pr. år.

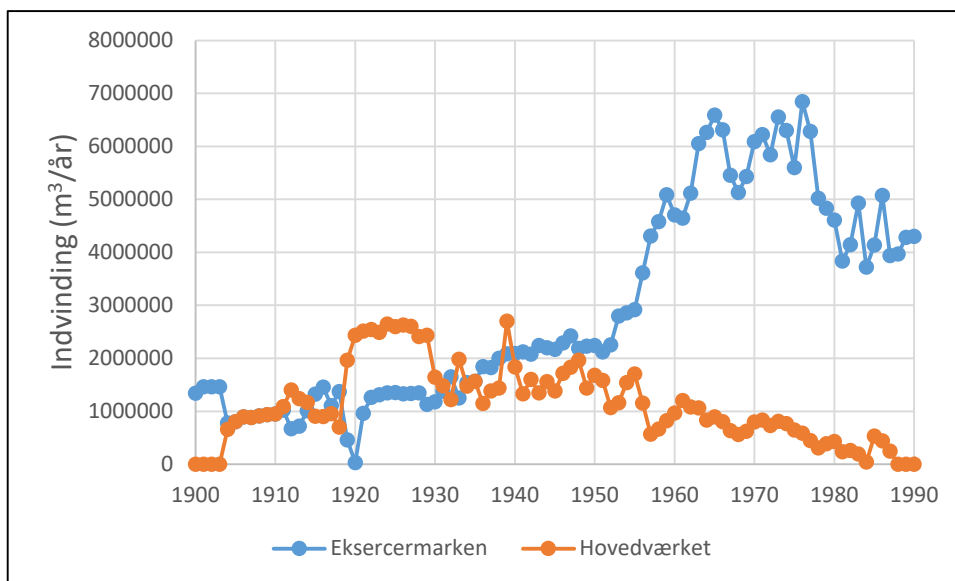


Figur 3.2 Historisk referencefordampning i Odense. Fordampning ligger i gennemsnit på 596 mm/år og stiger i gennemsnit med 0.05 mm/år (ikke signifikant).

Temperaturudviklingen er vist i figur 3.3. Her ses en svag stigning (ikke signifikant) frem mod 1990. Årlig middeltemperatur varierer mellem 6 °C og godt 9 °C.



Figur 3.3 Historisk temperatur i Odense. Temperaturen ligger i gennemsnit på 7.8 °C og stiger meget lidt i den analyserede periode.



Figur 3.4 Historisk indvinding ved Eksercermarken Kildeplads og Hovedværket.

Den historiske indvinding ved de "gamle" kildepladser Hovedværket og Eksercermarken ses på figur 3.4. Mens indvindingen i starten af 1900-tallet var på ca. 2 mio. m³ pr. år, så steg den oppumpede mængde markant efter 2. verdenskrig og var maksimal i perioden 1960-80 med værdier på op imod 8 mio. m³ pr. år.

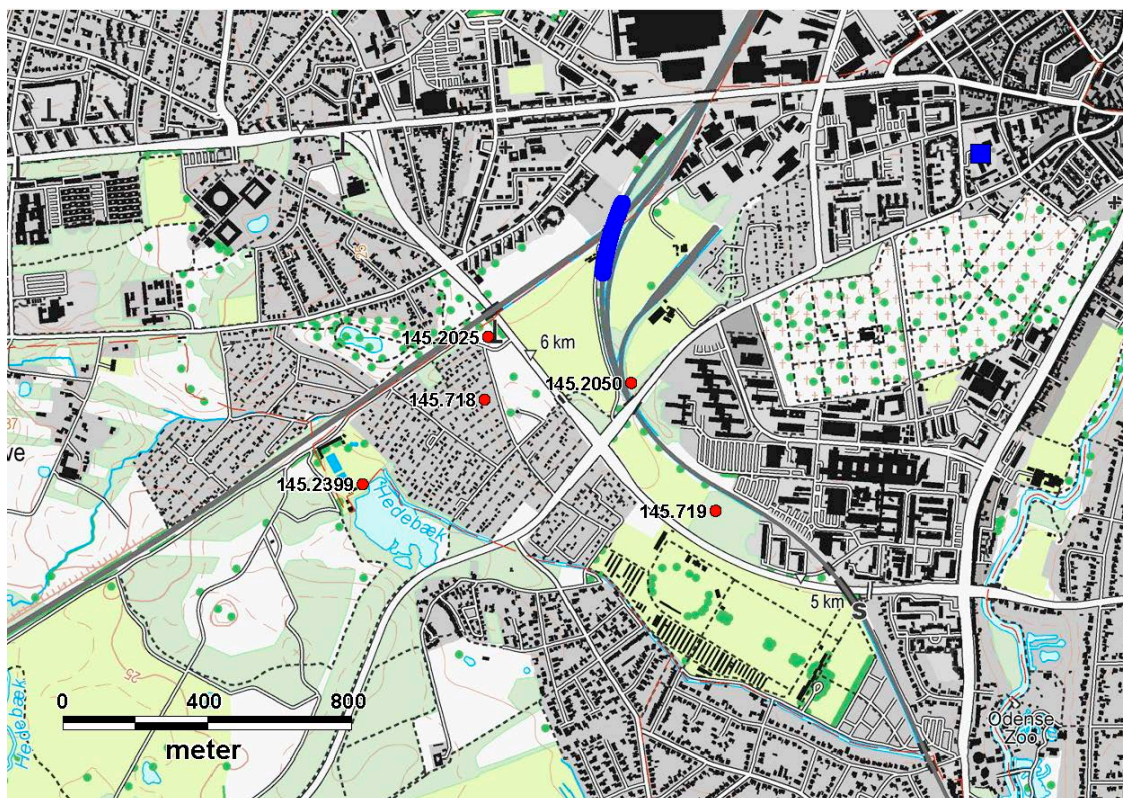
Det antages, at ændringer i areal-anvendelse har mindre betydning for resultaterne, og derfor kan beskrives som stationære. Det antages desuden, at randbetingelserne til modellen (givet ved DK-model Fyn) kan repræsenteres ved resultater fra perioden efter 1990, hvor de i princippet skulle repræsenteres ved resultater fra perioden 1900-1989. Der er imidlertid ikke klimadata til rådighed til at gennemføre en sådan beregning for hele Fyn.

3.4 Indvindingsoplande

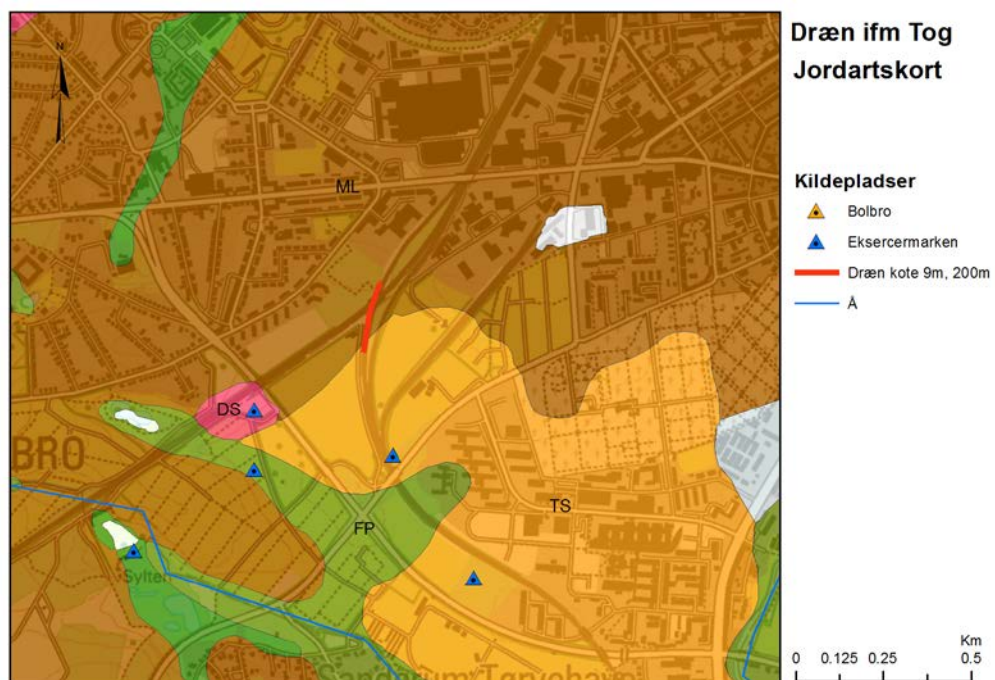
Indvindingsoplande (GEUS, 2017) genereres på basis af partikelbaneberegninger. Der placeres partikler (25 stk.) i samtlige af modellens celler. Herefter køres modellen i 300 år, hvor strømningsløsningen svarende til perioden 2000-2012 recirkuleres 25 gange og partiklernes følges nedstrøms for deres initiale placering. Der sker en registrering af de partikler, som havner i enten Bolbro eller Eksercermarken kildepladser, og startplaceringen af de pågældende partikler illustreres. Desuden opgøres transporttiden til kildepladsen for samtlige partikler.

3.5 Vandforvaltningsscenarier

Der er defineret 7 scenarier, hvor indvinding/dræning afviger fra de aktuelle forhold ved de to kildepladser. I alle scenarier antages det, at Banedanmark har drænet en 200 m lang strækning langs Svendborg-baneføringen, umiddelbart nord for Eksercermarken kildeplads, til kote 9 m, se figur 3.5. På figur 3.6 ses, hvilke jordarter den drænedes strækning er placeret i, og det ses at den ligger på grænsen mellem moræneler og smeltevandssand.



Figur 3.5 Strækning for Banedanmark installerer dræn i kote 9 m (angivet med blå).



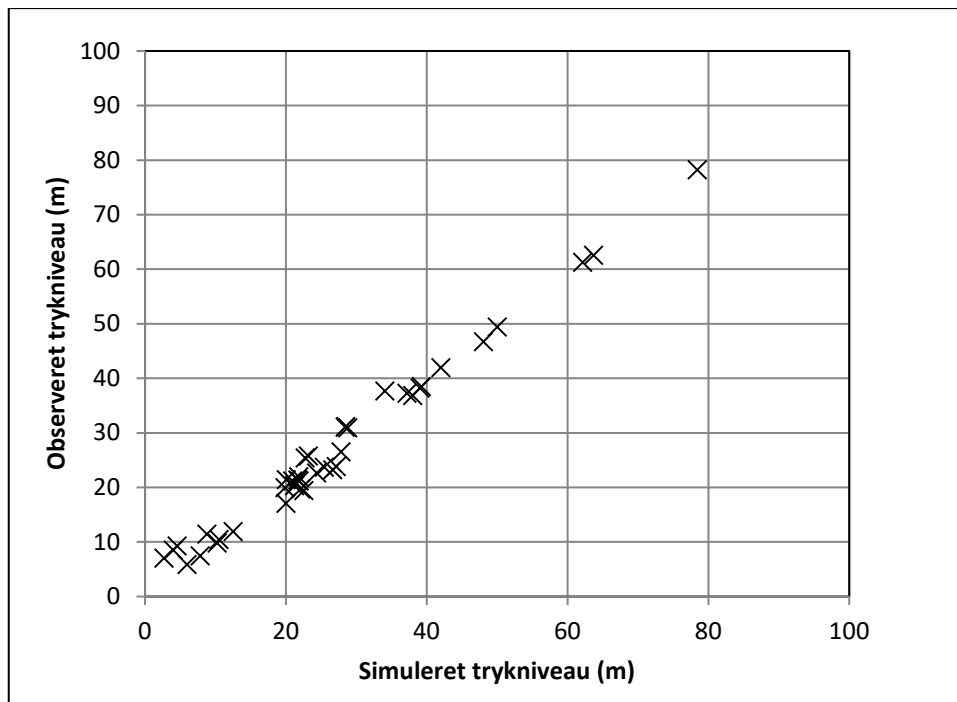
Figur 3.6 Placering af drænet strækning i forhold til jordartskort.

I tabel 3.3 er indvindingen for de forskellige scenarier angivet. Mens indvindingen ved Eksercermarken varierer mellem 0 og 3 mio. m³ om året, varierer indvindingen ved Bolbro mellem 1,8 og 3,0 mio. m³ pr år.

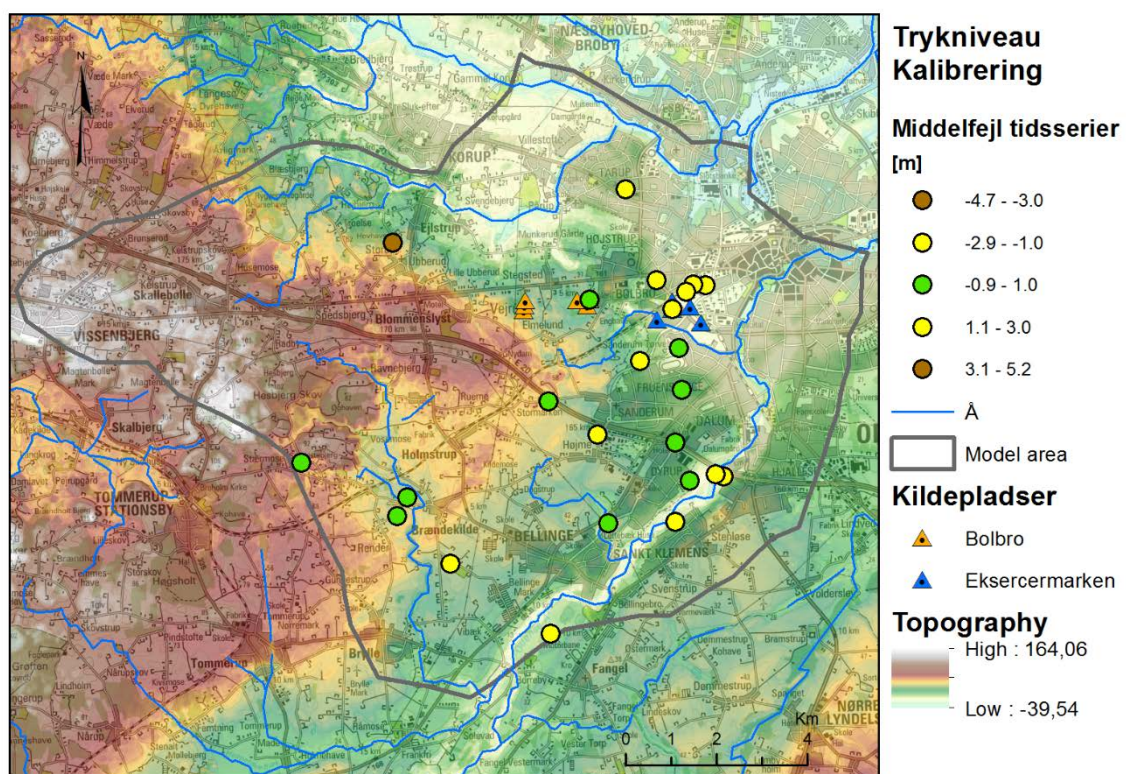
Tabel 3.3 Indvindingsrater for de 7 scenarier fordelt på indvindingsboringer. I alle scenarier er der installere dræn i kote 9 m på en 200 m strækning på Svendborg-banen (se figur 3.5).

Boring	DGU nr.	Scenarie (mio. m ³ /år)						
		1	2	3	4	5	6	7
Eksercer		1,2	2,0	3,0	1,2	2,0	0	0,6
E225	145.2025	0,22	0,34	0,55	0,22	0,34	0	0,14
E233	145.2050	0,36	0,70	0,93	0,36	0,70	0	0,30
E257	145.2399	0	0	0	0	0	0	0
E29	145.718	0,46	0,74	0,94	0,46	0,74	0	0,09
E30	145.719	0,17	0,22	0,58	0,17	0,22	0	0,07
Bolbro		1,8	1,8	1,8	3,0	3,0	1,8	1,8
BB288	145.2552	0,19	0,19	0,19	0,73	0,73	0,19	0,19
BB317	145.2739	0,15	0,15	0,15	0,63	0,63	0,15	0,15
BB318	145.2740	0,48	0,48	0,48	0,66	0,66	0,48	0,48
BB346	145.3083	0,32	0,32	0,32	0,37	0,37	0,32	0,32
BB347	145.3084	0,30	0,30	0,30	0,29	0,29	0,30	0,30
BB348	145.3085	0,30	0,30	0,30	0,29	0,29	0,30	0,30

Der er desuden defineret et scenarie nr. 8, som beskriver de aktuelle indvindingsforhold i perioden 2000-2012 (med Banedanmark dræn installeret). Ved sammenligning med dette scenarie kan effekten af ændret indvinding ved de to kildepladser isoleres.

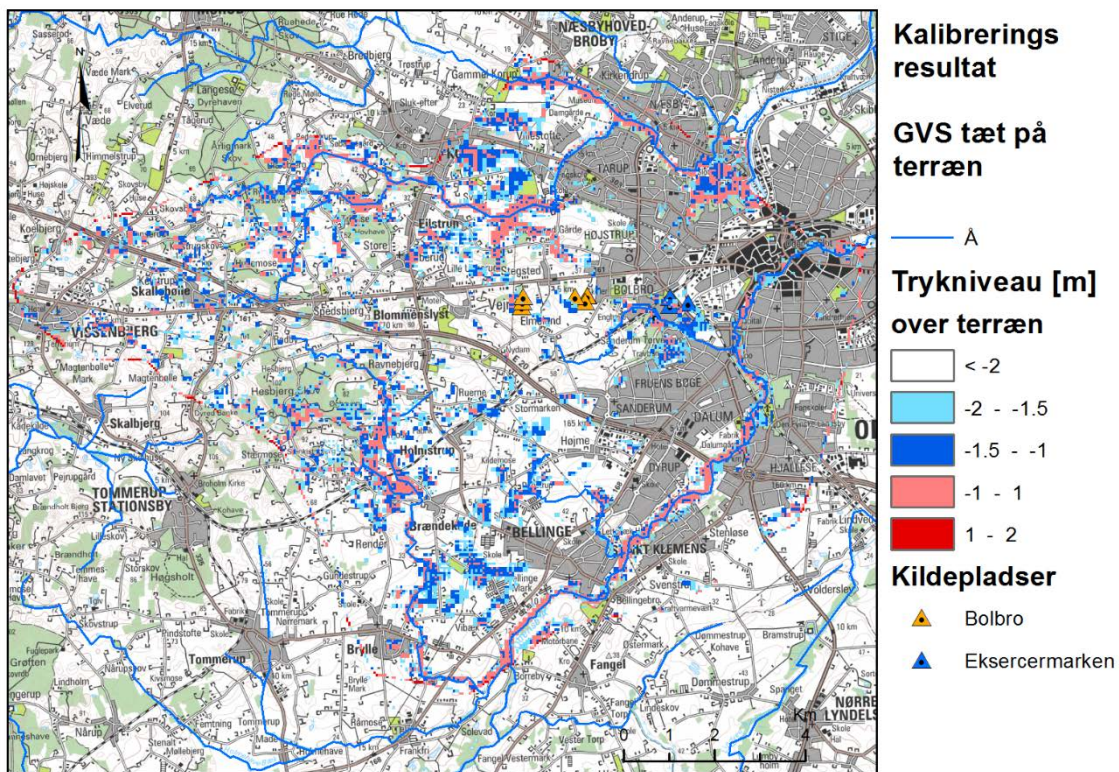


Figur 4.2 Scatter-diagram over observeret mod simuleret trykniveau.



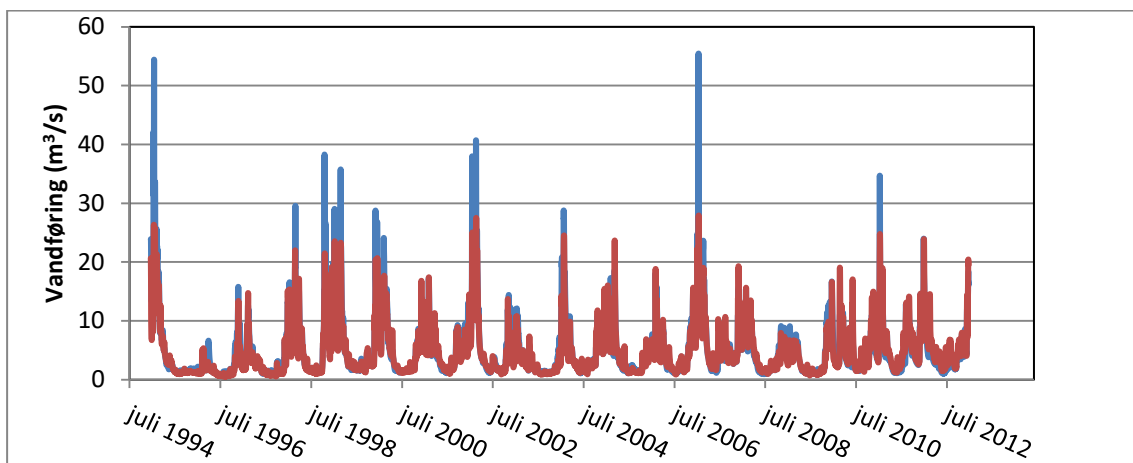
Figur 4.3 Fordeling af fejl på tidsserier. ME = -0.54 m, RMS = 1.43 m.

I figur 4.4 ses, i hvilke områder der simuleres grundvand over eller tæt på terræn. Typisk findes der grundvand over terræn (rødlige områder) i ådalene.



Figur 4.4 Områder med grundvand tæt på terræn. Den hvide farve angiver områder, hvor der er mere end to meter til grundvandet.

I figur 4.5 ses overensstemmelsen mellem observeret og simuleret vandføring ved station 450003 (Odense Å). Der er generelt en fornuftig beskrivelse af dynamikken, men med en tendens til at modellen overestimerer de høje afstrømninger. Det skal imidlertid bemærkes, at den beregnede afstrømning i høj grad er styret af indstrømningen på den sydlige rand af modellen.

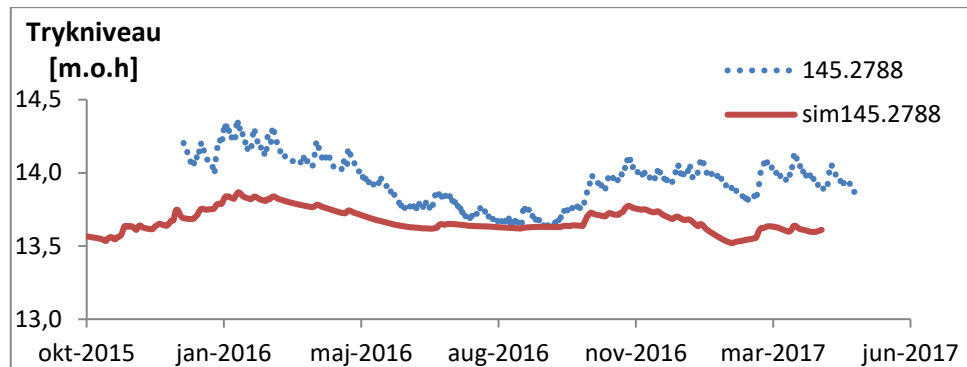


Figur 4.5 Rød: Observeret afstrømning ved station 450003. Blå: Simuleret afstrømning ved station 450003.

4.2 Valideringsresultater

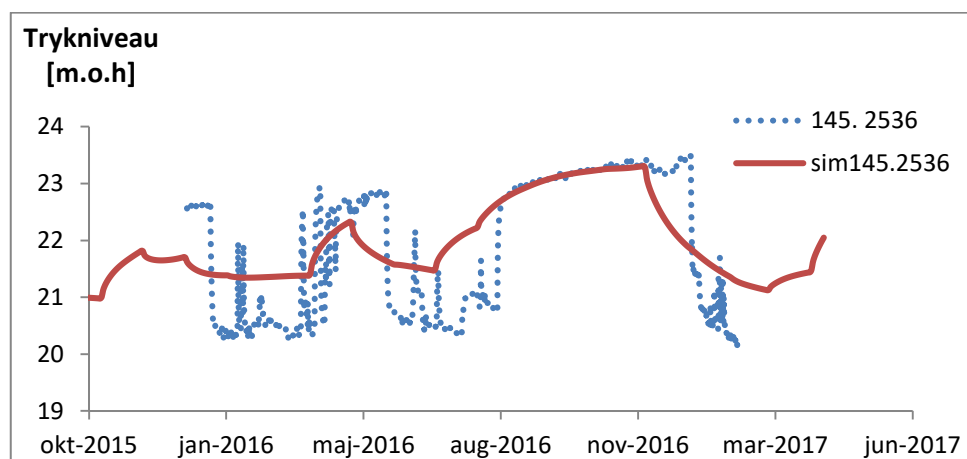
4.2.1 Pumpe-stop

Effekten af pumpestoppet i efteråret 2016 er analyseret ved at sammenligne observeret og simuleret trykniveau i borer ved de to kildepladser. I figur 4.6 ses resultater fra en boring, som ikke er påvirket af pumpestoppet. Data ses at være påvirket af årstidsvariationerne i klimaet. Det samme ses for modellen (rød kurve), dog i mindre grad end data.



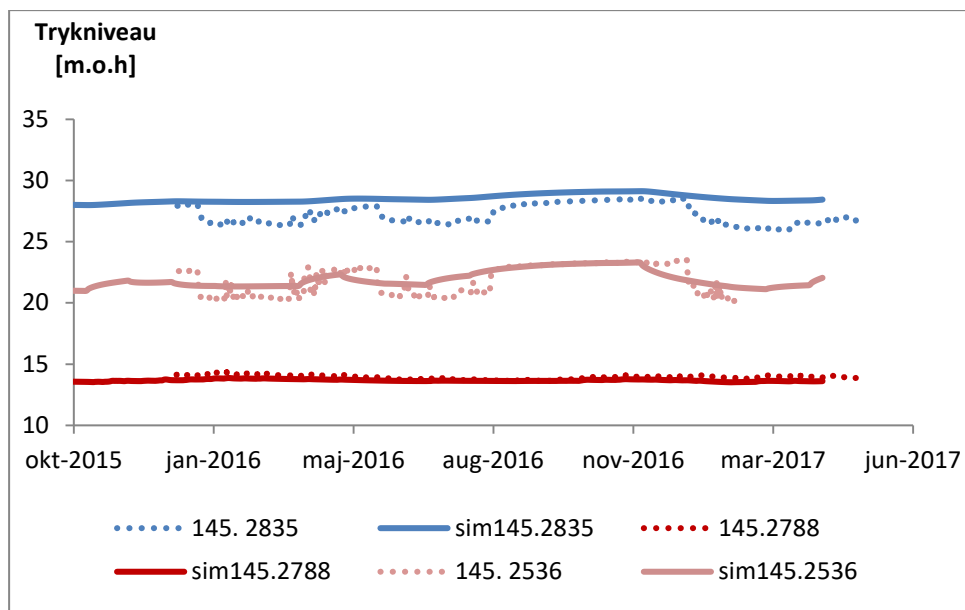
Figur 4.6 Trykniveau i boring som ikke er påvirket af pumpestoppet.

I figur 4.7 ses data og modelresultater fra boring 145.2536 ved Bolbro, som tydeligt ses at være påvirket af op til flere pumpestop. Modellen har svært ved at reproducere timingen, hvilket bl.a. skyldes, at den arbejder med månedlig opløsning af indvindingsdata. Modellen er imidlertid i stand til at gengive variationerne, om end med knapt så store udslag, som data viser.



Figur 4.7 Trykniveau fra boring som i udpræget grad er påvirket af indvindingsstoppet (DGU nr. 145.2536 ved Bolbro Kildeplads).

I figur 4.8 ses responset ved tre borer. Generelt er modellens respons lidt mindre end data viser. Til gengæld rammes niveauet rimeligt i alle tilfælde.



Figur 4.8 Forskellig påvirkning af trykniveau i borer med filtersætning.

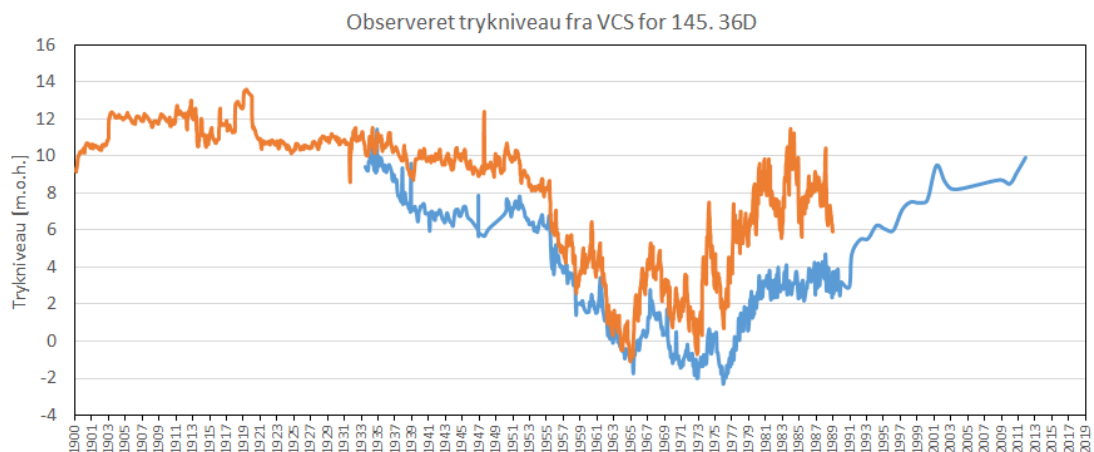
4.2.2 Aldersbestemmelser

På baggrund af strømningsløsningen, som repræsenterer perioden 2000-2012, er alderen på vandet, der oppumpes ved de to kildepladser bestemt. Ved Eksercermarken simuleres en medianværdi på 111 år, mens der ved Bolbro findes en medianværdi på 59 år. De tilsvarende målte værdier ligger på hhv. 40,5 år og 173 år (se også figur 2.3), og der er dermed store forskelle mellem observeret og beregnet alder. Ved Bolbro ligger de målte aldre relativt højt, op til 430 år, mens de ved Eksercermarken ligger forholdsvis lavt, ca. 40 år. Der kan være forskellige forklaringer på uoverensstemmelsen. ^{39}Ar -bestemmelser af aldre er behæftet med betydelige usikkerheder, som kan forklare noget af forskellen. Desuden vil de ikke-stationære forhold ved de to kildepladser betyde, at modelresultaterne er vanskelige at sammenligne med de observerede data (se afsnit 3.3.2). Indvindingen ved Eksercermarken har historisk været betydeligt større end den, der er anvendt i perioden 2000-2012, hvilket alt andet lige vil betyde, at den målte alder er mindre end man ville forvente med indvindingen i 2000-2012. Tilsvarende må man forvente, at de modelberegnedes aldre fundet på baggrund af indvindingen fra 2000-2012 er større end den ville være, hvis det historiske forløb med meget store indvindinger i 60'erne og 70'erne havde været simuleret. Det vurderes derfor at være vanskeligt at foretage en egentlig validering af aldersberegningerne i det aktuelle tilfælde. Det vil i princippet kræve data for klima og indvinding, som dækker transporttiden fra hele indvindingsoplandet til kildepladsen (flere hundrede år).

4.2.3 Historisk analyse

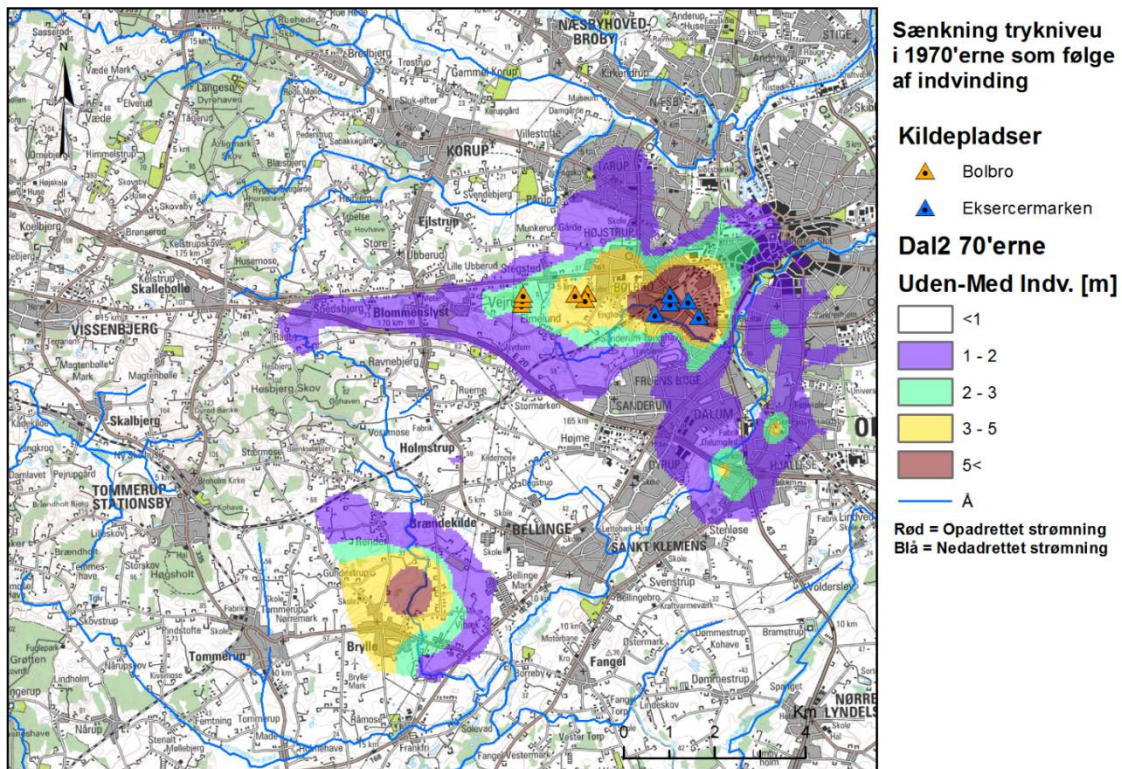
På figur 4.9 ses beregnet trykniveau ved observationsboring 145.36D ved Eksercermarken kildeplads. Boringen står tæt (ca. 30 m) på en indvindingsboring (145.36L), som har indvun-

det vand siden 1956. Der indvindes fra Dal2 (benævnt HM6.2 i geologisk model). Det beregnede trykniveau er tydeligt påvirket af den kraftige indvinding i området, som følger det observerede fald i vandspejlet frem mod slutningen af 1960'erne. Frem til slutningen af 70'erne følger simuleringen de observerede variationer, dog med en overestimering på et par meter. Den relativt kraftige stigning efter 1980 overestimeres en del, med op til ca. 4 meter. Det skal tages i betragtning, at modellen kun beskriver ændringerne i indvinding og klima, og at der er usikkerhed på begge inputs. Det antages imidlertid, at alle andre faktorer er konstante inklusiv dræning, bebyggelse med øget befæstelse til følge, og andre ændringer i arealanvendelse. Da der sker en markant ændring i urbanisering i den østlige del af området i løbet af den simulerede periode må effekten heraf forventes at være en plausibel forklaring på afvigelserne. Pga. manglende detaljering af de lokale forhold må der forventes visse unøjagtigheder på beregningen, og set i det lys vurderes modellen at udføre et fornuftigt job.



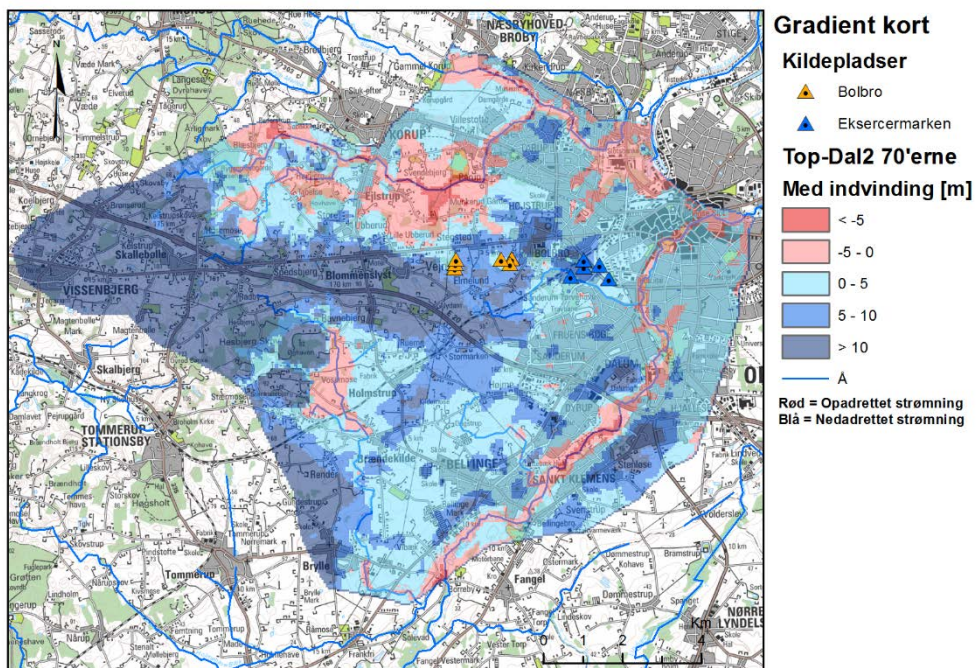
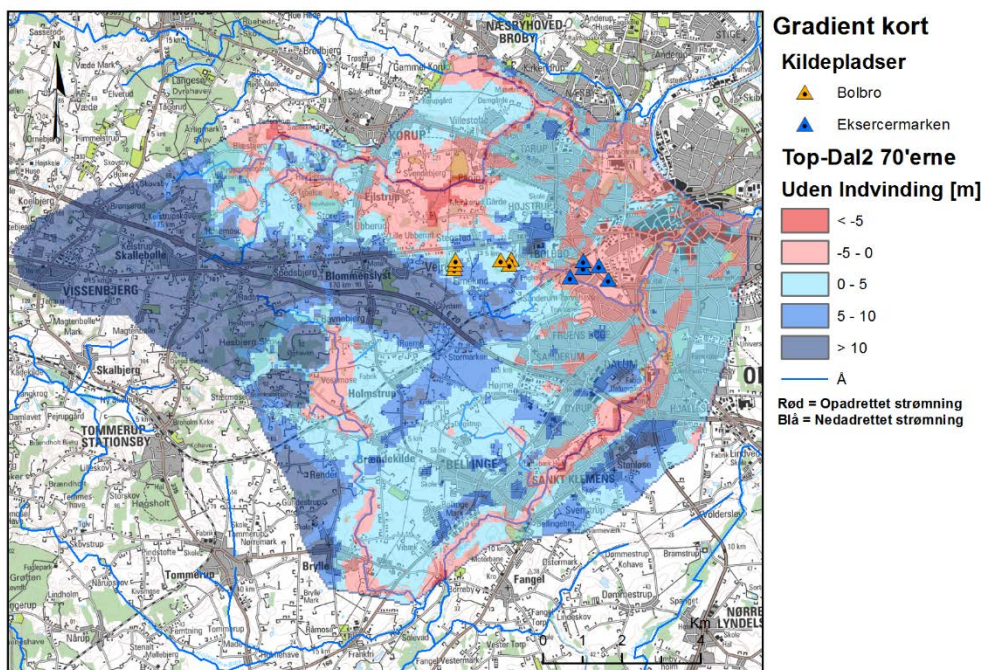
Figur 4.9 Observeret (blå kurve) og simuleret (orange kurve) trykniveau ved boring 145.36D, som er placeret ca. 30 m fra indvindingsboring 145.36L.

For at illustrere udbredelsen af den kraftige indvinding ved Eksercermarken i 60- og 70-erne er sænkningen i laget Dal2 (benævnt HM6.2 i Sandersen og Kallesøe, 2017) vist i figur 4.10. Der findes en kraftig sænkning på over 5 m i et område på ca. 4 km² omkring kildepladsen. Sænkninger på op til en meter udbreder sig forholdsvis langt fra kildepladsen, specielt i vestlig retning.



Figur 4.10 Sænkning som følge af indvinding i 1970-erne.

Den store sænkning, som genereres i det primære magasin Dal2 (HM6.2), påvirker de vertikale gradientforhold i modelområdet. I figur 4.11 er trykforskellen mellem det primære magasin og det øverste modellag (HM1.1) vist hhv. uden og med indvinding. Der ses at være store forskelle på de to situationer, specielt omkring Eksercermarken kildeplads.



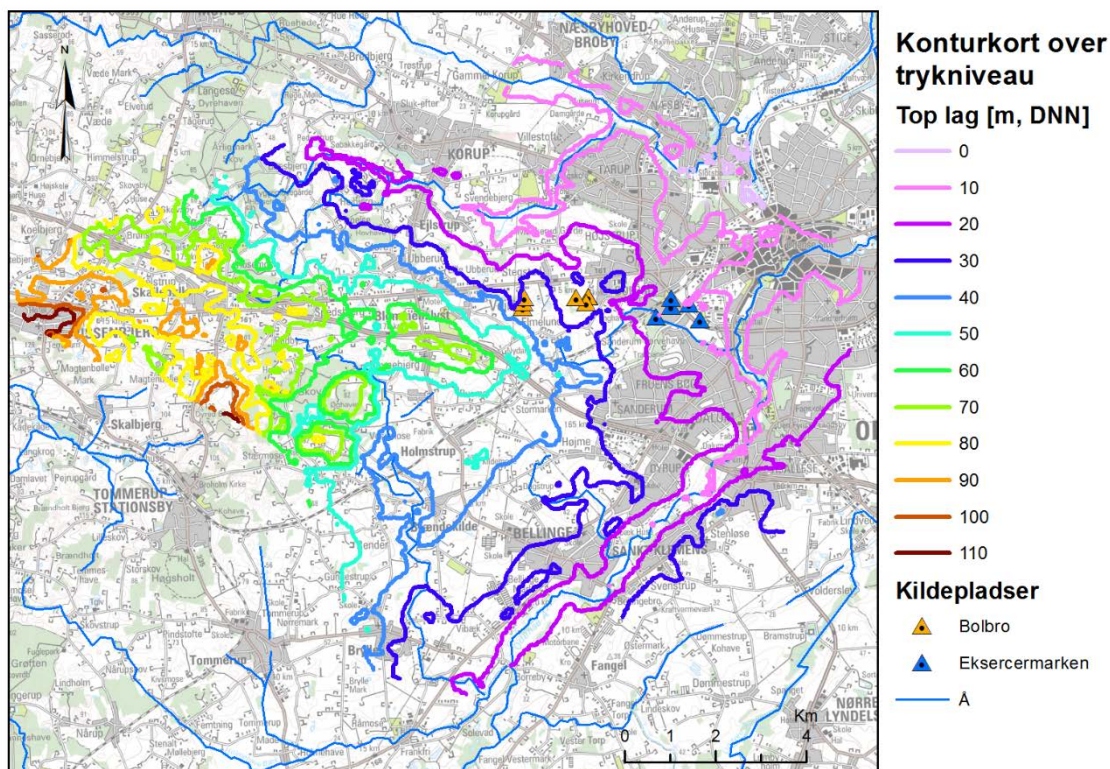
Figur 4.11 Forskellen i trykniveau mellem det øverste lag i modellen og laget Dal2. Øverst ses resultater i en situation uden indvinding, nederst situationen med aktuel indvinding.

Hvis der ikke er indvinding er der en opadrettet strømning (røde områder), mens der i situationen med indvinding findes nedadrettet gradient ved kildepladsen. I en upåvirket situation vil risikoen for at området omkring kildepladsen vil blive forurenet af forureninger placeret lokalt derfor være lille, mens der i indvindingssituationen er høj risiko for, at et udslip omkring kildepladsen vil strømme ned i boringernes filter.

4.3 Analyse af eksisterende system

4.3.1 Trykniveau

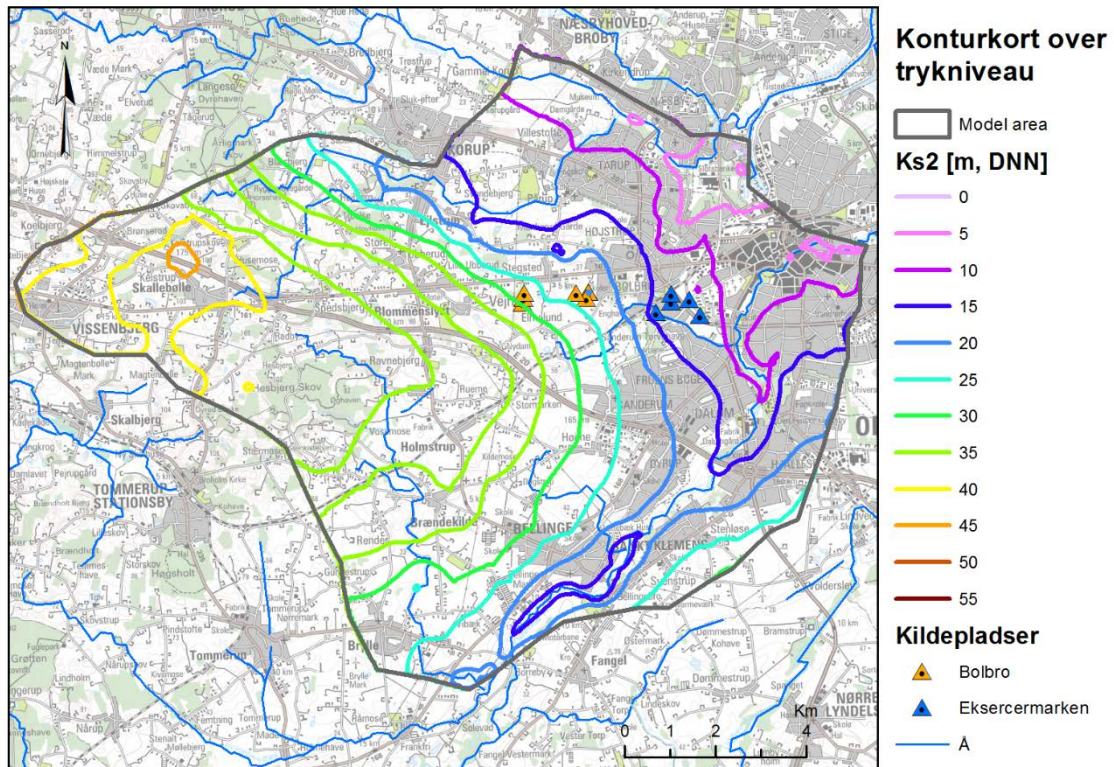
Trykniveaufordelingen i det øverste beregningslag (top lag, benævnt HM1.1 i geologisk model) er i høj grad påvirket af topografien, se figur 4.12, hvor de højeste værdier ses vestligt i modelområdet omkring Vissenbjerg. Under havneområdet i Odense findes de laveste trykniveauer for det øverste beregningslag med værdier omkring kote 0.



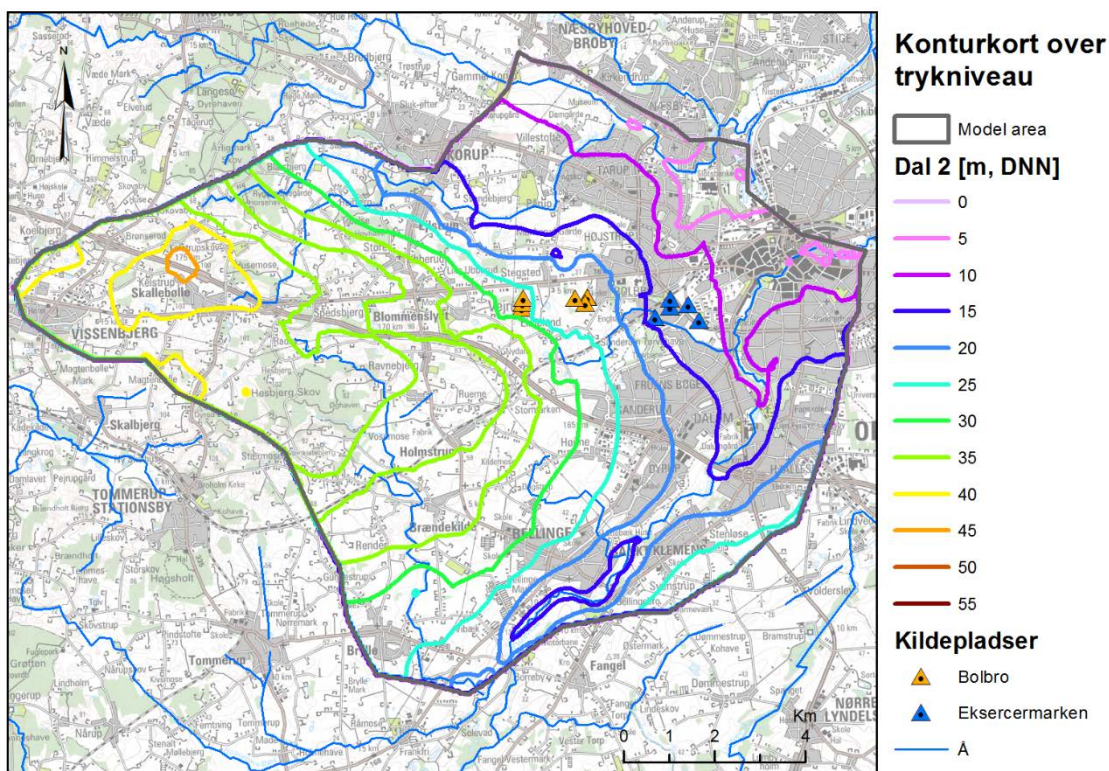
Figur 4.12 Konturkort over trykniveau i øverste beregningslag (top lag, HM1.1 i Sandersen og Kallesøe, 2017)

Trykniveauerne er udtrykt i kote over havniveau, Dansk normal nul (DNN). Bemærk at konturkurver for trykniveauet i toplaget er inddelt i 10 m intervaller, mens konturkurver for trykniveaufordelingen i Ks2 og Dal 2 (svarende til HM5 og HM6.2 i Sandersen og Kallesøe, 2017), figur 4.13 og 4.14, er inddelt i 5 m intervaller.

Konturkortet for Ks2 og Dal 2 er meget ens, hvilket også er forventeligt, da disse to magasiner i flere områder står i direkte kontakt. På konturkortet for Dal 2 ses afgrænsningen af dalen imidlertid udtrykt i konturlinjerne vest for Bolbro kildeplads.



Figur 4.13 Konturkort over trykniveau i Ks2 (svarende til HM5 i Sandersen og Kallesøe 2017)

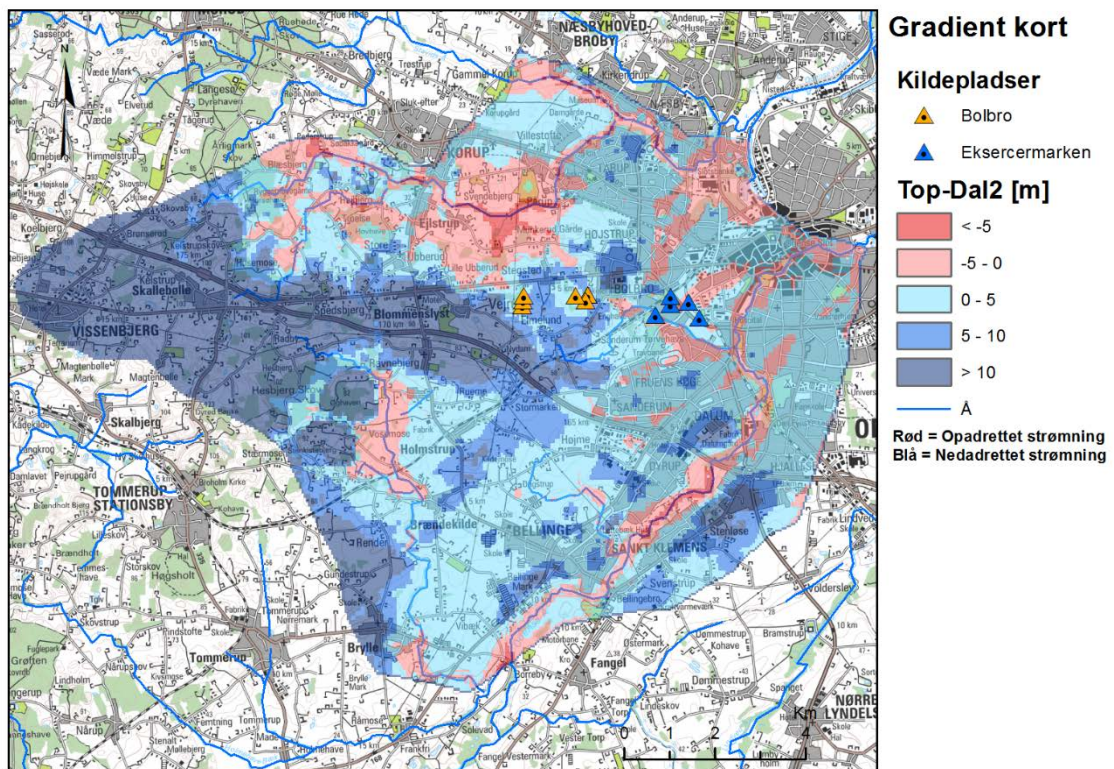


Figur 4.14 Konturkort over trykniveau i begravet dal 2 (Dal 2, svarende til HM6.2 i Sandersen og Kallesøe, 2017)

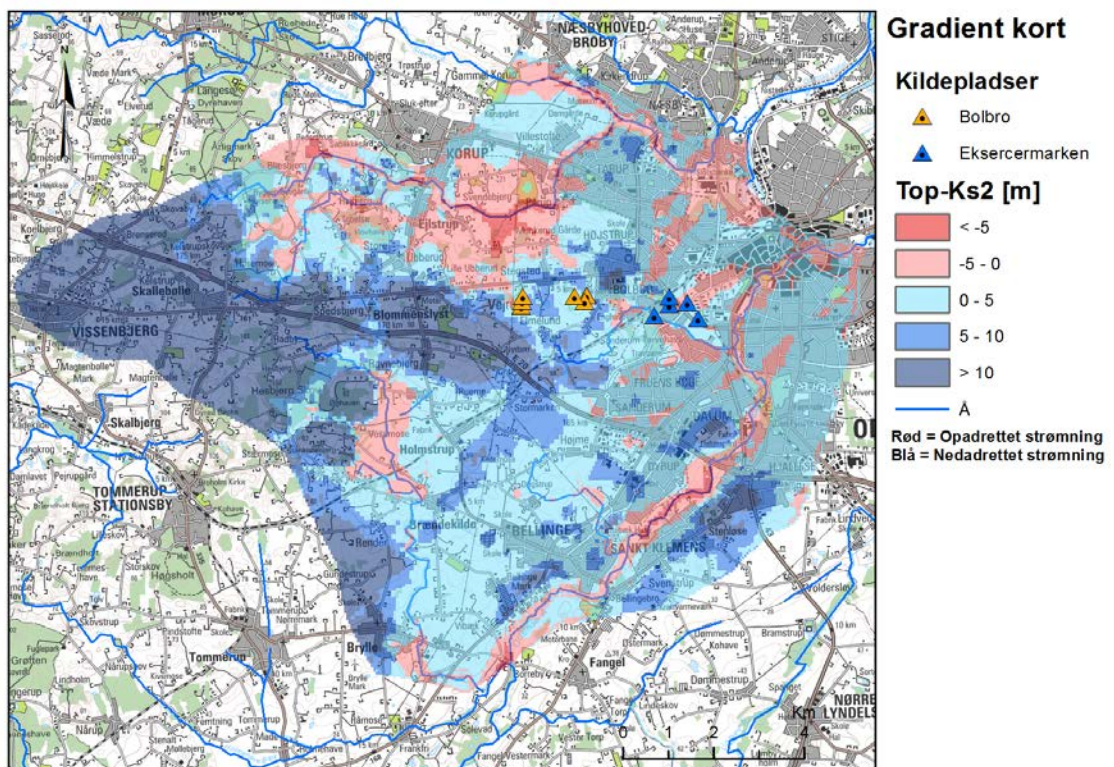
4.3.2 Gradient-forhold

Gradientkortene, figur 4.15 og 4.16, viser generelt, hvor i området der er opadrettet strømning (markeret med røde farver), og hvor der er nedadrettet strømning (markeret med blålige farver). Grundet den gode kontakt mellem Ks2 og Dal2 er gradientkortene mellem det øvre grundvandsspejl i top laget og disse grundvandsmagasiner meget ens.

Opadrettet strømning ses forventeligt i udstrømningsområder. Således er der opadrettet strømning ved mange vandløbsstrækninger og lavtliggende områder, samt i området tæt ved Odense Havn, som er indlagt med en kote 0 randbetingelse. Gradientkortene antyder også, at sænkningen af trykniveauet omkring Eksercermarken kildeplads kan have medført nedadrettet strømning. Sammenlignes med gradientkortene for 1970'erne, hhv. med og uden indvinding (se figur 4.11), ses det tydeligt, at uden indvinding ville området ved Eksercermarkens indvindinger have haft opadrettet gradient.



Figur 4.15 Gradient mellem toplag og laget Dal2.



Figur 4.16 Gradient mellem toplag og laget Ks2.

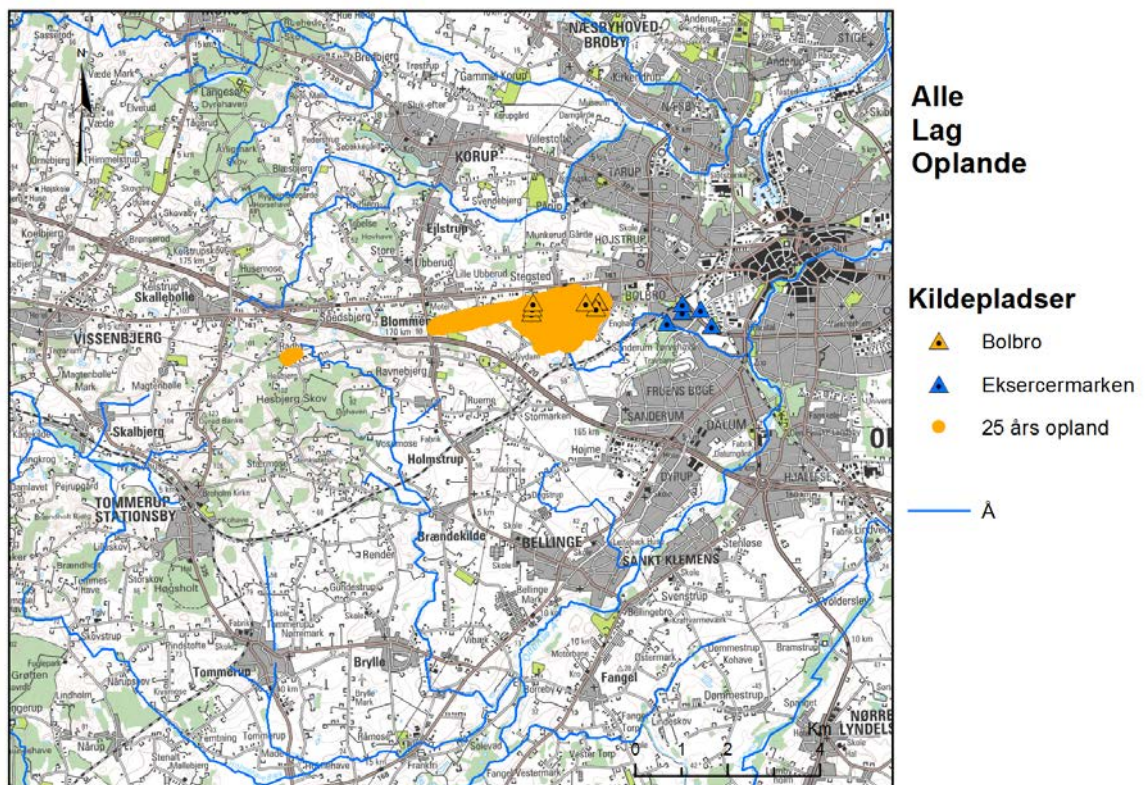
4.3.3 Indvindingsoplande og aldersfordeling

På figur 4.17 og 4.18 ses hhv. 25 års og 300 års indvindingsoplandene til Bolbro Kildeplads. 25 års oplandet ligger forholdsvis tæt på indvindingsboringerne, og strækker sig i en kile på nogle få kilometer mod vest. 300 års indvindingsoplandet er betydeligt større, og strækker sig i en relativ tynd polygon i vestlig retning, ca. 10 km opstrøms for kildepladsen ud mod Vissenbjerg. Mindre huller i indvindingsoplandet skyldes små private indvindinger i oplandet (f.eks. private vandværker, gartnerier, etc.).

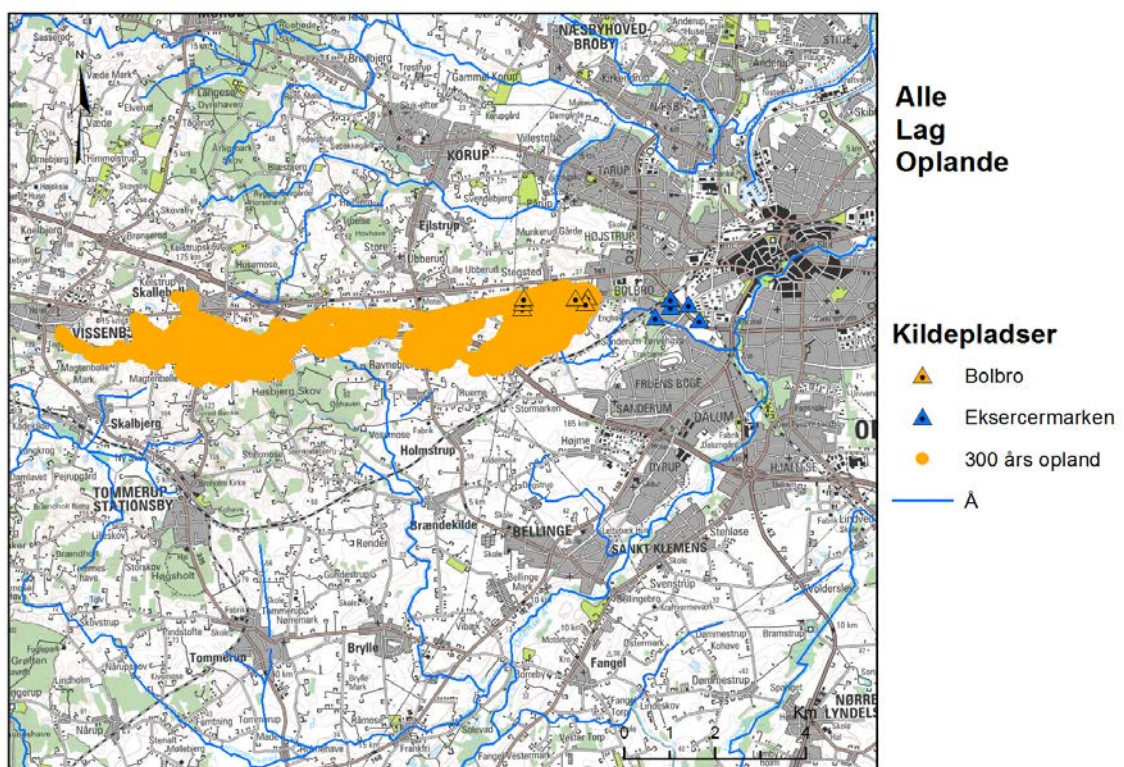
På figur 4.19 og 4.20 ses indvindingsoplandene for Eksercermarken Kildeplads. 25 års indvindingsoplandet udbreder sig 5 – 6 km mod vest, samtidig med at der observeres en udbredelse mod syd-vest af nogle få kilometers afstand. 300 års indvindingsoplandet udbreder sig mod vest, men i en tykkere kile end for Bolbro. Til gengæld når oplandet ikke så langt mod vest, som det blev fundet for Bolbro Kildeplads.

De grundvandsdannende oplande for de to kildepladser er vist på figur 4.21 og 4.22. De to oplande omkranser i store træk det samme område som 300 års indvindingsoplandene, men er mere inhomogene, hvilket skyldes, at der i nogle områder er opadrettet gradient eller at de frigivne partikler havner i dræn. De grundvandsdannende oplande fremstår derfor mere "hullede" end indvindingsoplandene.

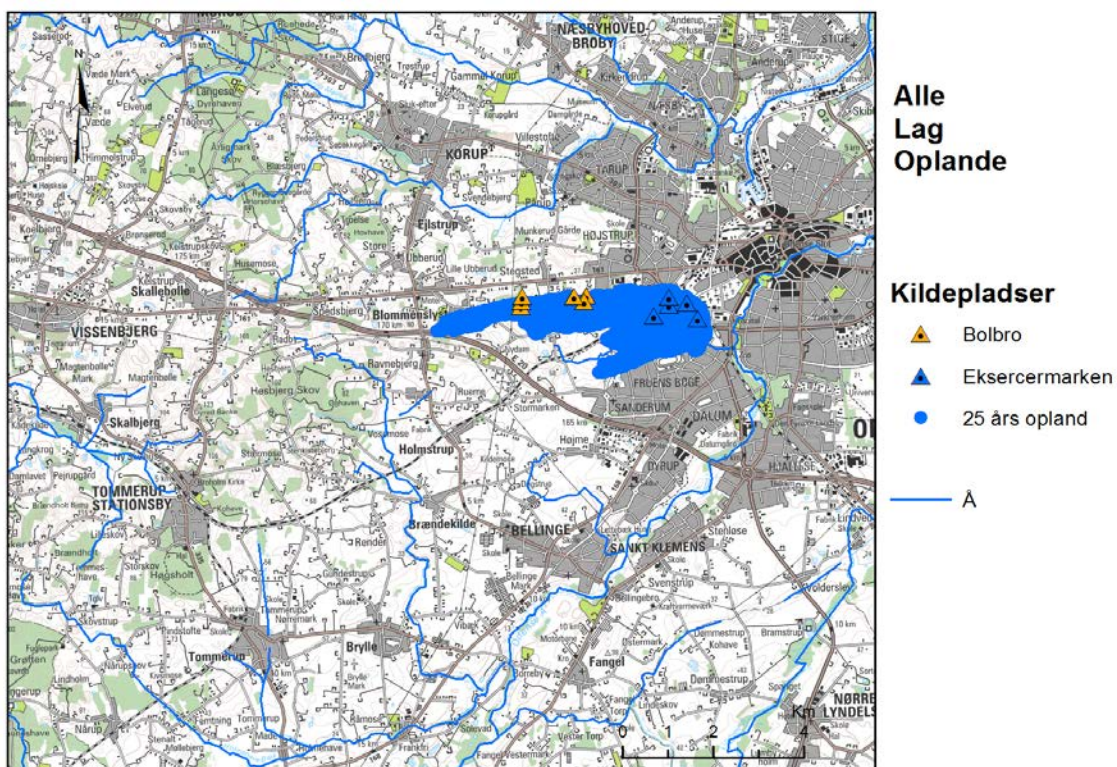
I appendix A kan udviklingen i de grundvandsdannende oplande som funktion af tiden findes.



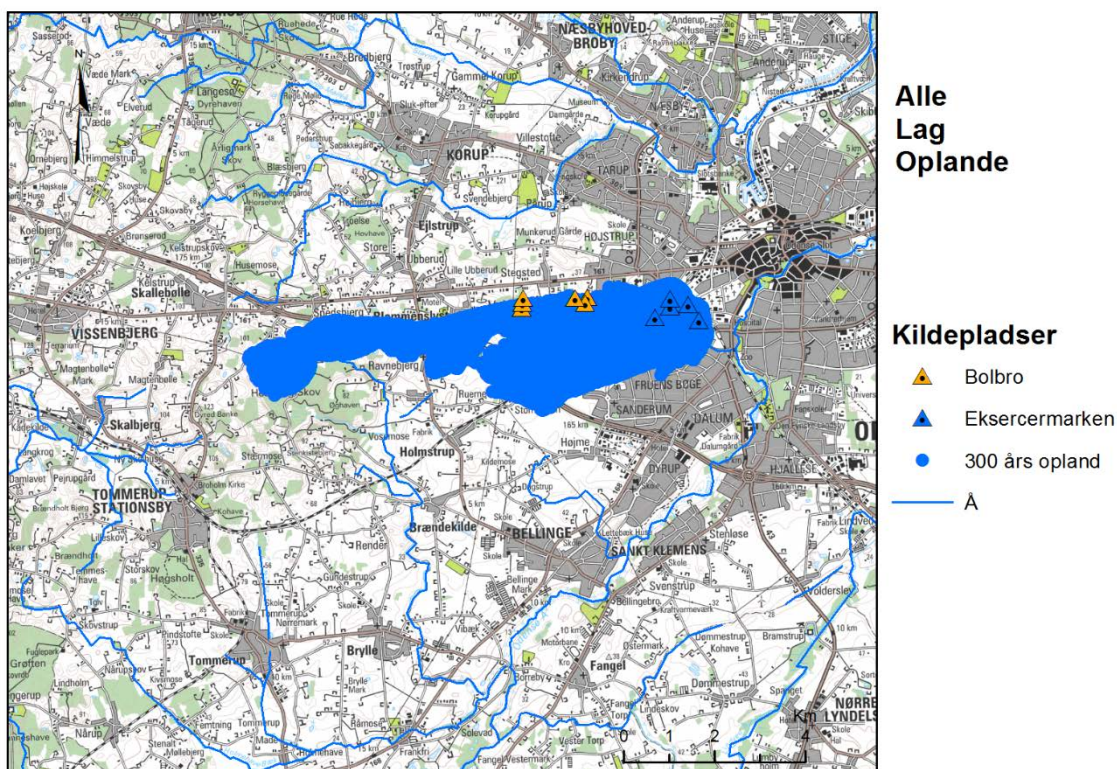
Figur 4.17 Indvindingsopland (25 år) for Bolbro Kildeplads



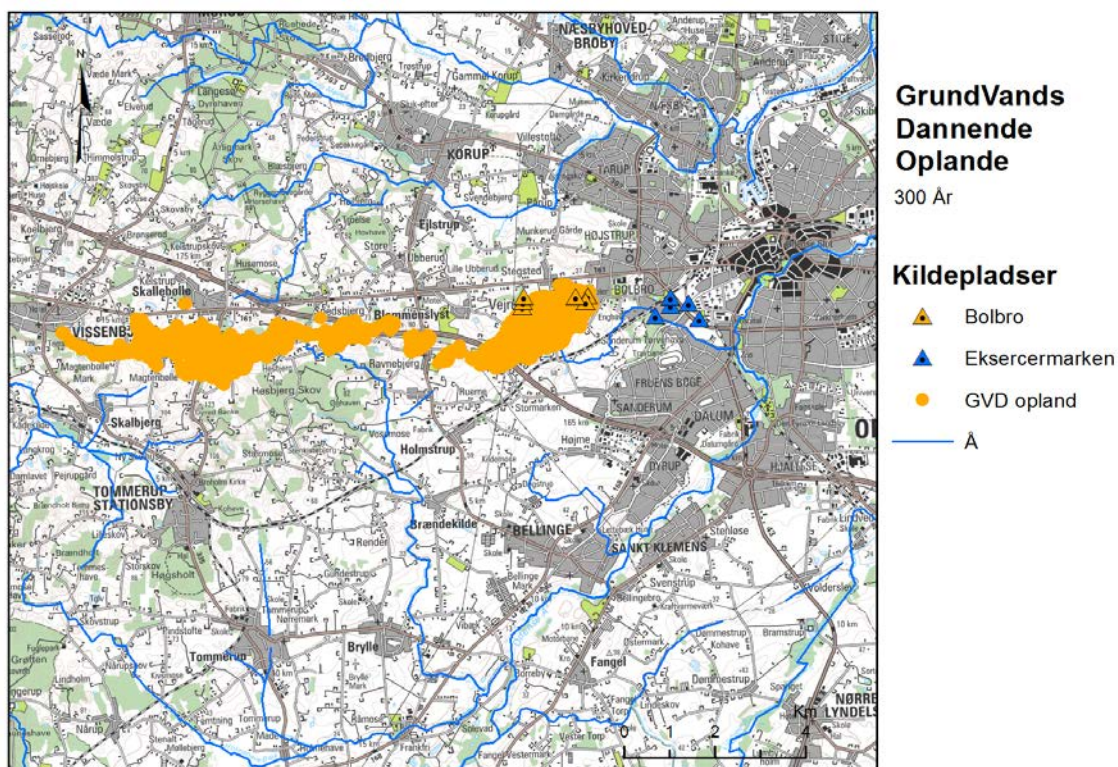
Figur 4.18 Indvindingsopland (300 år) for Bolbro Kildeplads



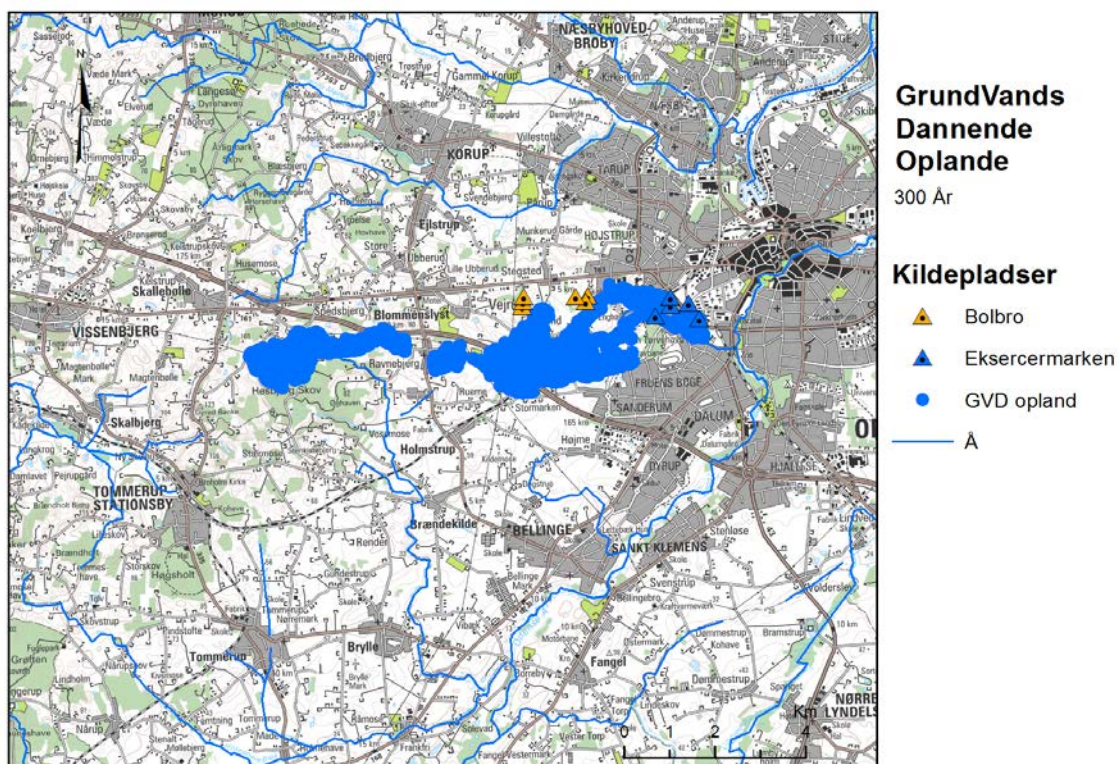
Figur 4.19 Indvindingsopland (25 år) for Eksercermarken Kildeplads



Figur 4.20 Indvindingsopland (300 år) for Eksercermarken Kildeplads



Figur 4.21 Grundvandsdannende opland til Bolbro Kildeplads (300 år)



Figur 4.22 Grundvandsdannende opland til Eksercermarken Kildeplads (300 år)

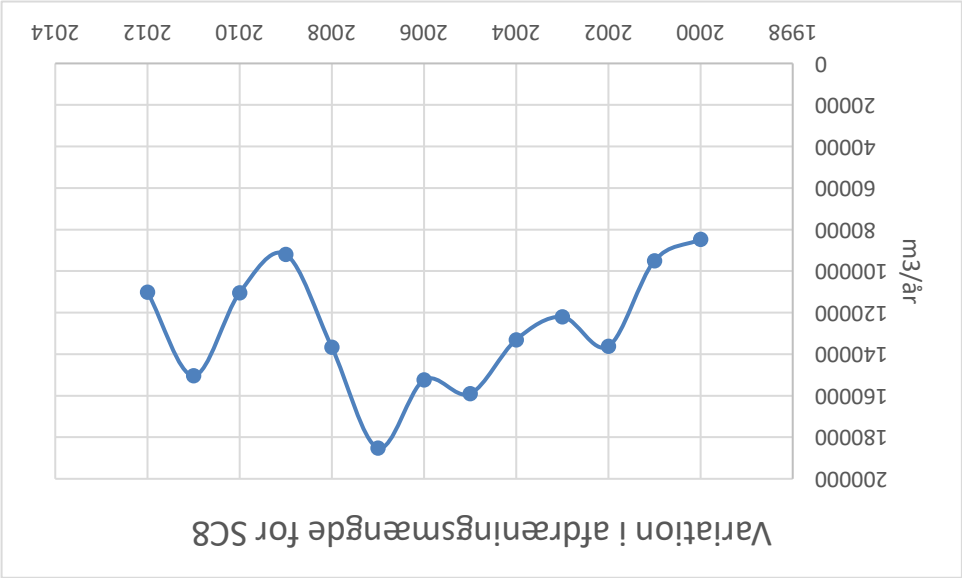
4.4 Vandforvaltningsscenarier

I tabel 4.1 ses modellens estimat af, hvor meget vand der vil blive drænet væk via Bandedanmark dræne i de opstillede scenarier (hvor scenarium 1 repræsenterer den gældende indvindingsstilladelse). Den estimerede drænmængde varierer mellem 79000 m³/år og 217000 m³/år, og afhænger af indvindingen ved kildepladserne. Der er en specielt god sammenhæng med indvindingen på Eksercermarken Kildeplads, som ligger tættest på den drænedde strækning. Det skal bemærkes, at modellen ikke er kalibreret til at kunne forudsige drænastrømning på den aktuelle strækning, og der er derfor relativ stor usikkerhed på de absolutte afdræningsestimater. Til gengæld forventes den relative effekt af indvindingen på drænmængderne at være pålidelige.

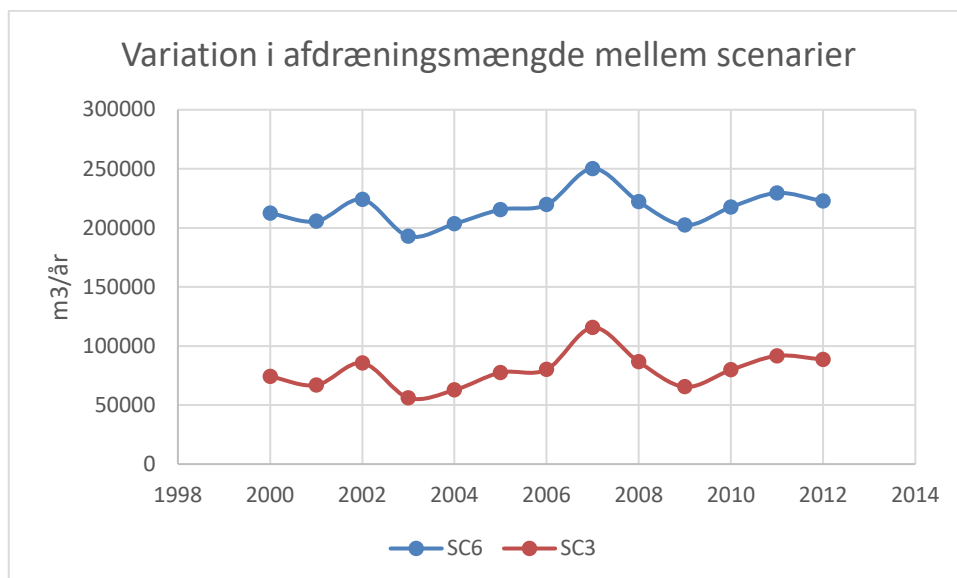
Tabel 4.1 Afdrænede vandmængder ved linjefrænet ifm. togunderføring (middel 2000-2012)

Scena- rie	Eksercermarken [mio. m³/år]	Bolbro [mio. m³/år]	Samlet [mio. m³/år]	Drænet v. tog [m³/år]
SC1	1.2	1.8	3	153227
SC2	2	1.8	3.8	112766
SC3	3	1.8	4.8	79264
SC4	1.2	3	4.2	126840
SC5	2	3	5	86669
SC6	0	1.8	1.8	216716
SC7	0.6	1.8	2.4	183477
SC8			2.4 (2015 tal)	128218

På figur 4.23 ses variationen i årlig afdræningsmængde i perioden 2000 til 2012 for scenarium 8, dvs. aktuel indvinding. Der observeres en betydelig variation fra år til (en faktor 2), som afhænger af klima og grundvandsindvinding. I figur 4.24 ses tilsvarende resultater for scenarium 3 (stor indvinding) og scenarium 6 (lille indvinding). Estimaterne for årlig middel dræning angivet i tabel 4.1 dækker med andre ord over betydelige år-til-år variationer.



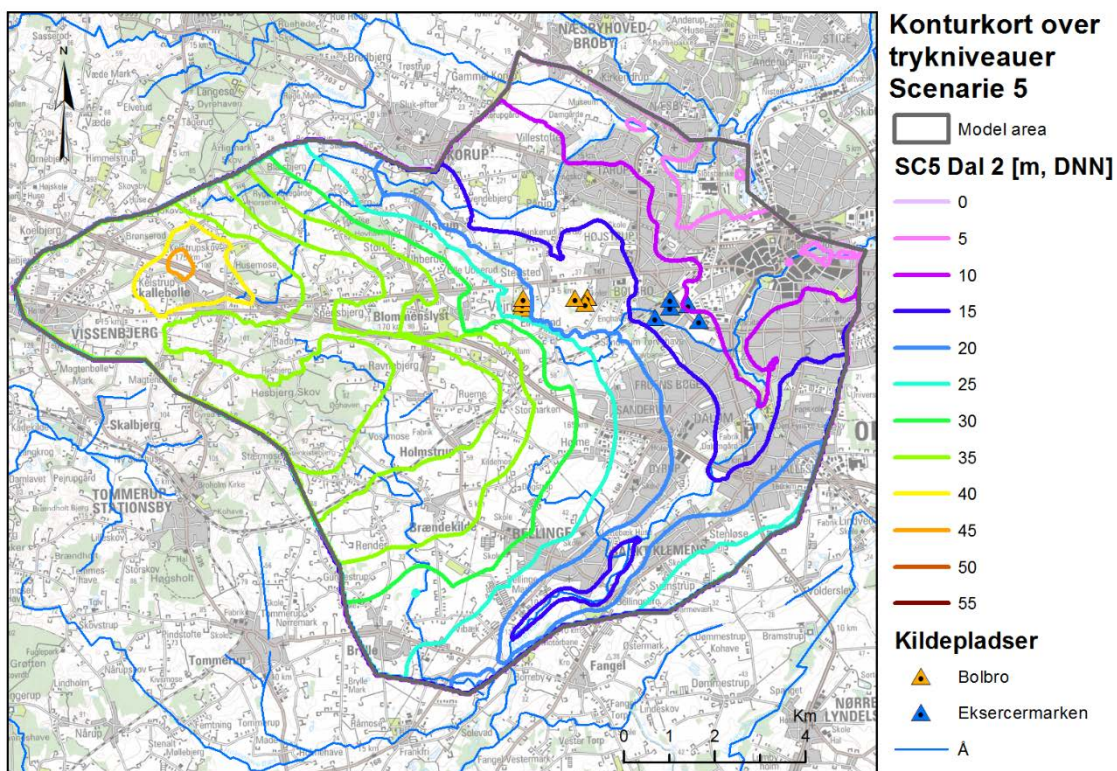
Figur 4.23 Scenarie 8 repræsenterer den aktuelle vandindvinding (2000-2012) og figuren viser hvordan den afdrænede vandmængde ved togunderføringen varierer fra år til år.



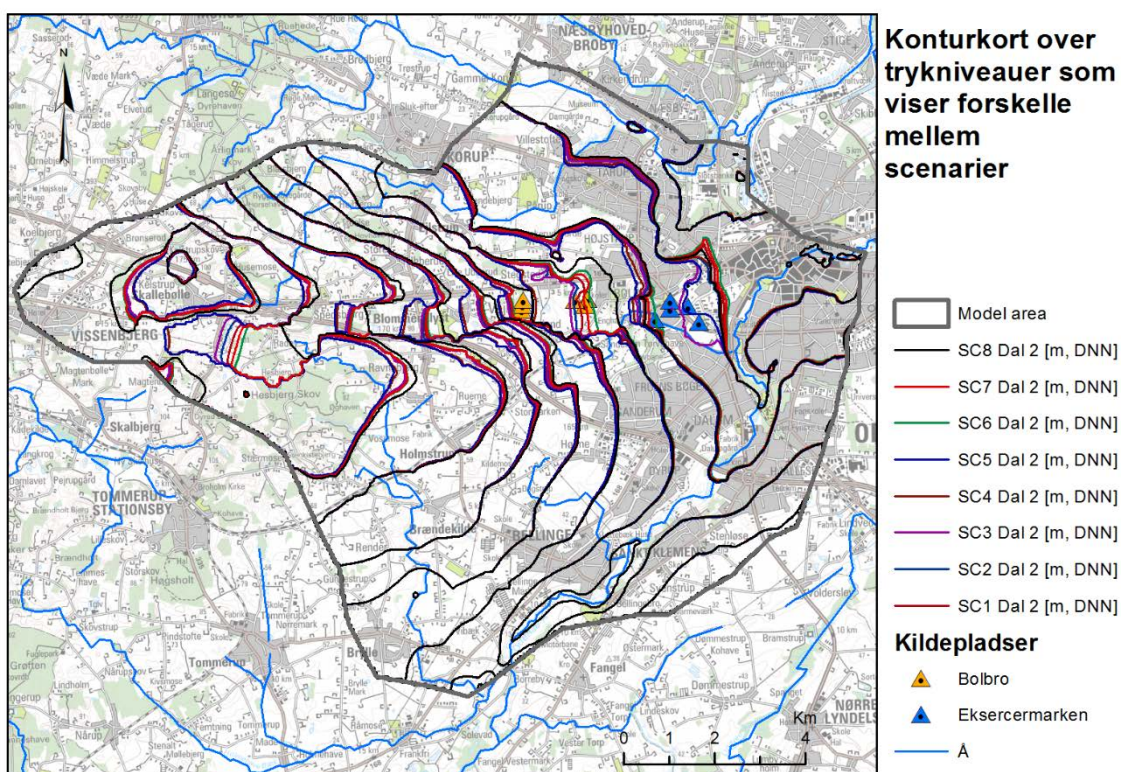
Figur 4.24 Scenarie 3 og 6 repræsenterer scenarier med hhv. stor og lille indvinding, hvilket resulterer i en stor afdrænet vandmængde, for SC6 med en lille samlet indvindingsmængde, og en relativ lille afdrænet vandmængde for SC3, hvor indvindingen er relativ stor.

I figur 4.25 ses trykniveaufordelingen for laget Dal 2 for scenarium 5, som er karakteriseret ved en relativ stor indvinding ved både Bolbro (3 mio. m³/år) og Eksercermarken (2 mio. m³/år) kildepladser. Den kraftige indvinding ses at generere en sænkingsstruktur vest for Bolbro Kildeplads, der resulterer i indstrømning til den begravede dal, som efterfølgende strømmer frem mod kildepladserne.

På figur 4.26 ses trykniveaufordelingen for alle 8 scenarier. Specielt i den vestlige del af den begravede dal observeres der relativt store forskelle på scenarierne. De kraftige indvindings-scenarier (nr. 4 og 5) resulterer i konturkurver, som udbreder sig længere mod vest, end mere moderate indvindings-scenarier. Den mindste udbredelse findes i scenarium 8, som repræsenterer den aktuelle historiske indvinding, hvor Bolbro Kildeplads først begyndte at indvinde vand i 2007. Der ses også betydelige forskelle mellem trykniveaufordelingen ved Eksercermarken Kildeplads for scenarium 3, hvor der indvindes 3 mio. m³, og for scenarium 2 og 5, hvor der indvindes 2 mio. m³.



Figur 4.25 Trykniveaukort for vandforvaltningsscenarie (SC5) med største indvinding i Dal2



Figur 4.26 Trykniveaukortet viser de forskellige konturlinjer for hver scenarie for Dal2. Værdien for den enkelte konturlinje kan ses i ovenstående figur, hvor kun SC5 er vist.

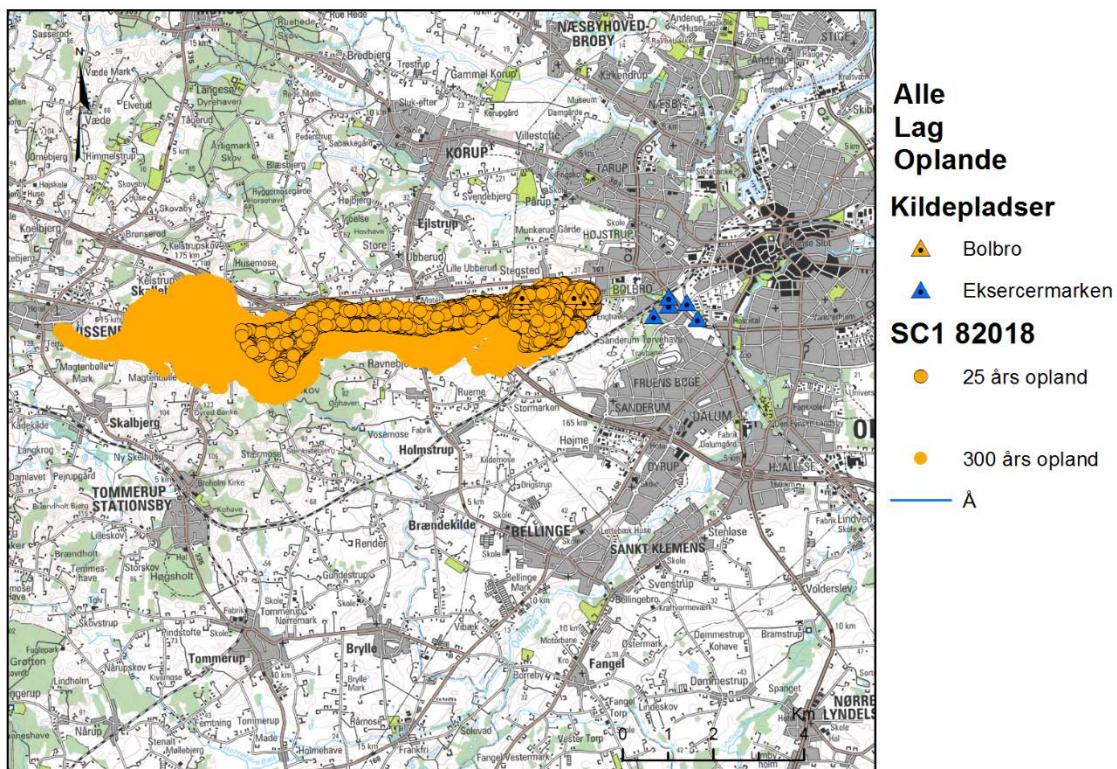
Resultater for indvindingsoplande for de to kildepladser ses nedenfor i figur 4.27 – 4.42. I alle tilfælde er 25 års oplandet vist med "cirkler" i 300 års oplandet. I forhold til de aktuelle forhold (scenarium 8) sker der en mindre udvidelse af indvindingsoplandet til Bolbro Kildeplads i de syv første scenarier. Oplandet ser imidlertid ud til at være stærkt styret af den begravede dal.

For Eksercermarken Kildeplads varierer indvindingsmængden mere markant (fra 0 til 3 mio. m³/år), hvilket afspejles i indvindingsoplandets udseende. Det mindste opland (hvor indvindingen er større end nul) findes i scenarium 7, se figur 4.40, hvor der oppumpes 0.6 mio. m³/år. Oplandet breder sig dels ud mod Holmstrup, dels følger det den begravede dal mod vest. Det største opland findes i scenarium 3, se figur 4.32, hvor det udbreder sig mod syd og i en kile mod vest (i den begravede dal).

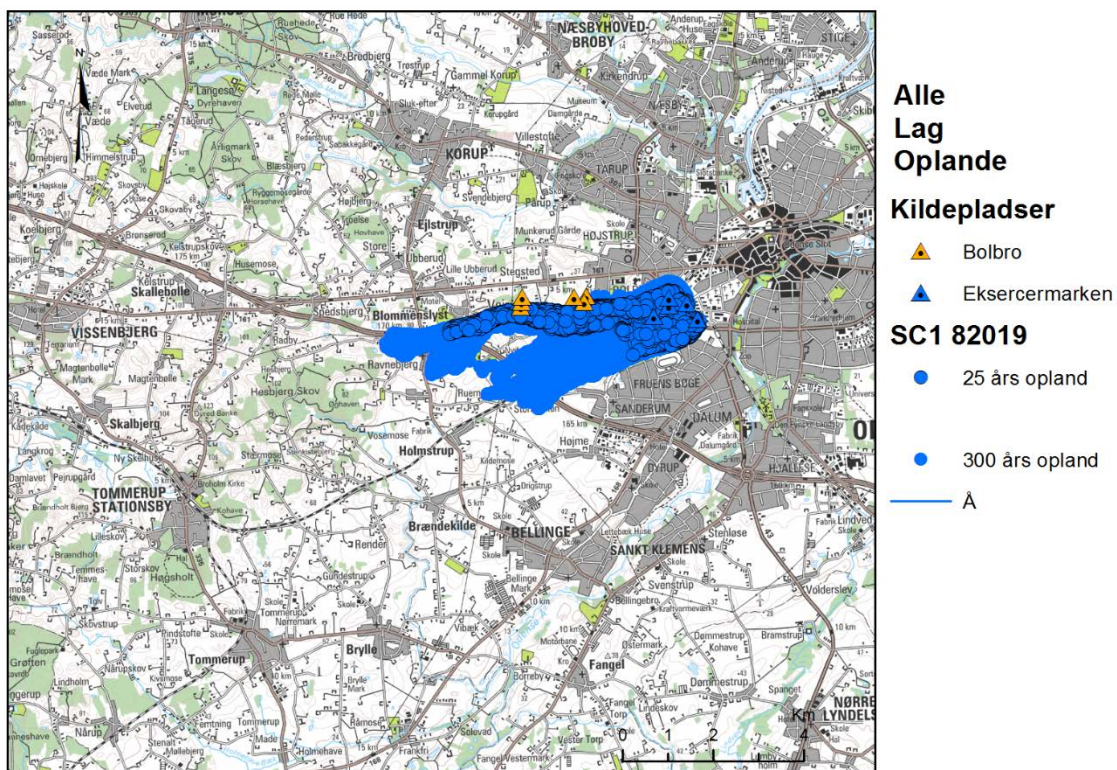
I appendix B kan histogrammer for aldersfordelingen for de to kildepladser ses for de otte scenarier. Median og middel alder for hvert scenarium er angivet i tabel 4.2. Heraf fremgår, at alderen ved Bolbro Kildeplads afhænger udelukkende af indvindingen ved denne kildeplads, og at alderen bliver mindre, når indvindingen bliver større. Alderen ved Eksercermarken Kildeplads afhænger i et komplekst forhold af indvindingen ved begge kildepladser. Den mindste alder opnås i scenarium 7 (medianværdi på 69 år), hvor indvindingen er relativ lav (hhv. 0,6 og 1,8 mio. m³ pr. år), mens den højeste alder findes i scenarium 8 (medianværdi på 111 år), hvor indvindingen er givet ved de aktuelle værdier i perioden 2000-2012 og samlet når op på en tilsvarende indvinding (2,4 mio. m³ pr. år). Resultaterne viser, at alderen ved Eksercermarken Kildeplads er stærkt afhængig af både den samlede indvinding samt fordelingen på de enkelte kildepladser og indvindingsboringer.

Tabel 4.2 Median og middel alder for Eksercermarken og Bolbro Kildepladser for scenarium 1-8.

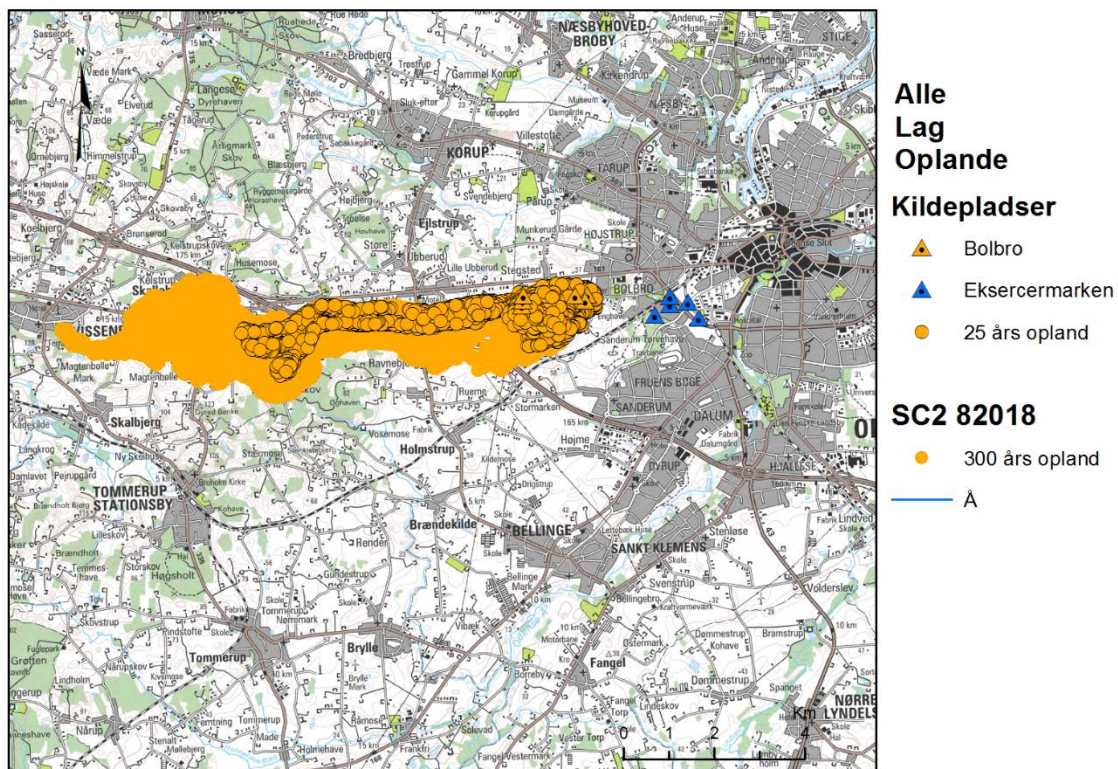
	Scenarium							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Eksercer median (år)	89	96	90	82	73	-	69	111
Eksercer middel (år)	110	116	110	107	102	-	95	124
Bolbro median (år)	78	78	78	72	72	78	78	59
Bolbro middel (år)	84	84	83	78	78	84	84	71



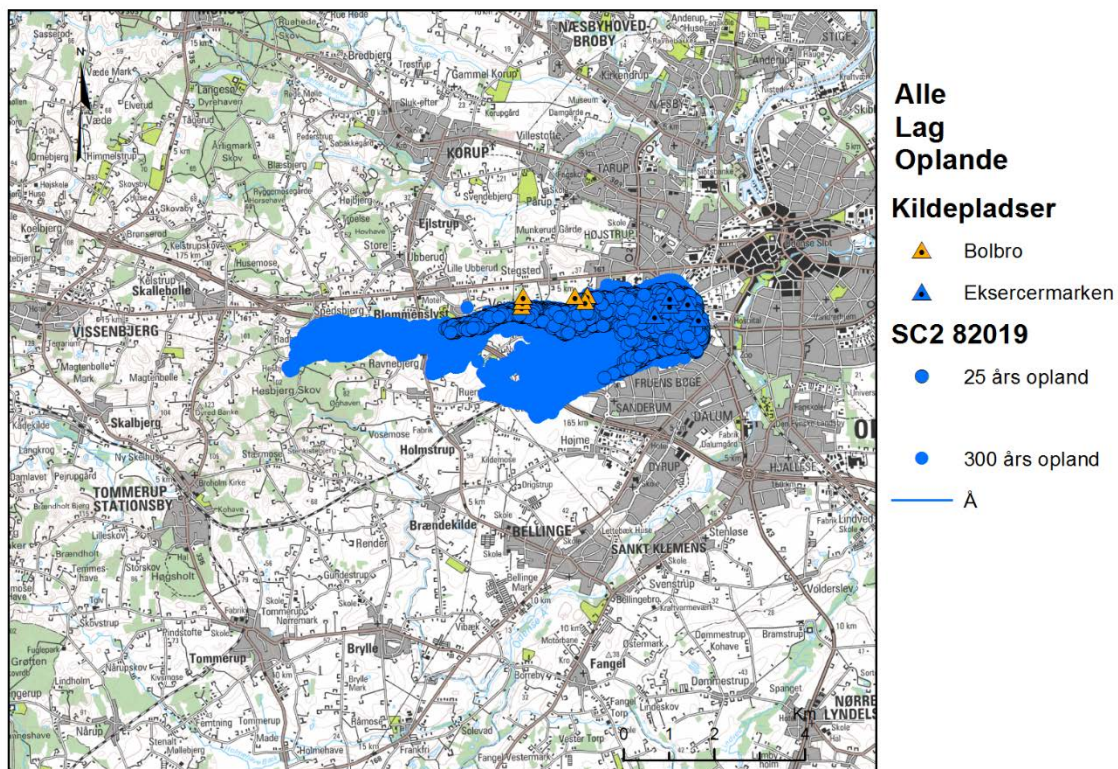
Figur 4.27 Indvindingsopland for Bolbro kildeplads, scenarium 1.



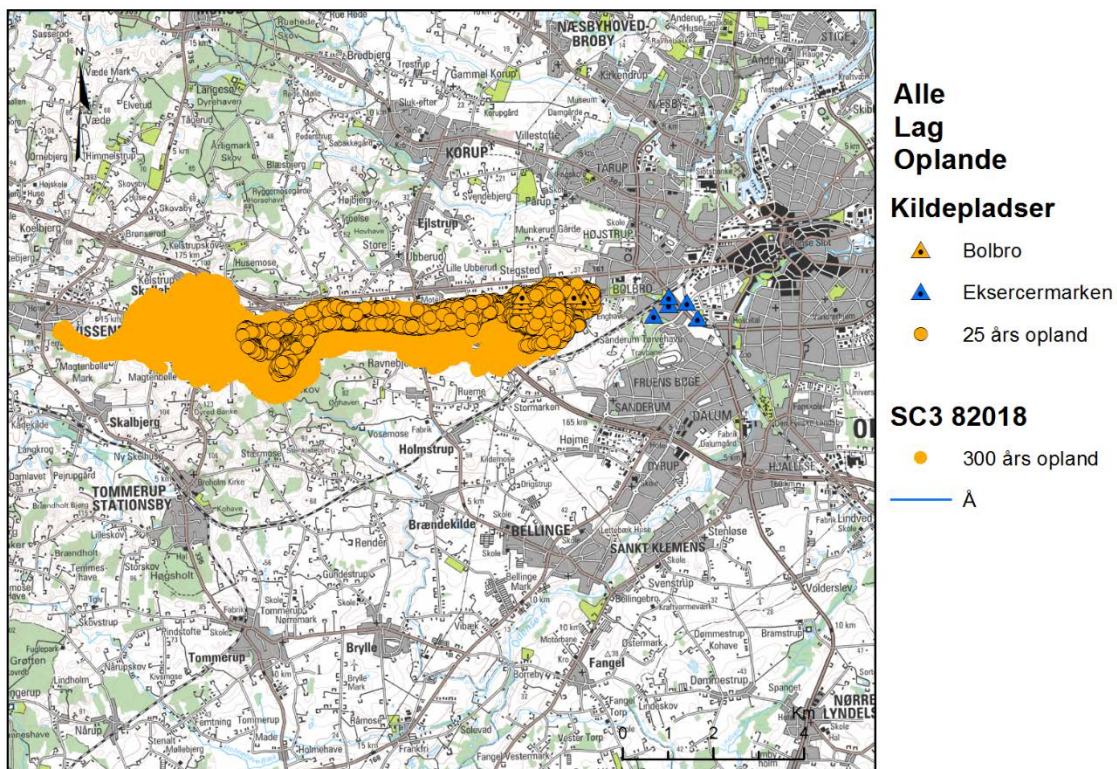
Figur 4.28 Indvindingsopland for Eksercermarken kildeplads, scenarium 1.



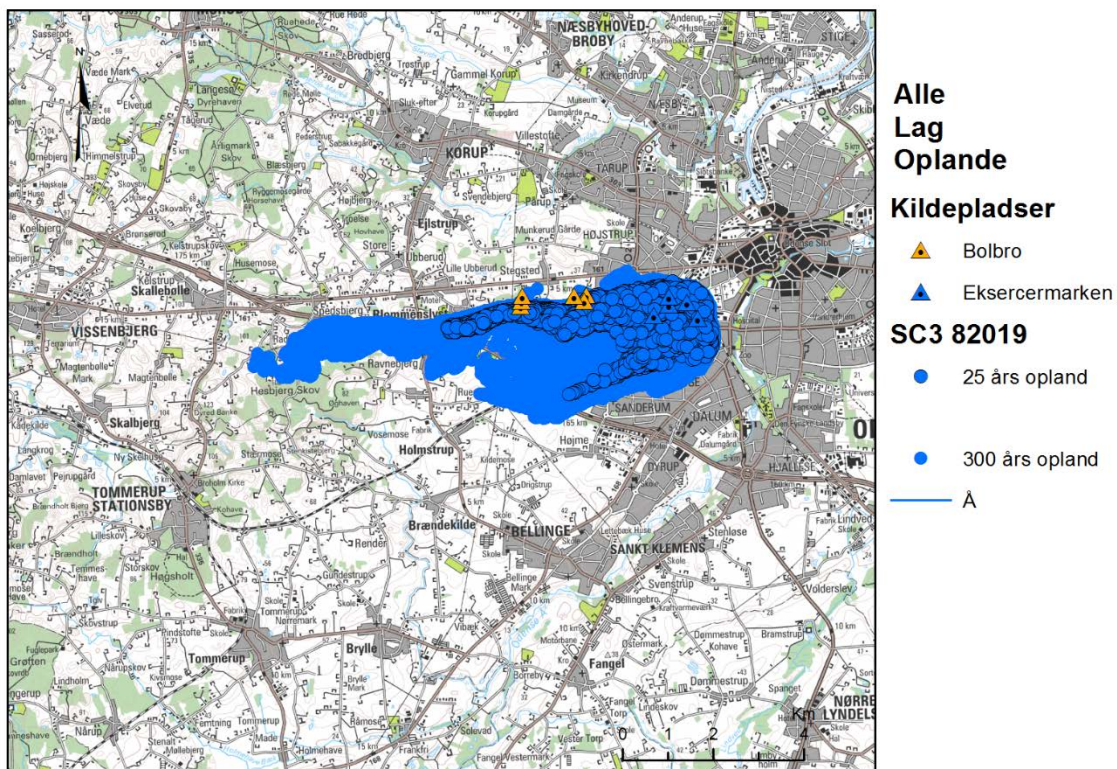
Figur 4.29 Indvindingsopland for Bolbro kildeplads, scenarium 2.



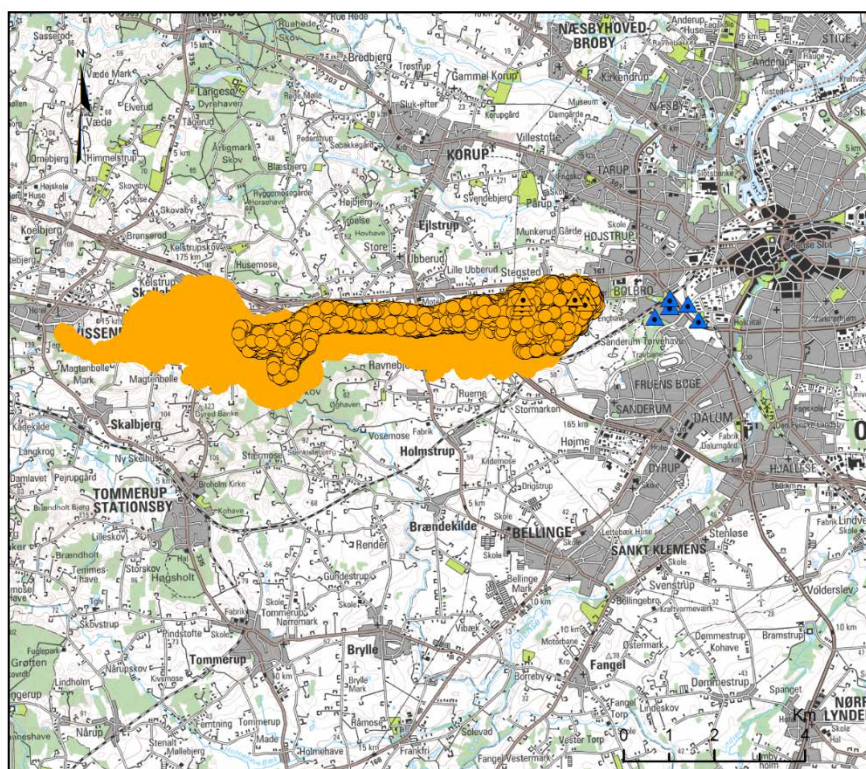
Figur 4.30 Indvindingsopland for Eksercermarken kildeplads, scenarium 2.



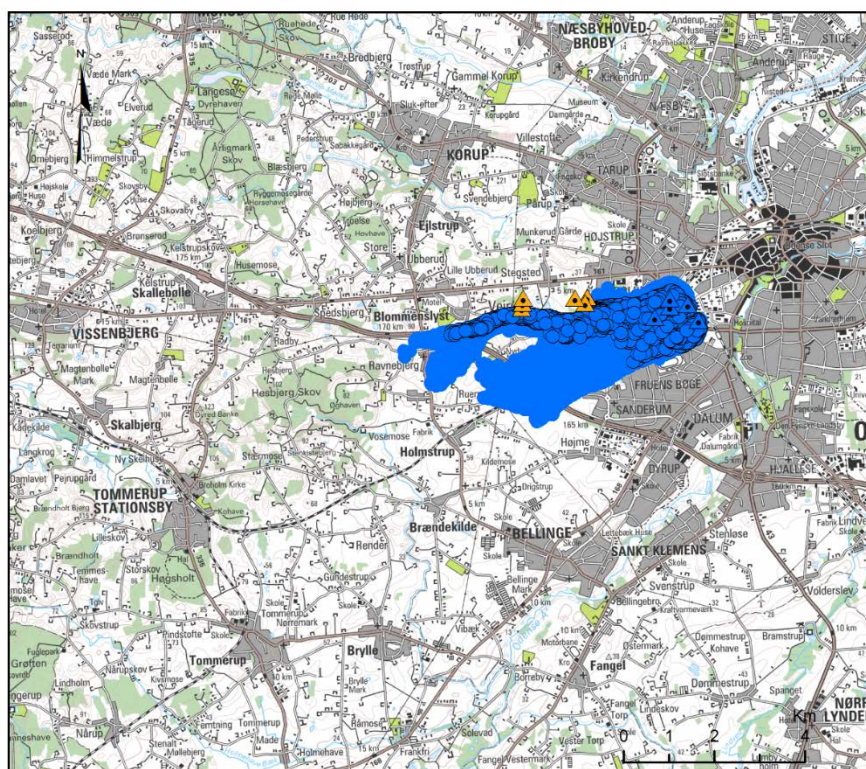
Figur 4.31 Indvindingsopland for Bolbro kildeplads, scenarium 3.



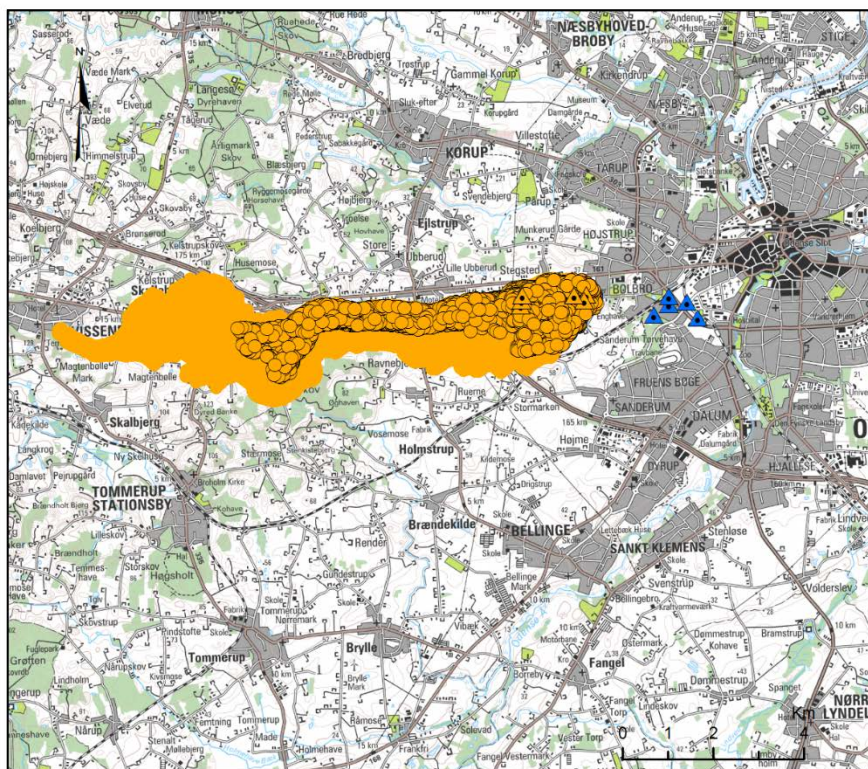
Figur 4.32 Indvindingsopland for Eksercermarken kildeplads, scenarium 3.



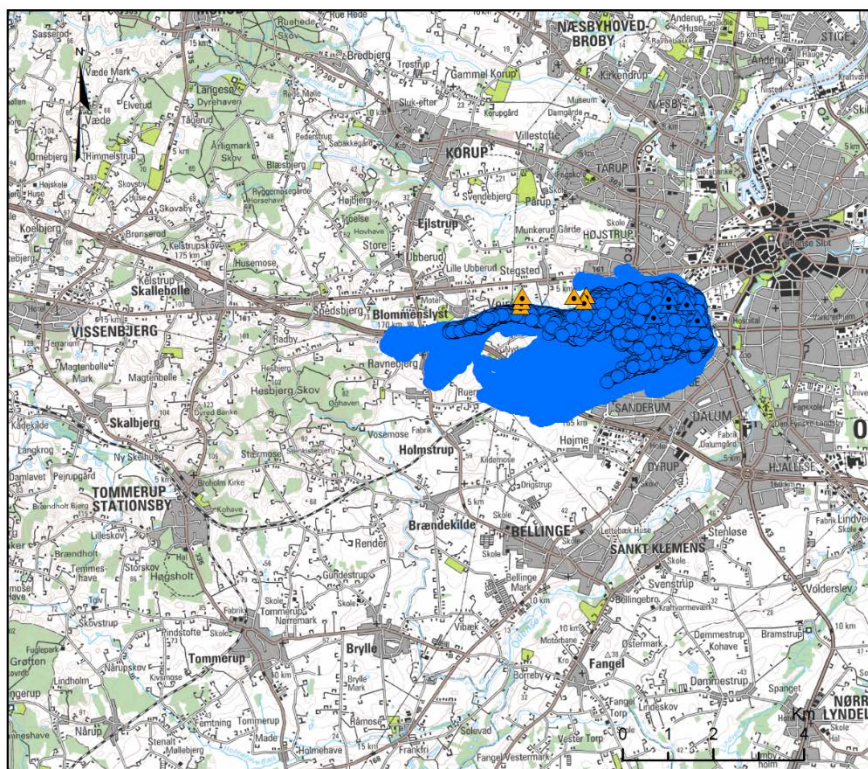
Figur 4.33 Indvindingsopland for Bolbro kildeplads, scenarium 4.



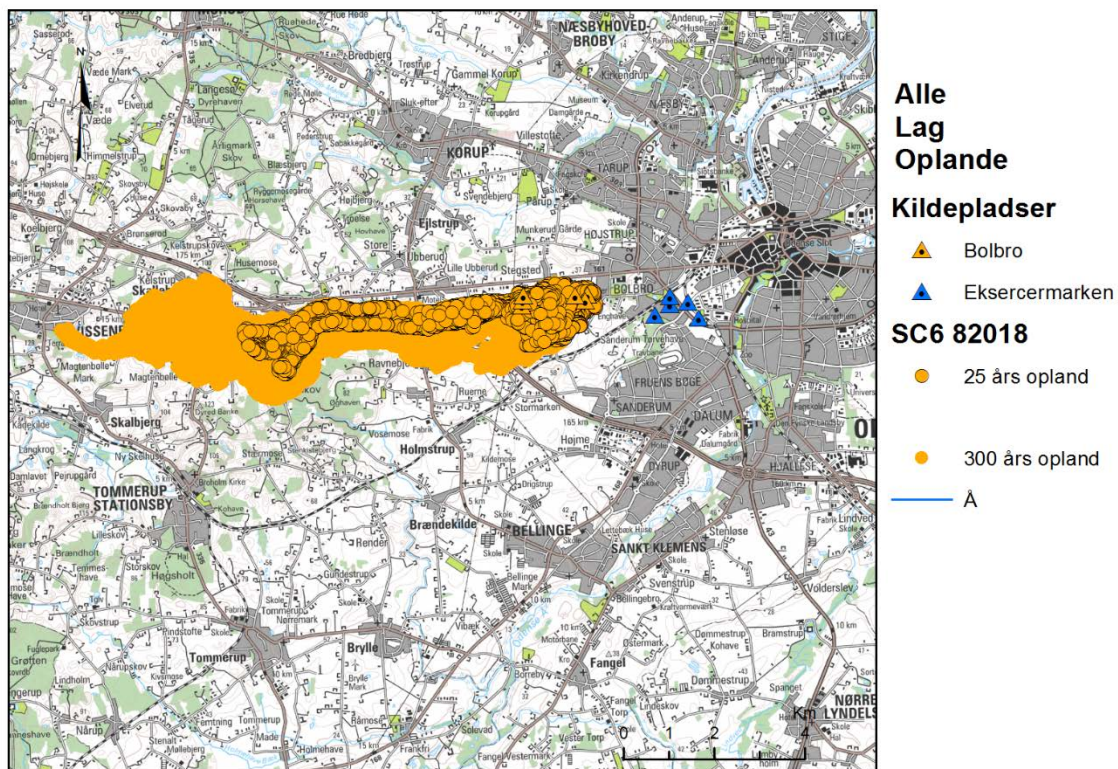
Figur 4.34 Indvindingsopland for Eksercermarken kildeplads, scenarium 4.



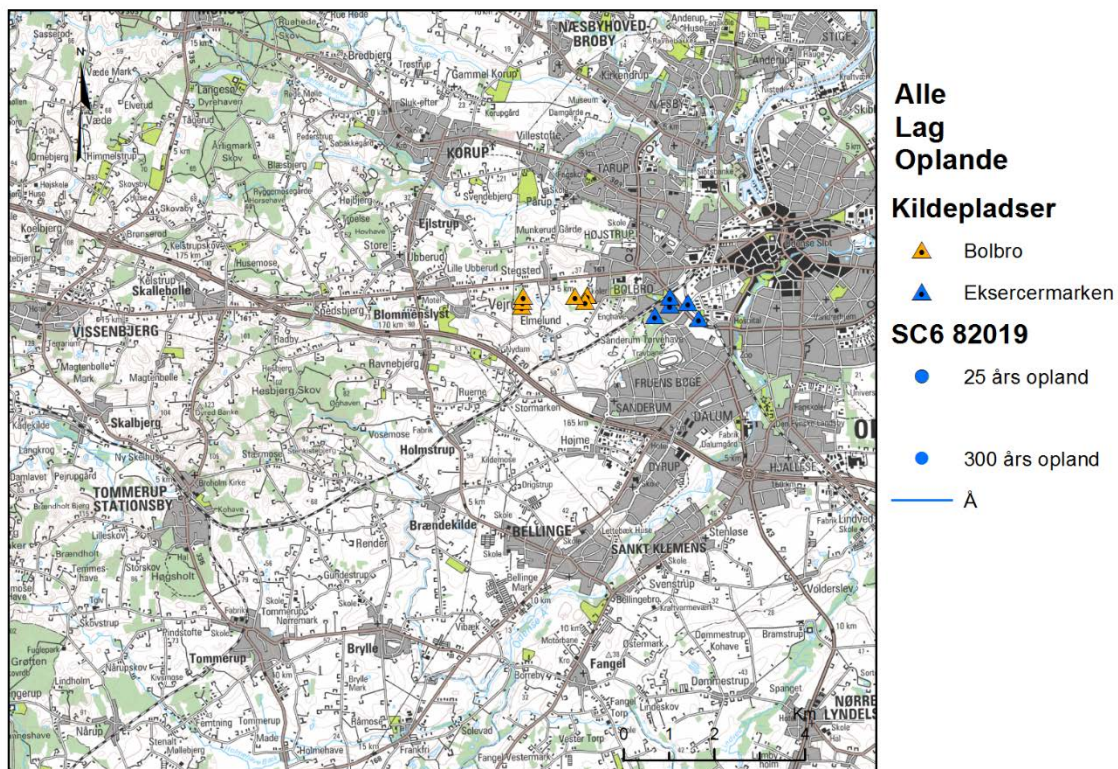
Figur 4.35 Indvindingsopland for Bolbro kildeplads, scenarium 5.



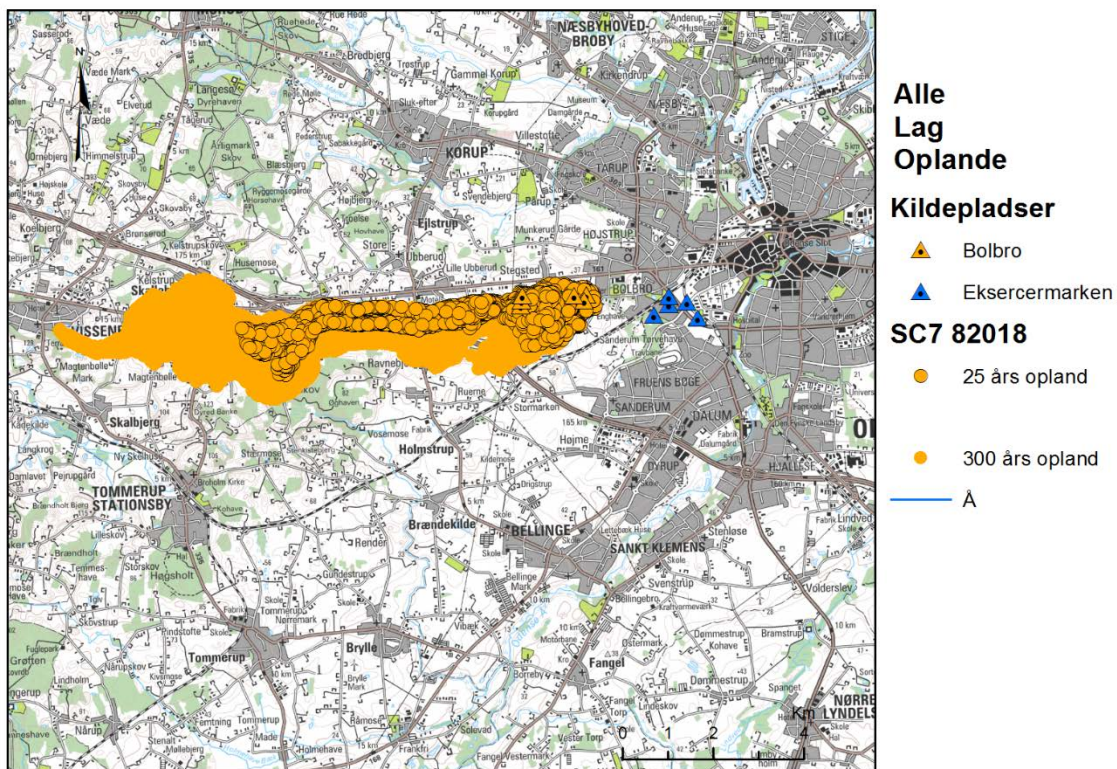
Figur 4.36 Indvindingsopland for Eksercermarken kildeplads, scenarium 5.



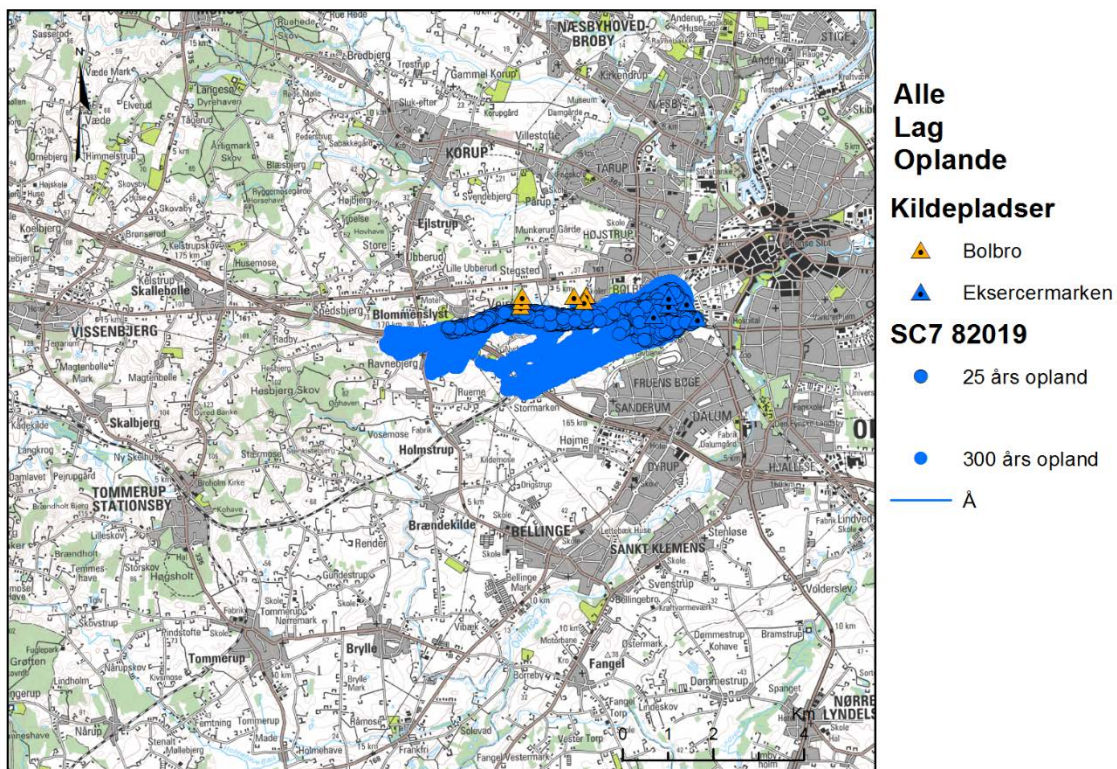
Figur 4.37 Indvindingsopland for Bolbro kildeplads, scenarium 6.



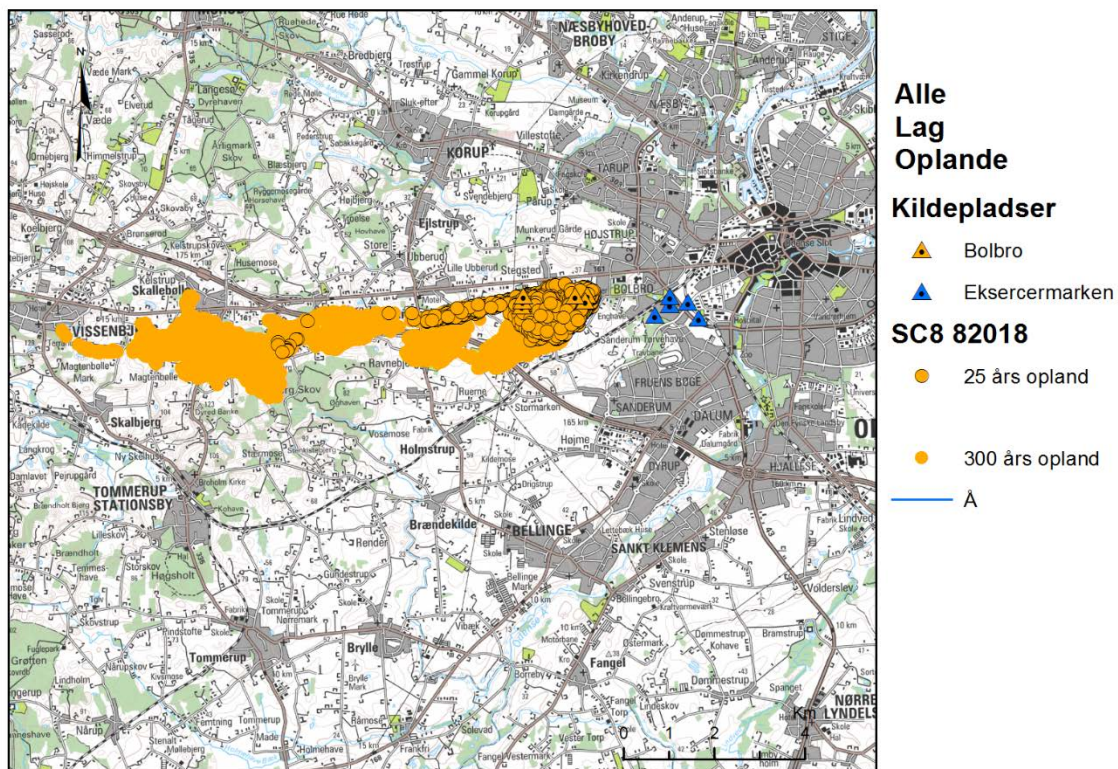
Figur 4.38 Indvindingsopland for Eksercermarken kildeplads, scenarium 6.



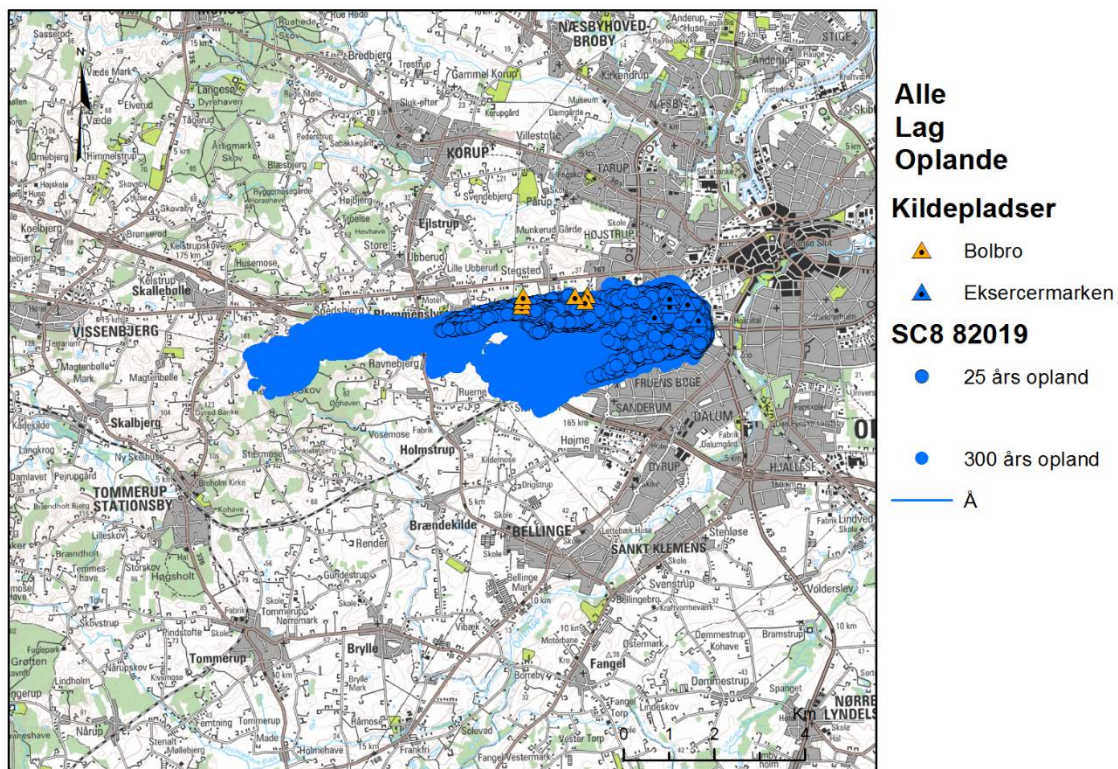
Figur 4.39 Indvindingsopland for Bolbro kildeplads, scenarium 7.



Figur 4.40 Indvindingsopland for Eksercermarken kildeplads, scenarium 7.



Figur 4.41 Indvindingsopland for Bolbro kildeplads, scenarium 8.



Figur 4.42 Indvindingsopland for Eksercermarken kildeplads, scenarium 8.

5. Konklusion

Der er i projektet opsat og kalibreret en ikke-stationær integreret hydrologisk model med fokus på grundvand. I kalibreringsprocessen har der været fokuseret på at kunne reproducere de tidlige variationer i trykniveauet i perioden 2000-2012. Modellen er efterfølgende blevet valideret i to split-sample tests. I det første tilfælde er modellen blevet testet mod observationer af hydraulisk trykniveau fra Eksercermarken kildeplads i perioden efter 1930. Dette forudsatte en større indsats med at digitalisere daglige data for klimatiske variable (nedbør og temperatur), samt at rekonstruere den historiske indvinding i modelområdet. Disse data er efterfølgende blevet indbygget i den hydrologiske model, som er blevet valideret mod kraftige sænkingsforløb, som er observeret specielt i 1960-erne og 1970-erne som følge af store indvindinger på Eksercermarken kildeplads. Den anden test udgøres af en periode med pumpestop, hvor der observeres nogle stejle stigninger i trykniveauet, når op-pumpningen ved en eller flere boringer stoppes.

Modellen klarer den historiske test relativt godt, hvor sænkingsforløbet op gennem 1950-erne og frem til 1970-erne simuleres tilfredsstillende. I den efterfølgende periode overestimerer modellen reetableringen af trykniveauet. I samme periode sker der imidlertid store ændringer med arealanvendelsen i området omkring kildepladsen, og det kan ikke udelukkes at eksempelvis øget urbanisering med ændringer i befæstelsesgrad kan have påvirket de observerede forløb markant. I forhold til pumpestoppet reproducerer modellen det observerede respons rimeligt. Timingen er nogle gange lidt skæv og amplituden på responset er i de fleste tilfælde underestimeret.

Baseret på de to hydrauliske tests vurderes modellen at have en relativ høj troværdighed til at kvantificere effekten af ændringer i grundvandsindvinding. Dette har betydning for de gennemførte indvindingsscenarier, hvor indvindingen ved Bolbro og Eksercermarken kildepladser varieres, og der samtidig installeres et 200 m langt dræn langs banestrækningen til Svendborg.

Mht. til de estimerede mængder vand, som modellen forudsiger der skal fjernes via drænene ved Svendborgbanen, skal det bemærkes, at modellen ikke er kalibreret til kunne prædiktere effekten af et sådant tiltag. Der vil derfor være en betydelig usikkerhed på disse resultater. Til gengæld forventes det, at den relative effekt af indvinding på specielt Eksercermarken kildeplads på de afdrænedes mængder er beskrevet tilfredsstillende.

Modellen anvendes til at bestemme placeringen af indvindingsoplandene til Bolbro og Eksercermarken kildepladser, dels for den aktuelle indvindingssituation, dels for de 7 indvindingsscenarier. Indvindingsoplandet til specielt Bolbro Kildeplads viser sig at være stærkt styret af den geologiske opbygning, som i området vest for Bolbro Kildeplads er karakteriseret ved den gravede dal, Dal 2.

Det skal bemærkes, at de præsenterede resultater, specielt placeringen af indvindingsoplandene, vil være behæftet med en vis usikkerhed. Der har ikke været mulighed for at inkludere en usikkerhedsanalyse i det aktuelle projekt, men andre projekter i Danmark (He et al., 2013;

Sonnenborg et al., 2015) har peget på, at specielt den geologiske struktur er vigtig for strømningsvejene og dermed placeringen af indvindings- og grundvandsdannende oplande. Det samme ses i den aktuelle opgave, hvor de kortlagte dalstrukturer er styrende for strømningsvejene og dermed indvindingsoplandenes placering. Eventuelle fejl/usikkerheder på den geologiske model vil derfor have relativ stor betydning for sårbarhedskortlægningen.

6. Referencer

GEUS (2017), Geo-vejledning 2017/1: Hydrologisk vejledning, Miljøstyrelsen.

He, X.L., K.H. Jensen, T.O. Sonnenborg, F. Jørgensen, A-S. Høyer, and R.R. Møller (2013), Analyzing the effects of geological and parameter uncertainty on groundwater head and travel time, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 3245-3260, doi:10.5194/hess-17-3245-2013.

NIRAS (2013), Hydrologisk model for kortlægningsområdet Odense Vest, Miljøcenter Odense.

Purtschert, R. (2009), Radionoblegas dating of Odense Groundwaters, *Climate and Environmental Physics*, Physics Institute, University of Bern.

Purtschert, R. (2010), Tracer results of Odense Groundwaters, sampling campaign 2009, *Climate and Environmental Physics*, Physics Institute, University of Bern.

Purtschert, R. (2015), ^{39}Ar and ^{85}Kr dating of ground water samples from 5 wells, *Climate and Environmental Physics*, Physics Institute, University of Bern.

Sandersen, P.B.E. og A.J. Kallesøe (2017). Odense Vest – 3D geologisk/hydrostratigrafisk detailmodellering. GEUS Rapport, 2017/25.

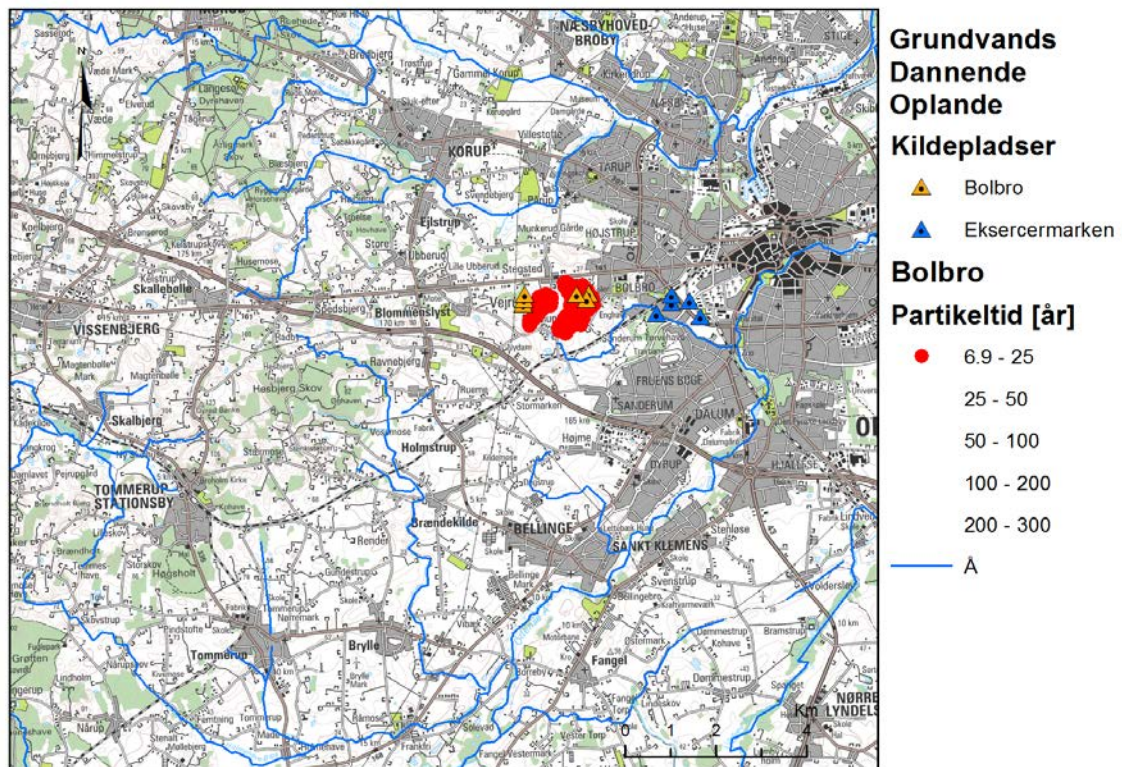
Sonnenborg, T.O., D. Seifert, and J.C. Refsgaard (2015), Climate model uncertainty versus conceptual geological uncertainty in hydrological modeling, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 3891-3901, doi:10.5194/hess-19-3891-2015.

Sonnenborg, T.O. og J. Kidmose (2012). Undersøgelse af klimabetingede grundvandsstigninger i pilotområde Kolding. Region Syddanmark og GEUS.

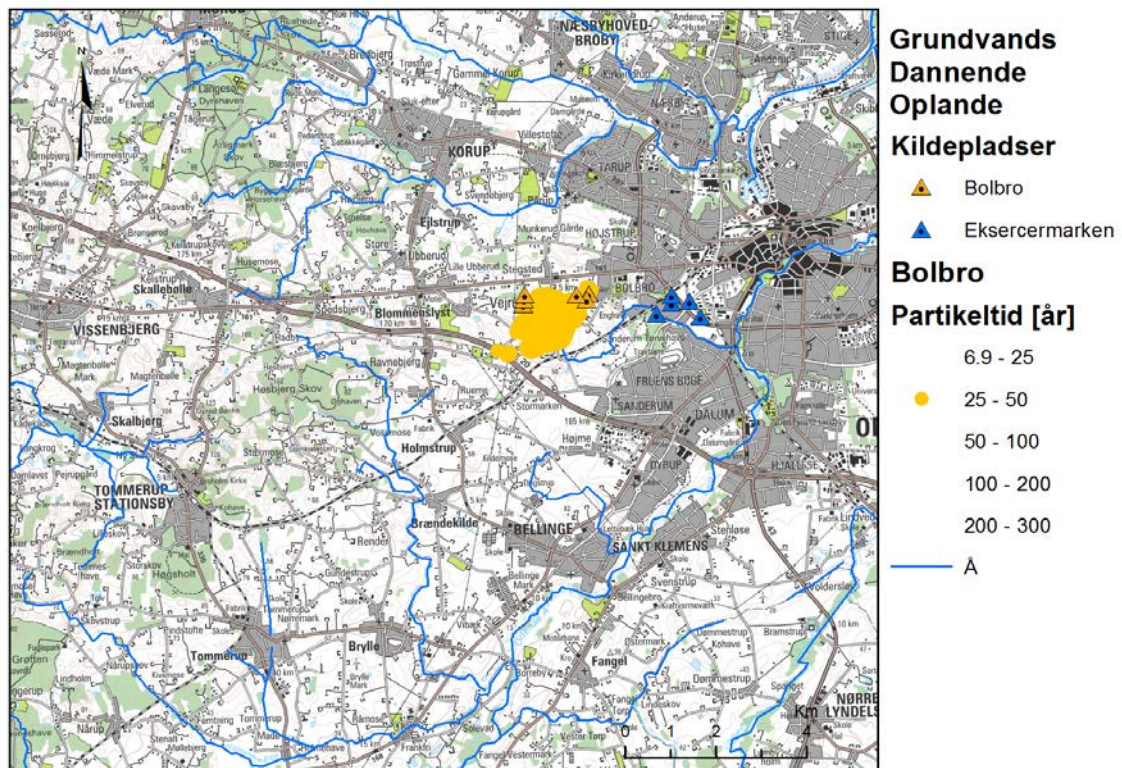
Sonnenborg, T.O. og J. Kidmose (2016). Klimabetingede grundvandsstigninger i urbant område - pilotområde Odense. Region Syddanmark og GEUS.

Stisen, S., T.O. Sonnenborg, A.L. Højberg, L. Trolborg, and J.C. Refsgaard (2011). Evaluation of Climate Input Biases and Water Balance Issues Using a Coupled Surface–Subsurface Model. *Vadoze Zone J.*, 10, 37-53. doi:10.2136/vzj2010.0001.

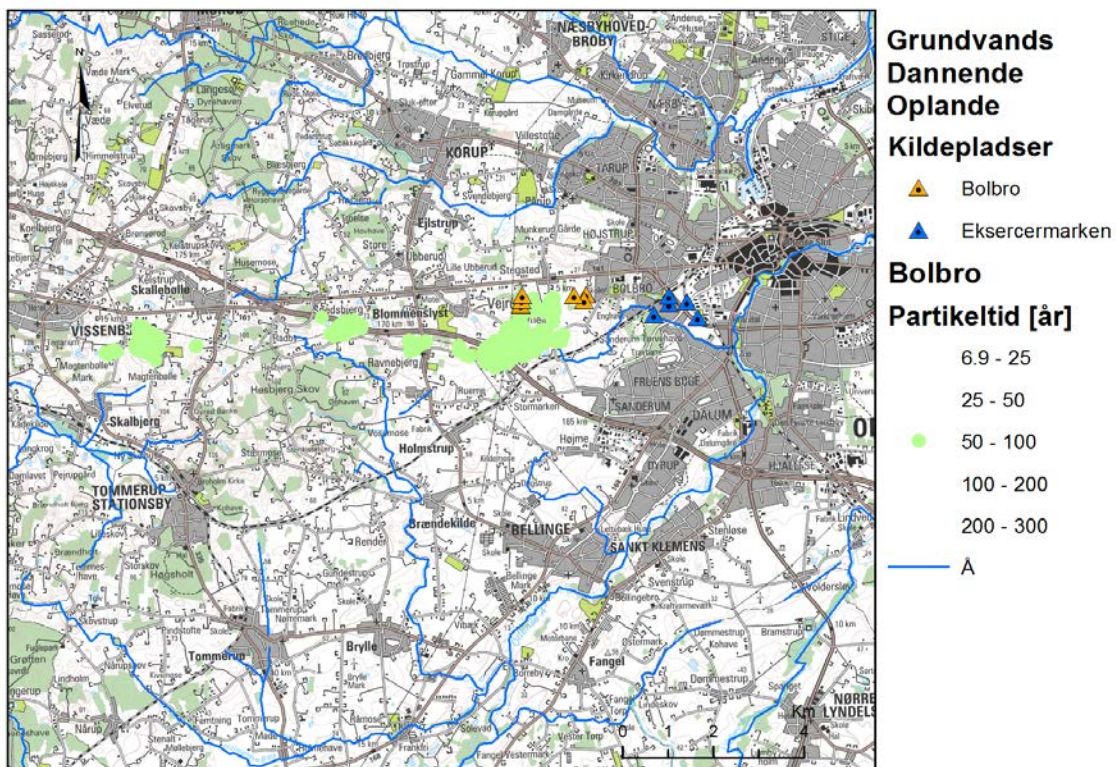
Appendix A



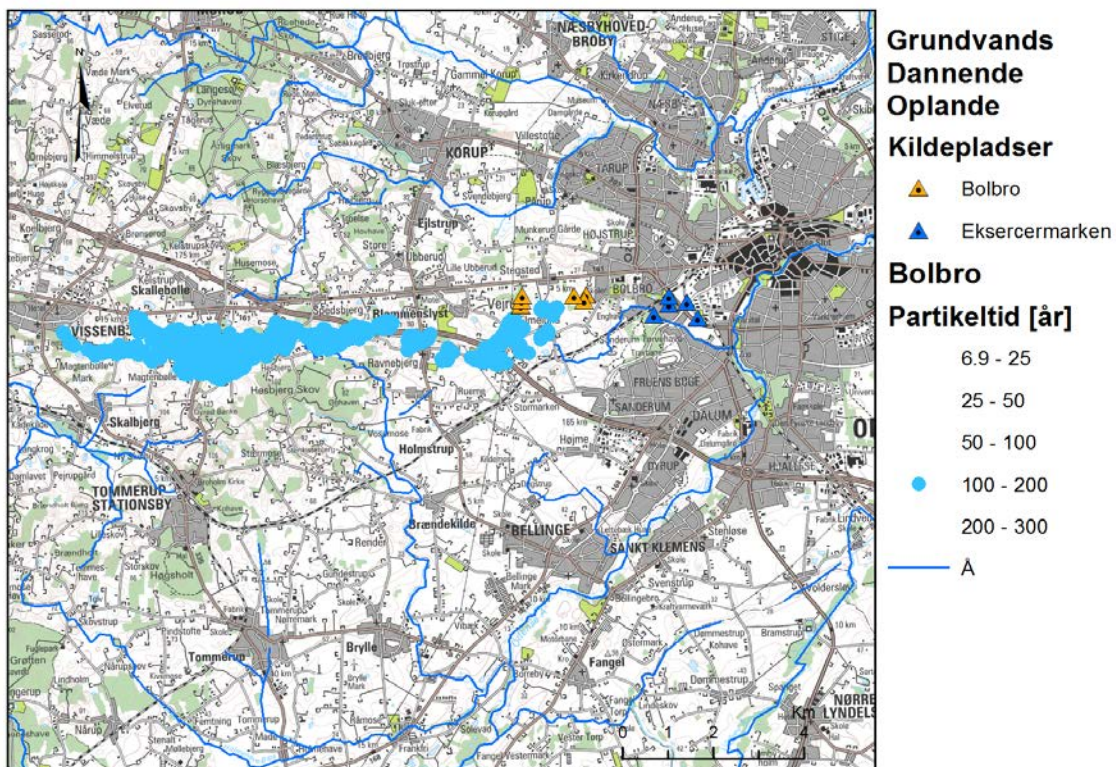
Figur A.1 Grundvandsdannende opland med transporttid på under 25 år til Bolbro Kildeplads.



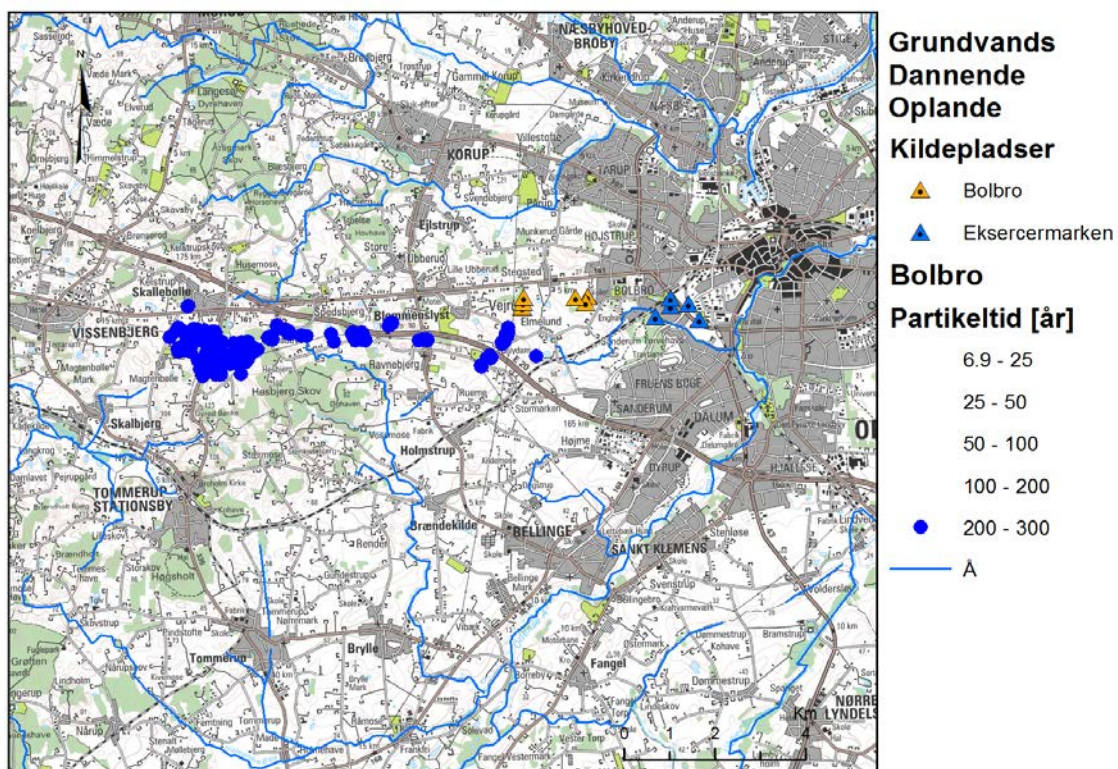
Figur A.2 Grundvandsdannende opland med transporttid på 25-50 år til Bolbro Kildeplads.



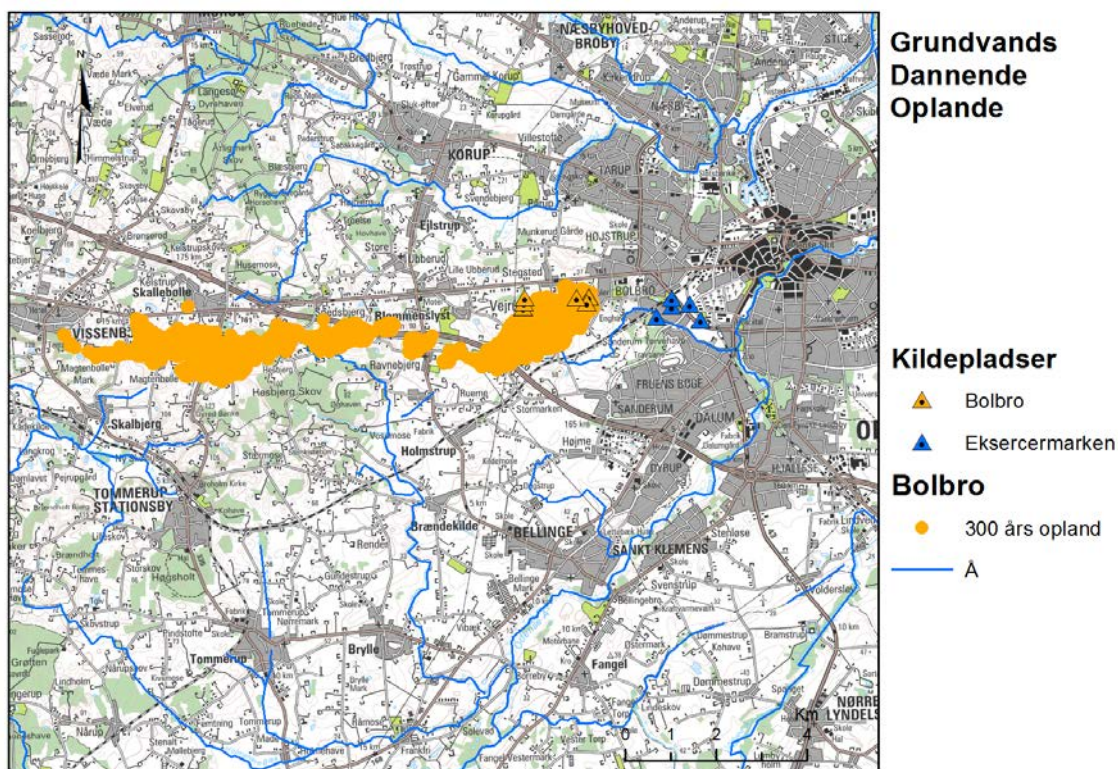
Figur A.3 Grundvandsdannende opland med transporttid på 50-100 år til Bolbro Kildeplads.



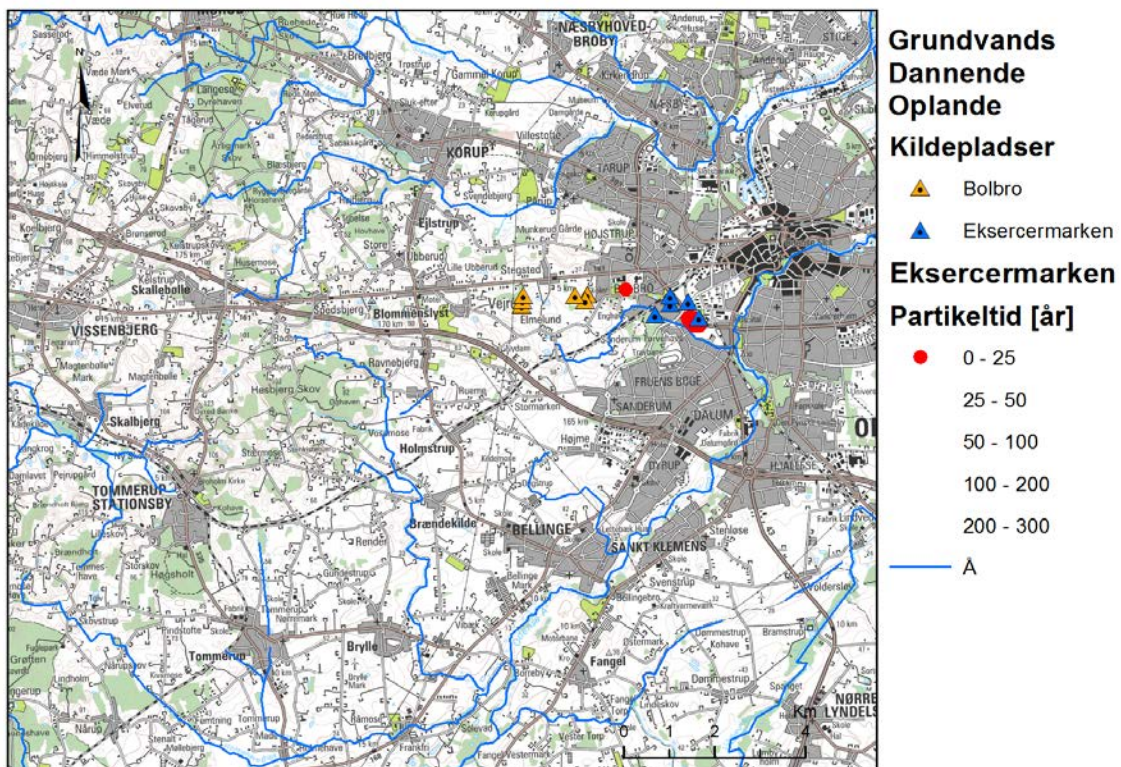
Figur A.4 Grundvandsdannende opland med transporttid på 100-200 år til Bolbro Kildeplads.



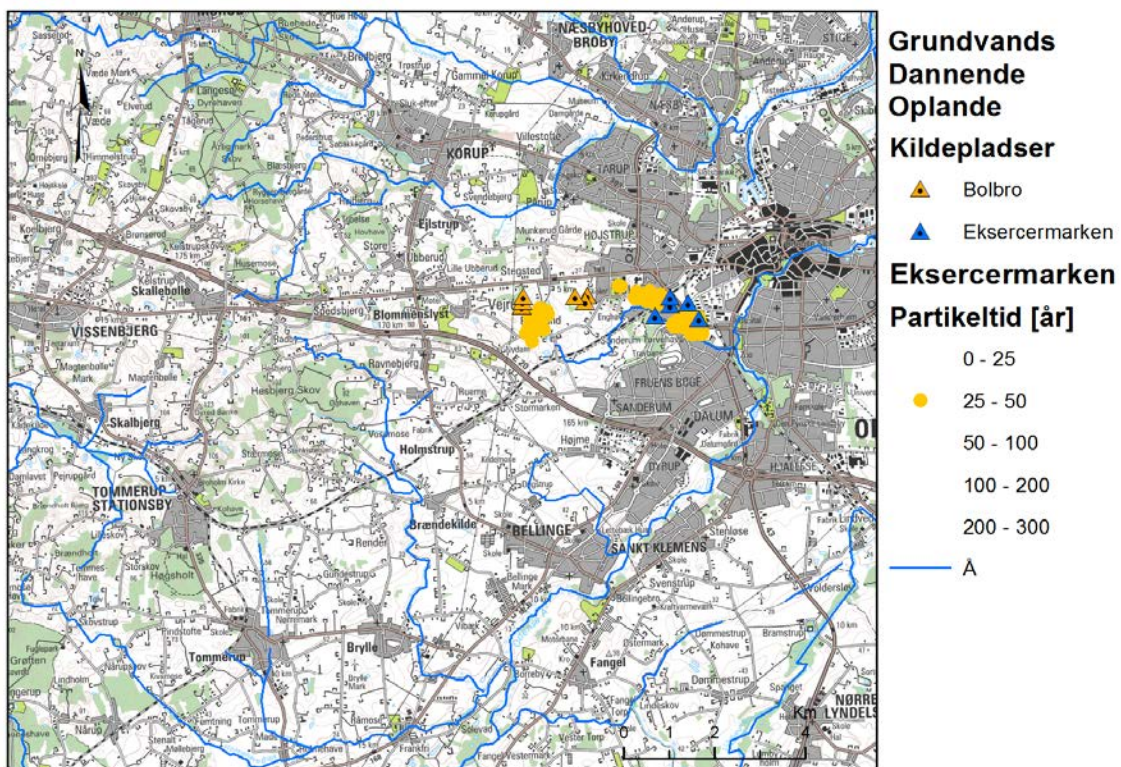
Figur A.5 Grundvandsdannende opland med transporttid på 200-300 år til Bolbro Kildeplads.



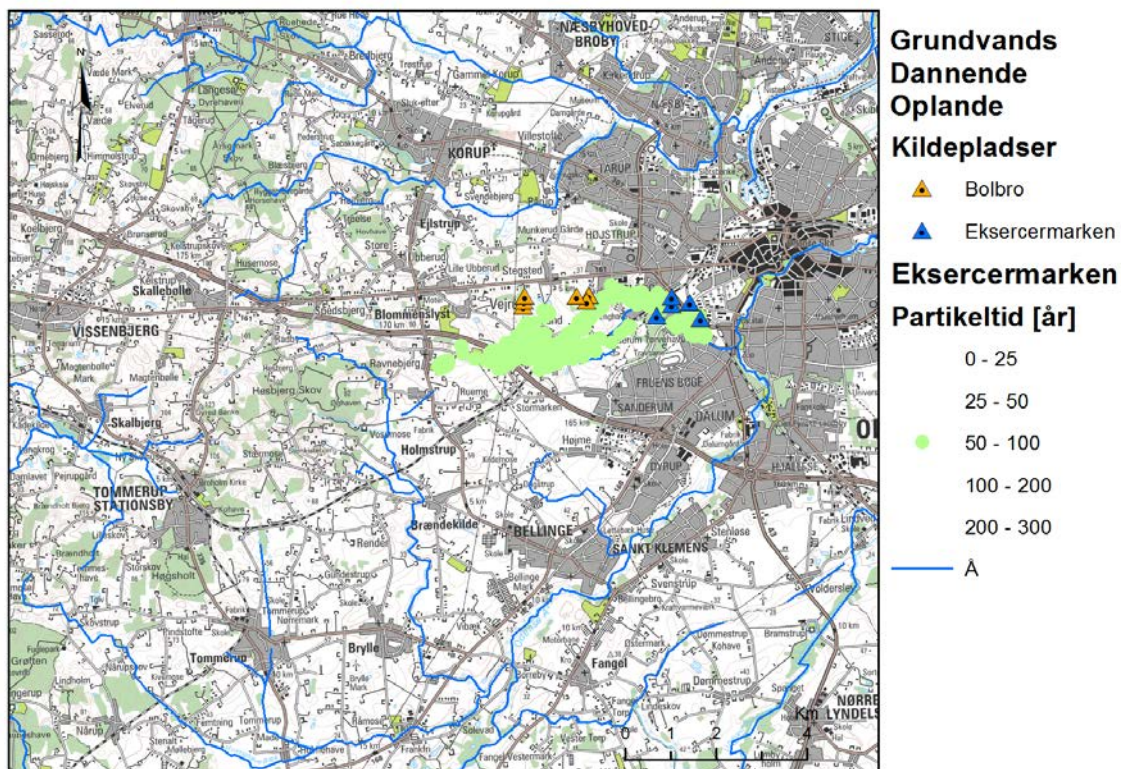
Figur A.6 Grundvandsdannende opland med transporttid på under 300 år til Bolbro Kildeplads.



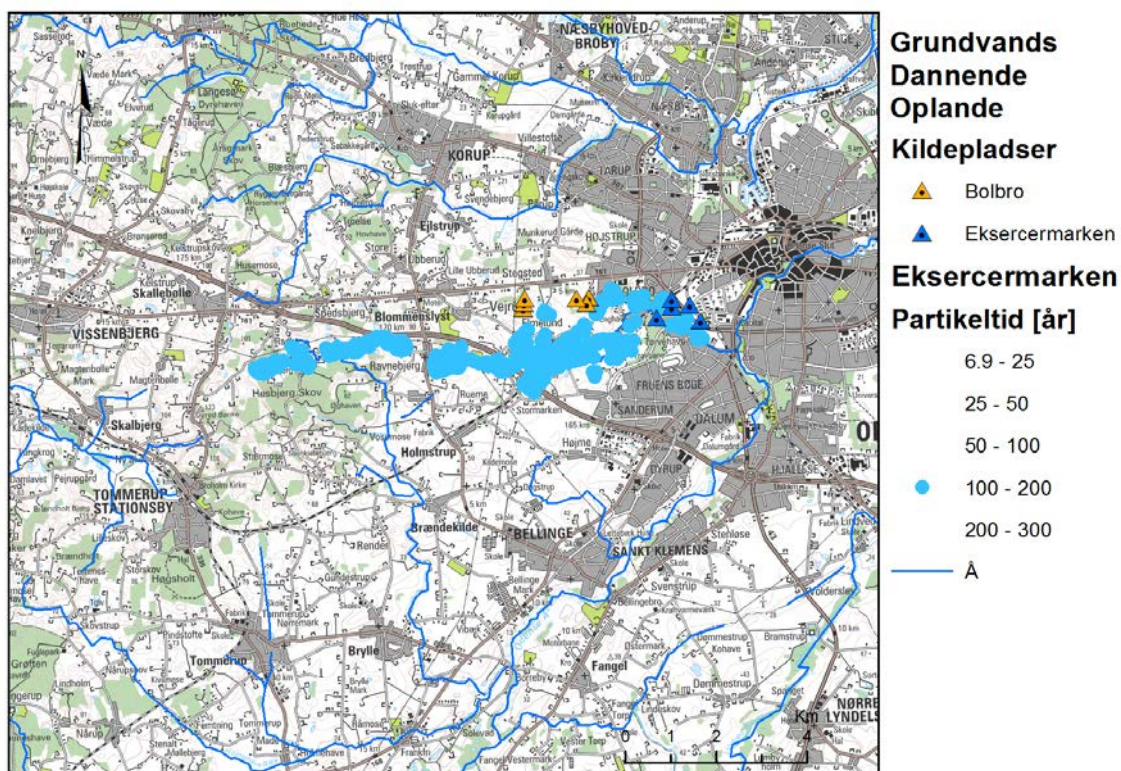
Figur A.7 Grundvandsdannende opland med transporttid på under 25 år til Eksercermarken Kildeplads.



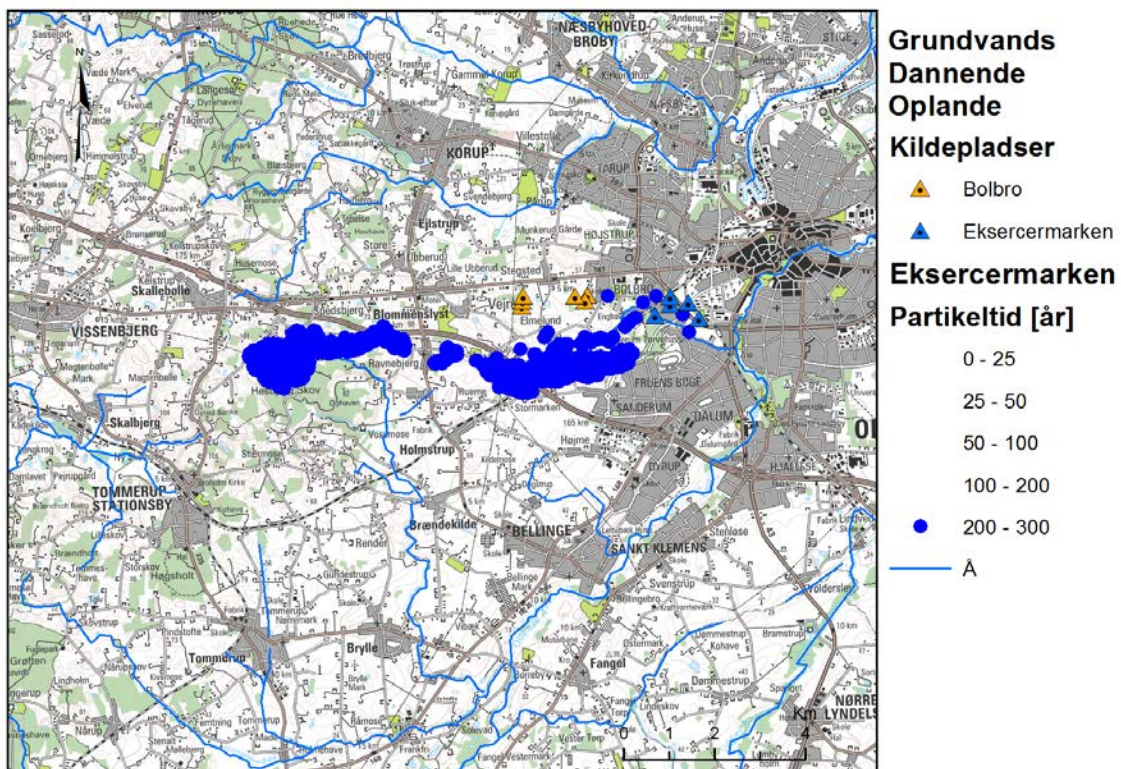
Figur A.8 Grundvandsdannende opland med transporttid på 25-50 år til Eksercermarken Kildeplads.



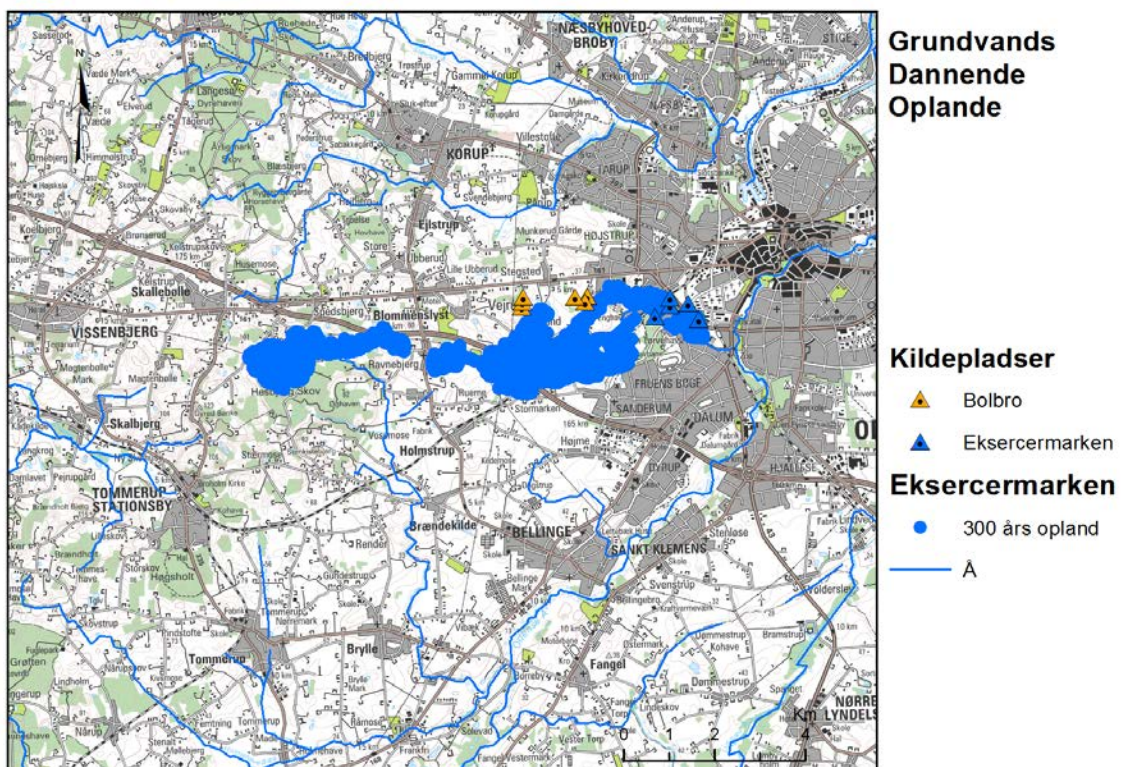
Figur A.9 Grundvandsdannende opland med transporttid på 50-100 år til Eksercermarken Kildeplads.



Figur A.10 Grundvandsdannende opland med transporttid på 100-200 år til Eksercermarken Kildeplads.



Figur A.11 Grundvandsdannende opland med transporttid på 200-300 år til Eksercermarken Kildeplads.

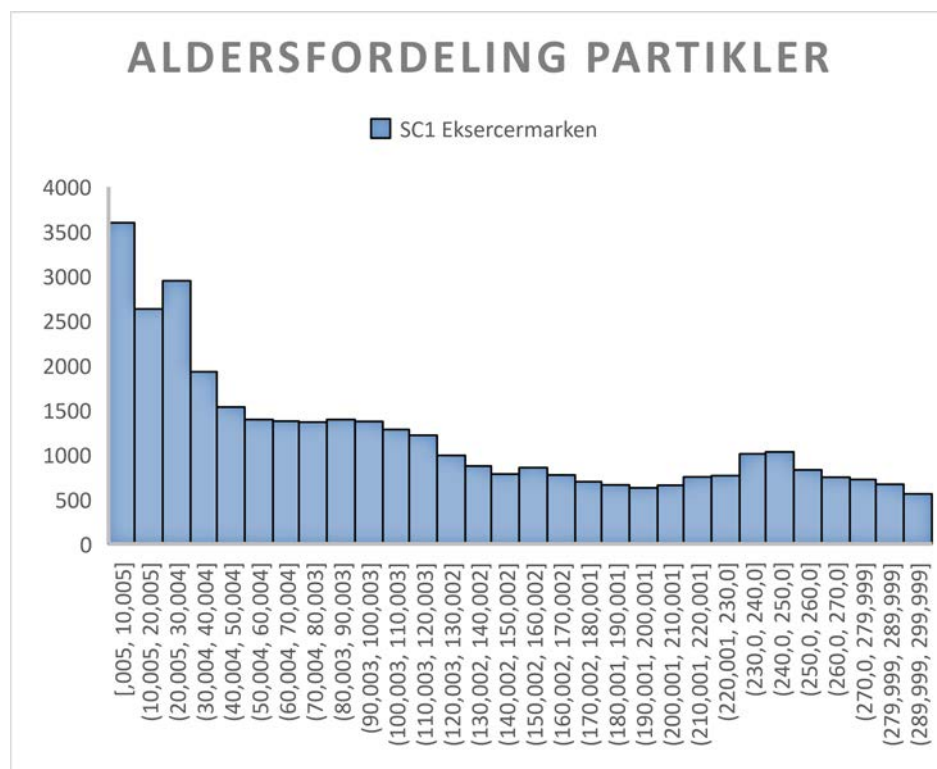


Figur A.12 Grundvandsdannende opland med transporttid på under 300 år til Eksercermarken Kildeplads.

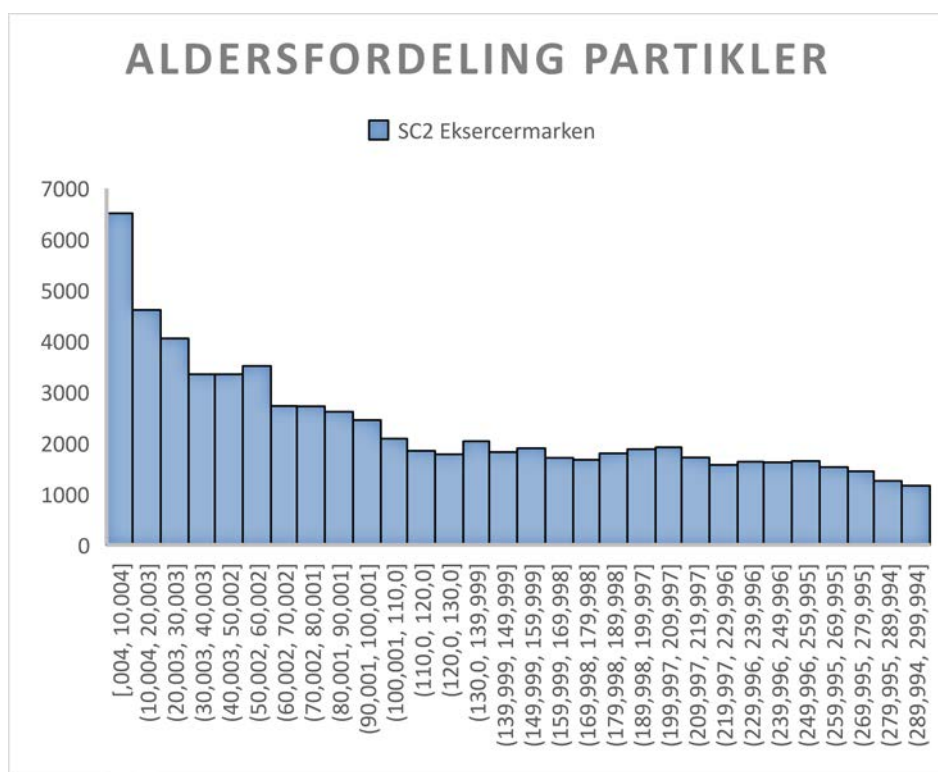
Appendix B

Figur B.1 – B.7: Aldersfordeling af partikler til Eksercermarken Kildeplads for scenarium 1-5 samt 7-8 (fra partikeltransport simulering) mellem 0 og 300 år (x-akse). Y-akse er antal partikler i hvert interval.

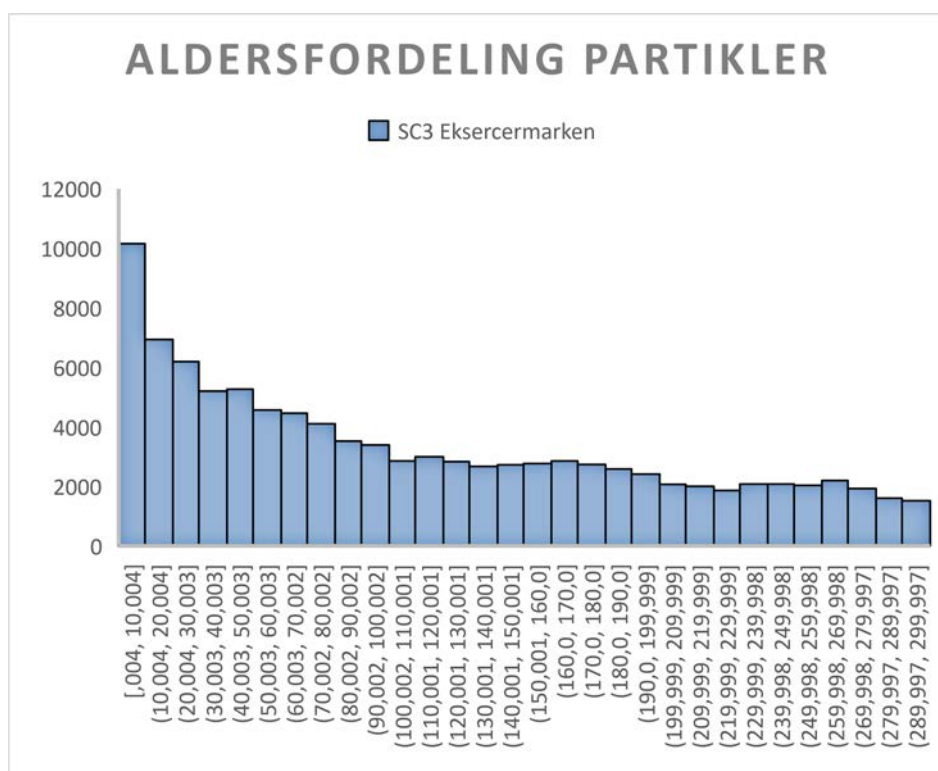
Figur B.8 – B.15: Aldersfordeling af partikler til Bolbro Kildeplads for scenarium 1-8 (fra partikeltransport simulering) mellem 0 og 300 år (x-akse). Y-akse er antal partikler i hvert interval.



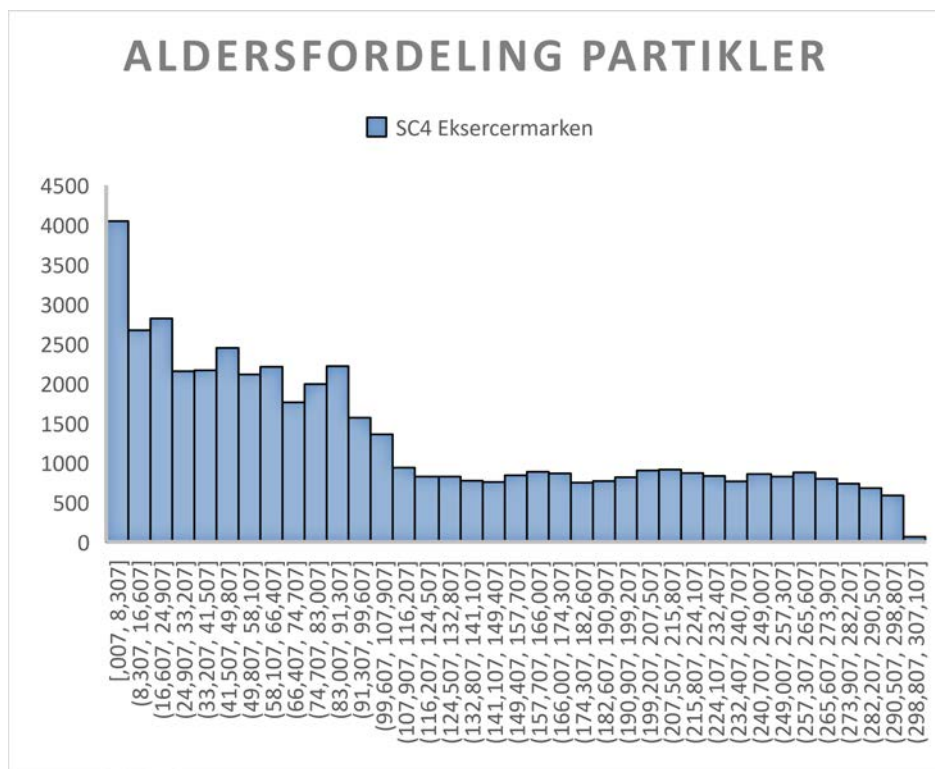
Figur B.1 Histogram for vandet der indvindes for scenarium 1 ved Eksercermarken kildeplads.



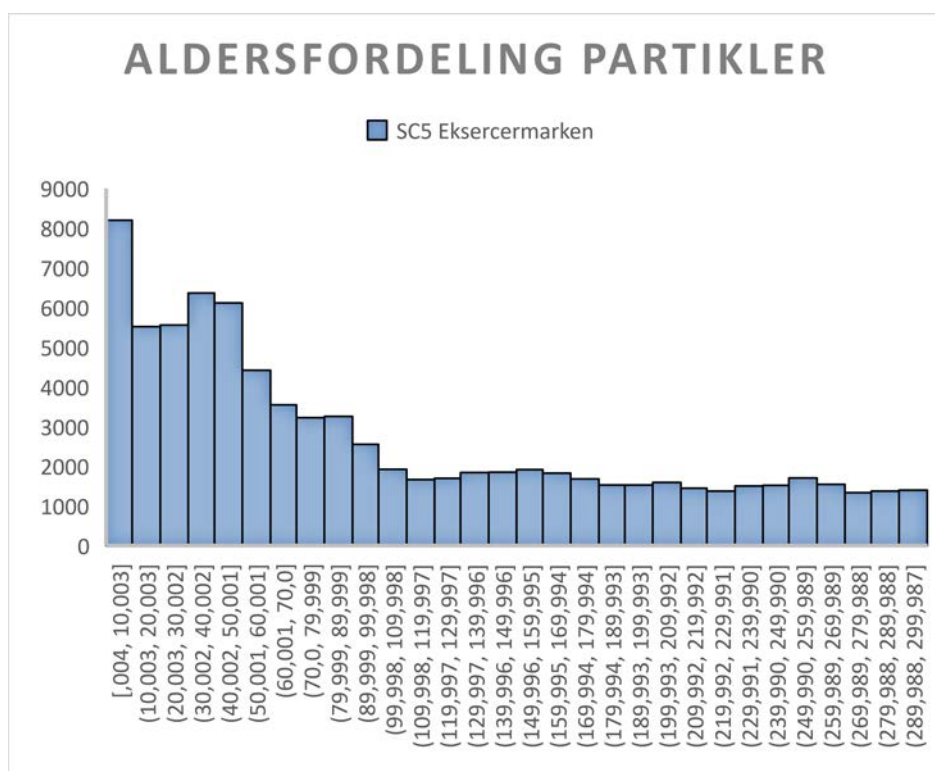
Figur B.2 Histogram for vandet der indvindes for scenarium 1 ved Eksercermarken kildeplads.



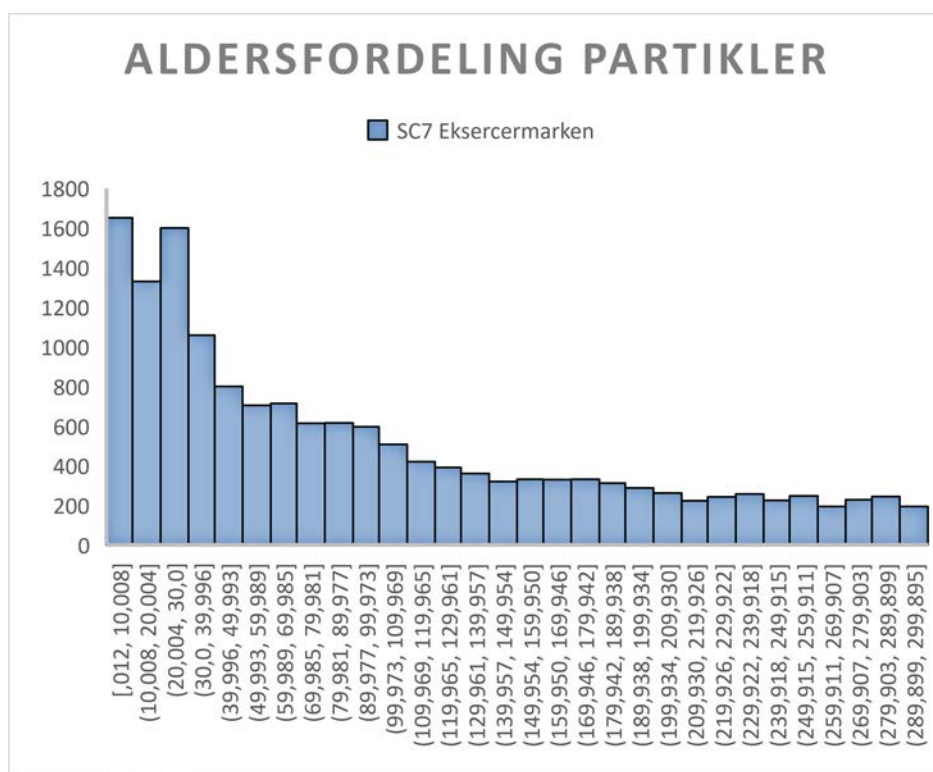
Figur B.3 Histogram for vandet der indvindes for scenarium 3 ved Eksercermarken kildeplads.



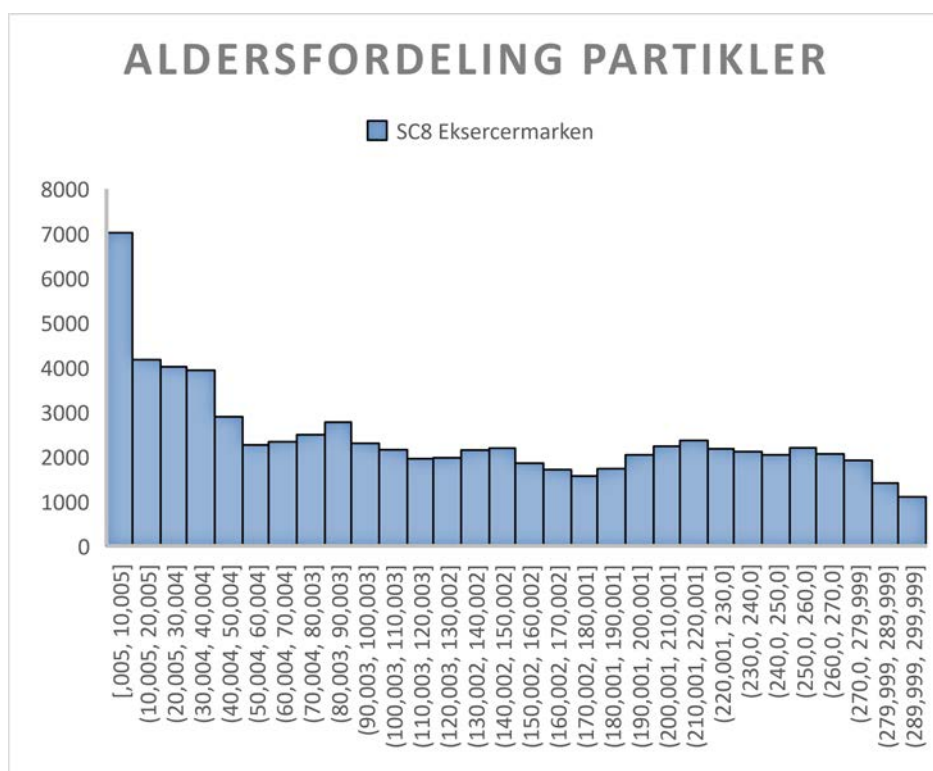
Figur B.4 Histogram for vandet der indvindes for scenarium 4 ved Eksercermarken kildeplads.



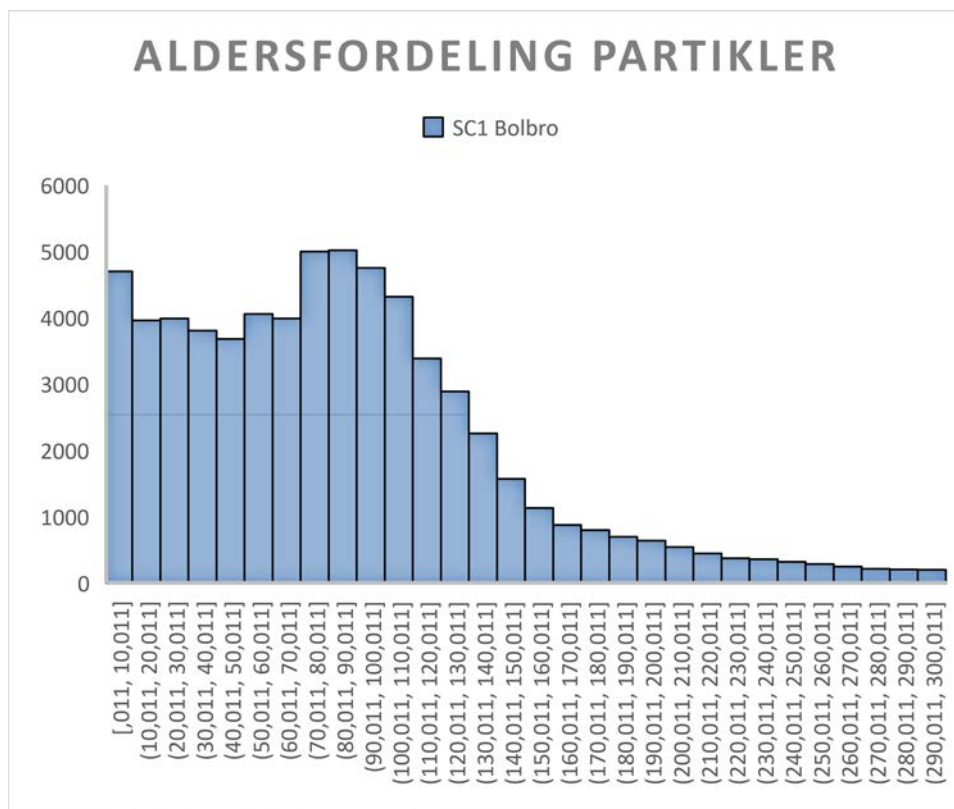
Figur B.5 Histogram for vandet der indvindes for scenarium 5 ved Eksercermarken kildeplads.



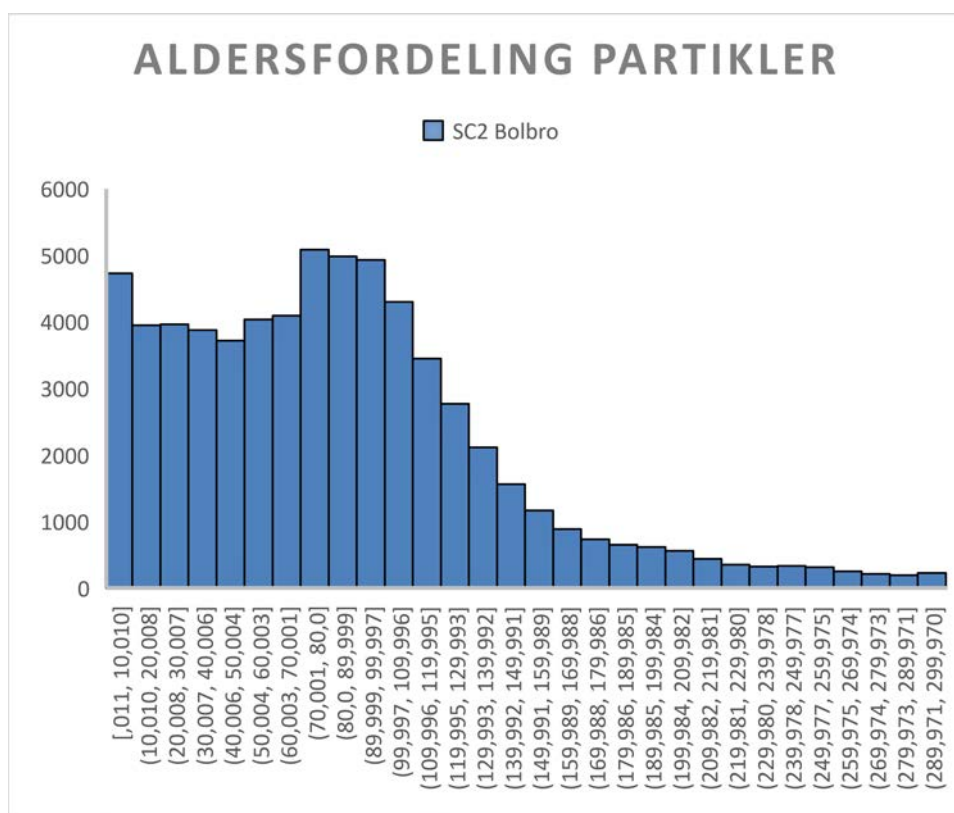
Figur B.6 Histogram for vandet der indvindes for scenarium 7 ved Eksercermarken kildeplads.



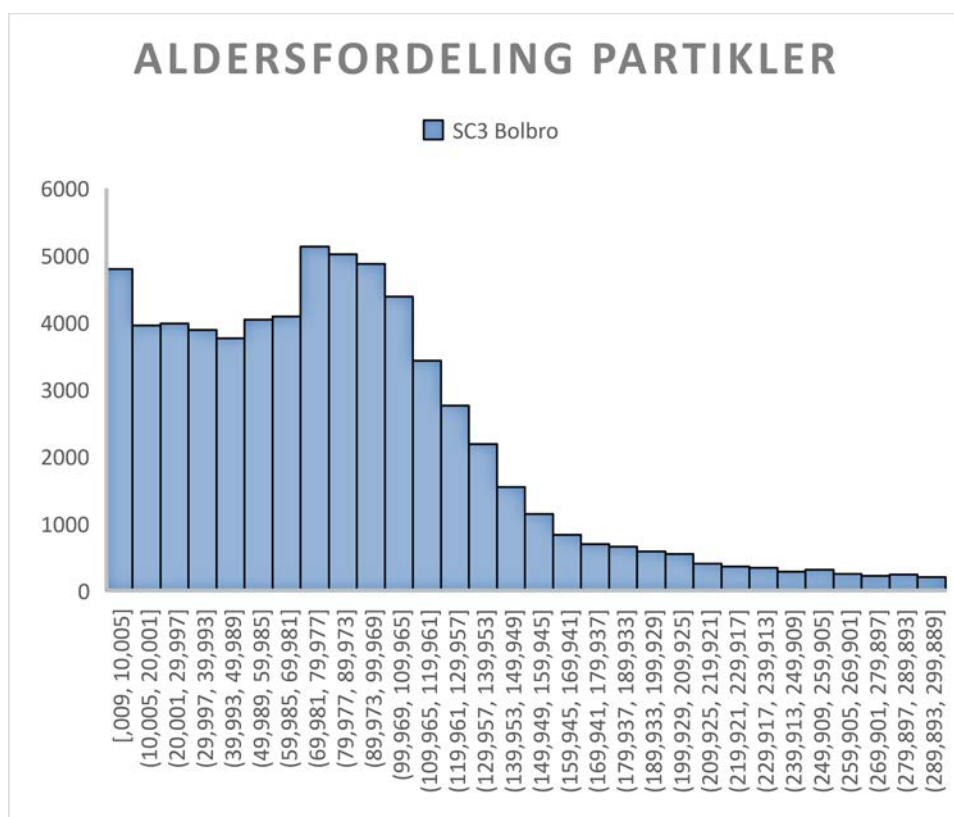
Figur B.7 Histogram for vandet der indvindes for scenarium 8 ved Eksercermarken kildeplads.



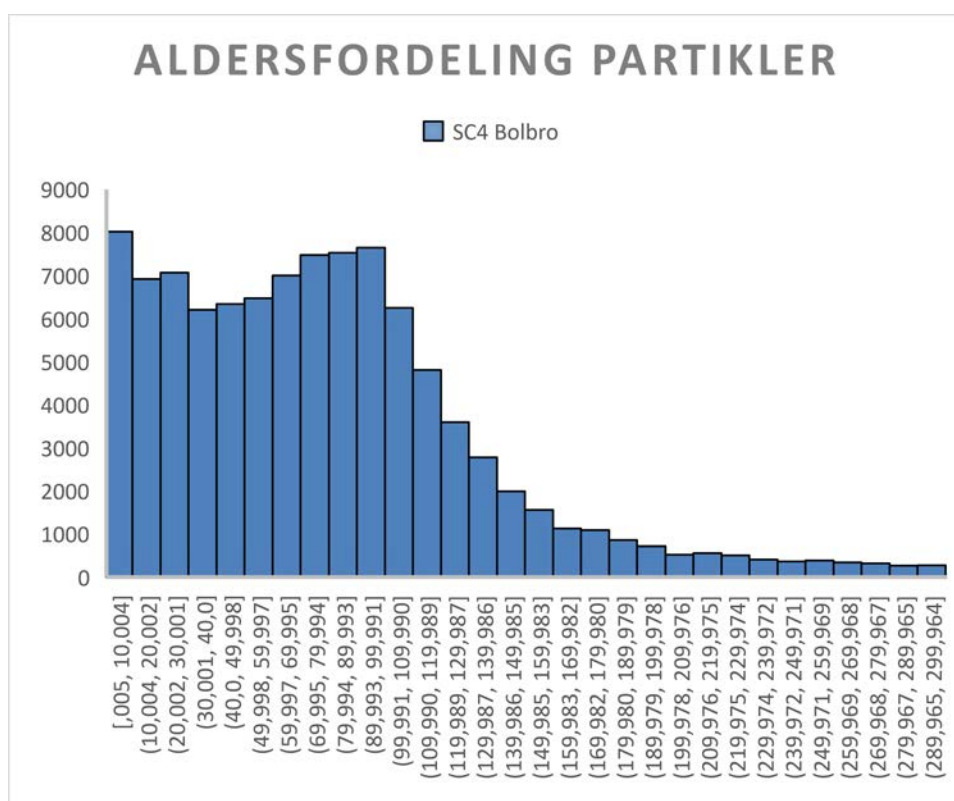
Figur B.8 Histogram for vandet der indvindes for scenarium 1 ved Bolbro kildeplads.



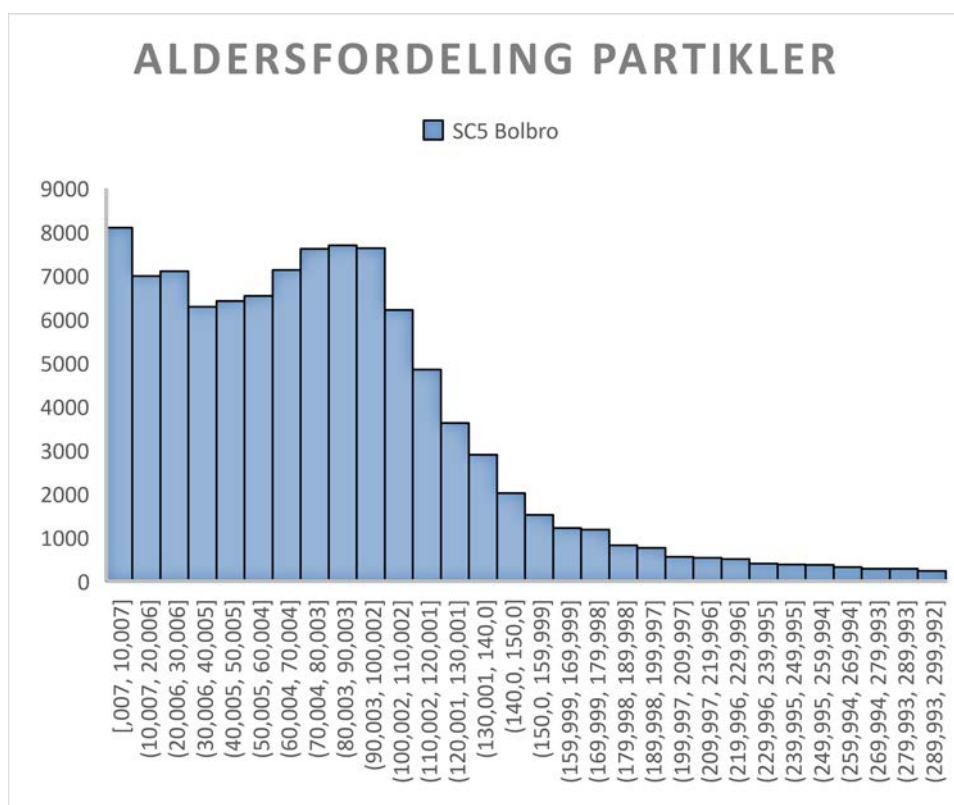
Figur B.9 Histogram for vandet der indvindes for scenarium 2 ved Eksercermarken kildeplads.



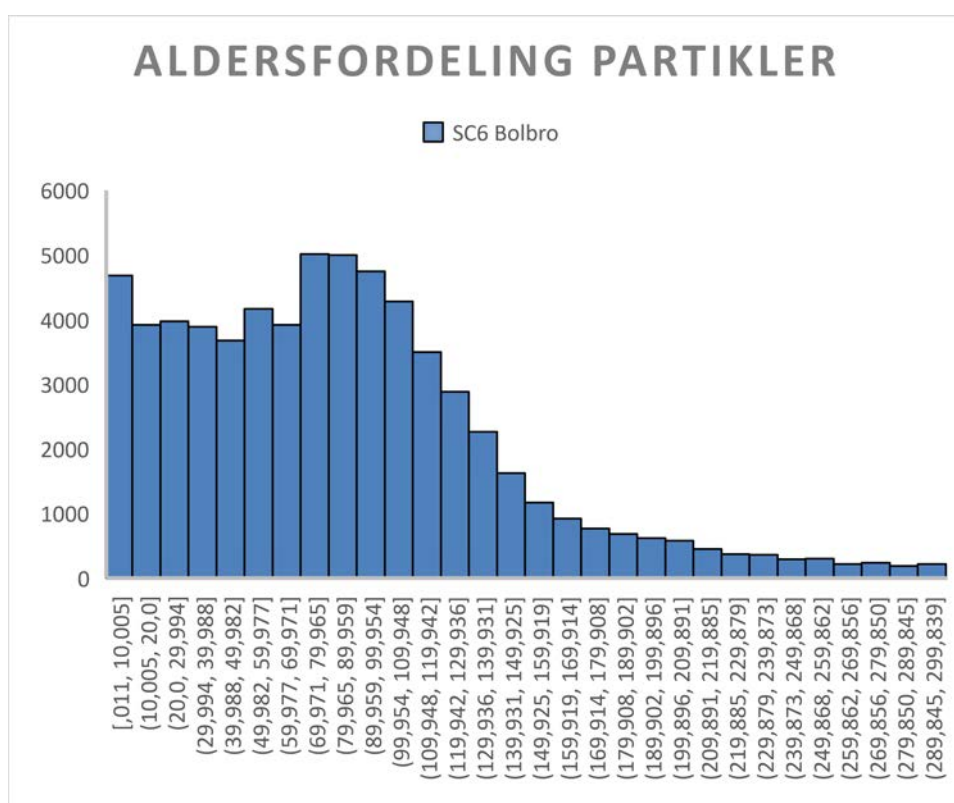
Figur B.10 Histogram for vandet der indvindes for scenarium 3 ved Eksercermarken kildeplads.



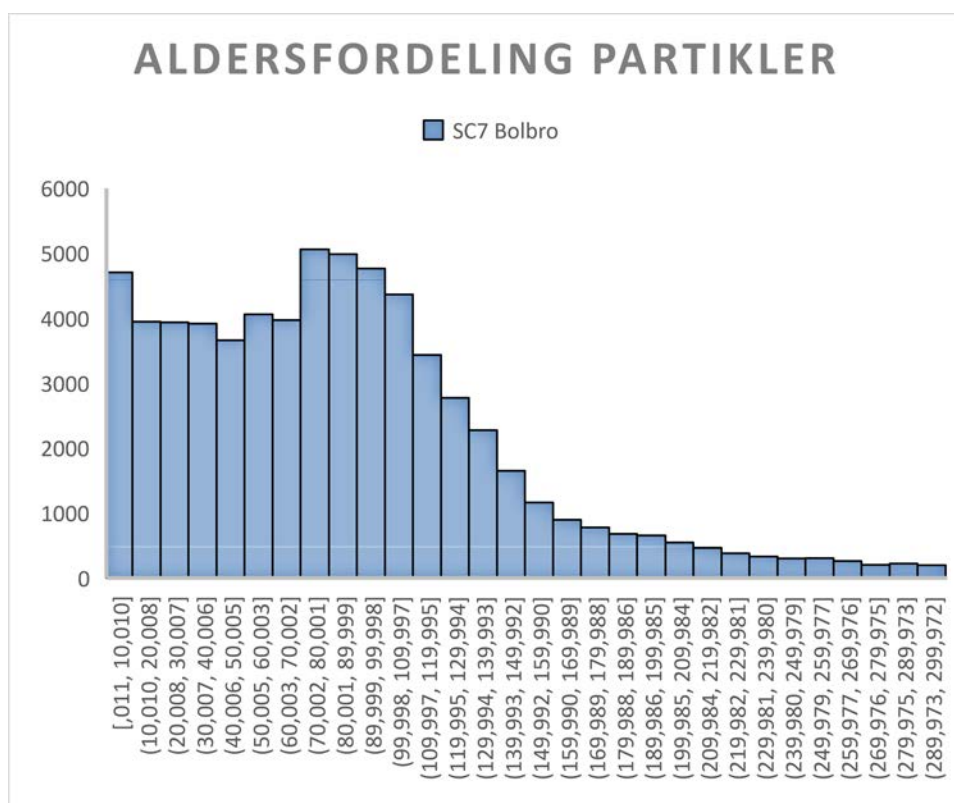
Figur B.11 Histogram for vandet der indvindes for scenarium 4 ved Eksercermarken kildeplads.



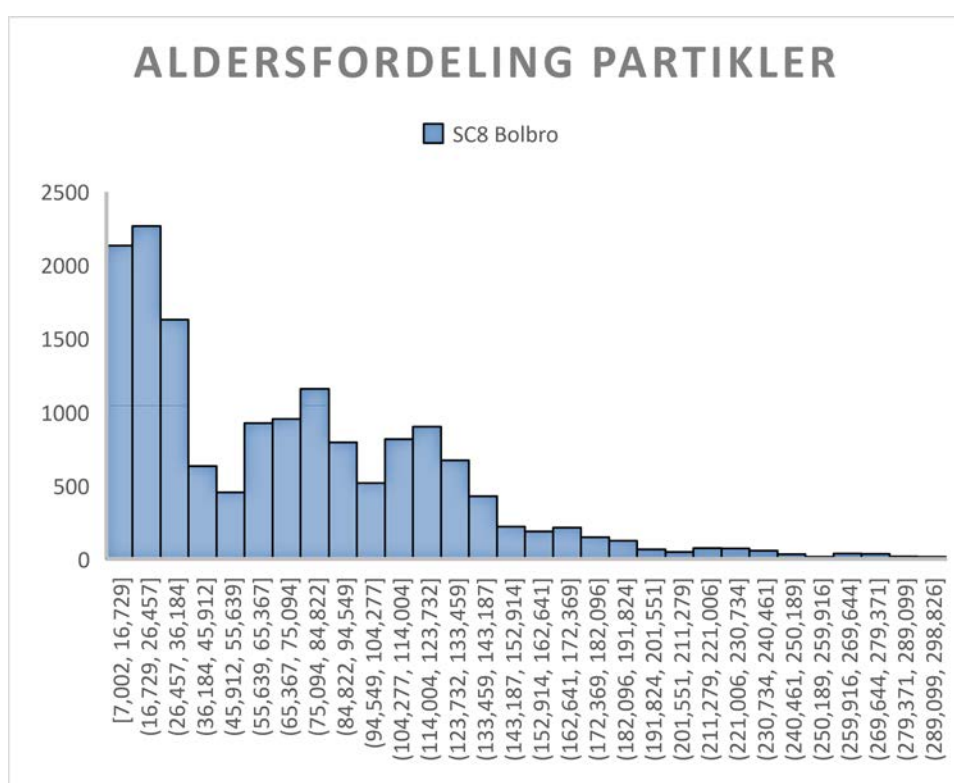
Figur B.12 Histogram for vandet der indvindes for scenarium 5 ved Eksercermarken kildeplads.



Figur B.13 Histogram for vandet der indvindes for scenarium 6 ved Eksercermarken kildeplads.



Figur B.14 Histogram for vandet der indvindes for scenarium 7 ved Eksercermarken kildeplads.



Figur B.15 Histogram for vandet der indvindes for scenarium 8 ved Eksercermarken kildeplads.