

Grundvandsmodel for motorvejsstrækning gennem Silkeborg

Statusrapport fase 1.3

Lars Trolborg, Jens Christian Refsgaard,
Jacob B. Kidmose & Mark T. Randall

DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER
FOR DANMARK OG GRØNLAND,
KLIMA-, ENERGI- OG BYGNINGSMINISTERIET



GEUS

Grundvandsmodel for motorvejsstrækning gennem Silkeborg

Statusrapport fase 1.3

Lars Troldborg, Jens Christian Refsgaard,
Jacob B. Kidmose & Mark T. Randall

Indholdsfortegnelse

Introduktion	3
Grundvandsmodel	4
Baggrund	4
Modelmodifikationer	4
Model kalibrering.....	4
Klimaberegninger	7
Vurderinger og forbehold	8
Test af simple infiltrations scenarier	10
Status for håndtering af online data	12
Modelkobling af grundvandsmodellen (MIKE SHE) og regnvandshåndterings modellen (MIKE URBAN)	13
Opstilling af koblet model.....	13
Resultater	15
Bidrag fra HydroCast	16
Vurdering af opnåede resultater	17
Referencer	18
Appendix 1: Notat om modelopdatering sommer 2012 og genberegnet ekstremværdi-analyse, Funder-Hårup motorvejen	19
Appendix 2: Notat om designvandspejl for Spuns Syd, Funder-Hårup motorvejen	38

Introduktion

Vejdirektoratet skal anlægge en ny motorvej gennem Silkeborg. Anlægget vil blive nedsænket i forhold til terræn på nogle strækninger, og det vurderes, at grundvandsforholdene er kritiske både for designet af anlægget og for arbejdet i anlægsfasen. En af de ukendte og potentielt kritiske faktorer er, hvorledes vandbalance og grundvandsforholdene vil være under et ændret klima om 100 år. Der findes i dag ingen relevant forskningsbaseret viden om, hvordan klimaændringer via ændringer i grundvandsforhold og hydrologiske forhold kan forventes at påvirke sådanne store danske vejanlæg, samt over hvor store usikkerheder, der vil være på sådanne estimater. Derfor har Vejdirektoratet behov for at tilvejebringe ny viden gennem forskningsbaserede undersøgelser.

På den baggrund er der i 2010 indgået et samarbejdsprojekt mellem Vejdirektoratet og GEUS med det overordnede formål gennem forskningsbaserede undersøgelser at frembringe ny viden om grundvandsforholdene af betydning for projektering, anlæg og drift af motorvejen gennem Silkeborg, herunder specielt at vurdere effekterne af klimaændringer på hydrologi og grundvand.

Denne rapport er skrevet i forbindelse med afslutningen af projektets fase 1 (projekteringsfasen). Der henvises til GEUS rapport 2011/136 for en nærmere gennemgang af resultater tidligere i projektet (fase 1.1 og fase 1.2: 2010-2011). Gennem hele projektets levetid har aktiviteter været afstemt med Vejdirektoratet behov for at opnå bedst muligt informationsgrundlag til projekteringen. Arbejdet har derfor været tæt koordineret med projekteringsarbejdet, herunder specielt Cowi's arbejde, hvortil GEUS løbende har leveret modelleringsresultater.

Status rapporten opsummerer projektarbejdet der er gennemført i 2012 og 2013. Der er to appendices til rapporten indeholdende notater fremsendt til Cowi og VD i projektførløbet. Begge notater er vedhæftet for at give en fornemmelse for hvad udviklingen af grundvandsmodellen med gradvis inddragelse af flere måledata betyder for estimerede grundvandsextremer. Notaterne er angivet i omvendt kronologisk rækkefølge, og skal læses således at seneste notat i Appendix 1 afløser tidligere notat i Appendix 2. Rapporten opsummerer desuden hovedresultaterne fra en artikel om infiltrations scenarier baseret på Silkeborg modellen.

Grundvandsmodel

Baggrund

Det hydrologiske modelgrundlag er udviklet på en række punkter i forhold til den i Statusrapporten for fase 1.1. og 1.2 (Trolborg et al., 2011) anvendte model. Formålet med ændringerne er dels at rette småfejl fundet i opsætningen og dels at sikre bedre overensstemmelse og dermed koblingsmulighed mellem grundvandsmodellen og en urban model for regnvands-håndtering (Orbicon/Forsyningen). Ændringer og efterfølgende omkalibrering vil kort blive resumeret i det efterfølgende, men er beskrevet i detaljer i notatet til VD og Cowi fra den 29 november 2012 (Appendix 1).

Modelmodifikationer

Der er ændret i beskrivelsen af vandafledningen fra de befæstede arealer, således at der tages udgangspunkt i et meget detaljeret grundkort over placering af huse, veje og andre impermeable strukturer. Grundkortet er udarbejdet af Orbicon og anvendes i den urbane regnvands-håndteringsmodel. Anvendelse af det ændrede befæstelseskort bevirker, at der i den opdaterede model arbejdes med differentierede andele af nedbøren pr opland. Ved kun at medtage arealer som med vis rimelighed kan antages at være impermeable og kloakerede (huse, veje, asfalterede/betonlagte arealer), er disse indlagt i modellen som impermeable zoner med afstrømning direkte til vandløb. Konsekvensen af denne detaljerede beskrivelse af impermeable overflader er en reduktion af infiltrationen indenfor det urbane område, og en mere realistisk amplitude af det simulerede trykniveau.

Der er sket mindre justeringer af randbetingelserne for at undgå sammenfaldende rande mellem de overordnede 500 meter og 100 meter modeller og den detaljerede model. Den geologiske model er blevet opdateret med data fra jordartskortet (1:25.000) simplificeret til sand, ler og tørv og indlagt i modellen som geologiske linser af 2 meter tykkelse.

Model kalibrering

Modellen er re-kalibreret, dels pga. modelmodifikationerne og dels for at forbedre modellens evne til at simulere grundvandsdynamik langs det projekterede motorvejs transekt. Objektiv-funktionen er udvidet med afvigelse på middeltrykniveau (hts_me), med amplituden på grundvandsfluktuationen fra pejledata (hts_errampl), og med vægtede vandbalancefejl for de fire nye vandføringsstationer på sæson niveau i kalibreringen (mfbal_120102, mfbal_030405, mfbal_060708, mfbal_091011). Desuden indgår nu også parametre til beskrivelse af de frie og spændte magasintal, en parameter for overflade magasinering, og det vertikal-horisontal

anisotropi forhold ift. hydraulisk ledningsevne i Terrassemagasinet. Som ved tidligere kalibreringer af modellen er parametergruppen rodzone og umættet zone hentet fra DKmodel2009 Midtjylland. Ligesledes er der stadig indlagt zoner omkring borerne 3368, 3399 og 3456 med en K-værdi fundet ved tolkning af prøvepumpningerne på $1,15 \cdot 10^{-3}$ m/s. Disse zoner indgår ikke i kalibreringen.

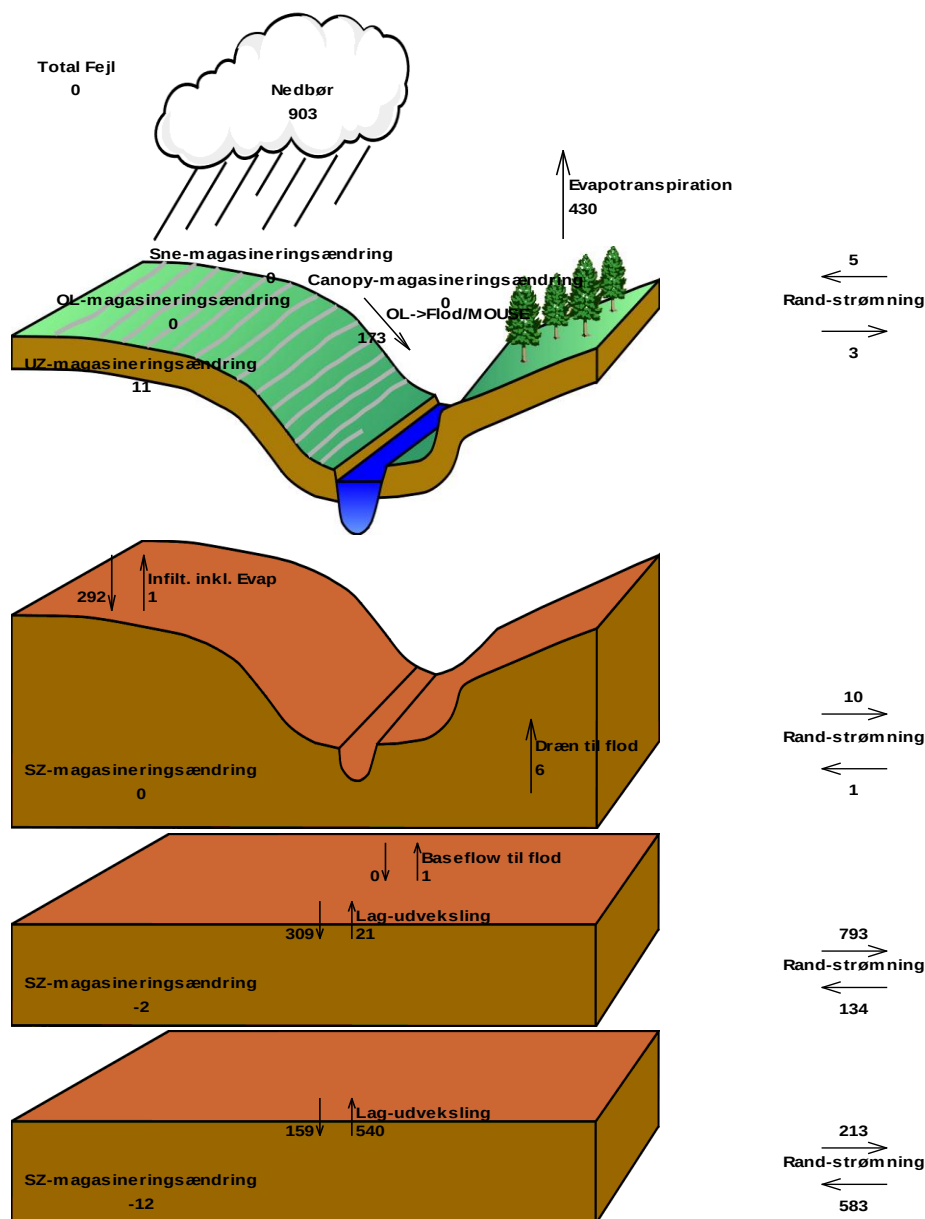
Den optimerede model har som tidligere små trykniveau afvigelser langs motorvejs transektet, mens der i resten af oplandet er større afvigelser (se figur 1 i Appendix 1). Indenfor fokusområdet ses de største afvigelser langs skræntzonen. Skræntzonerne mod Søholt-terrassemagasin har en højere grad af geologisk heterogenitet end den resterende del af området, og der er kun få borer, der beskriver denne zone.

Observationernes gennemsnits amplitude for perioden 1/1-2010 til 6/5-2012 er 11 cm, modellens gennemsnits amplitude er 20 cm for samme periode med generelt små afvigelser, hvilket er en klar forbedring i forhold til før opdateringen (Trolborg et al. (2011) og Appendix 2). Modellen har i området tæt ved søen og ved Dyrehaven amplitude fejl større end 20 cm (figur 2 appendix 1). Begge område vurderes i betydeligt omfang at være påvirket af grundvandsstrømninger fra prækvartæret. Modelafvigelser langs transektet er opsummeret i nedenstående tabel. Modellen overestimerer amplituden for alle zoner på nær zone 35000, men der er ingen tilsyneladende sammenhæng mellem middel tryk- og amplitudefejl. Der er i tabeloversigten (og kalibreringen) kun medtaget zoner hvor enkeltfiltre indeholder mere end 10 observationer.

Tabel 1 Model afvigelser i forhold til observationer opsummeret pr. zone

	32500	32700	33400	33800	33900	34200	34500	34900	35000	35200	35300
Model amplitude [m]	0,24	0,18	0,18	0,19	0,20	0,21	0,23	0,27	0,19	0,22	0,19
Observeret amplitude [m]	0,09	0,12	0,05	0,06	0,23	0,15	0,22	0,16	0,23	0,10	0,07
Middel tryk afvigelse [m]	0,08	2,12	-1,25	-0,83	-0,31	0,50	1,04	2,80	2,78	5,53	6,73

Simuleringer af afstrømning fra overfladesystemet er præget af for høje vandføringstoppe med for kort varighed ift. de målte, hvilket kan skyldes at modellens beskrivelse af strukturer og magasiner/søer ikke er medtaget i detaljer. Vandbalancen (Figur 1) viser, at en meget lille del vandløbsafstrømningen stammer fra grundvandssystemet, og at den samlede afstrømning udgør ca. 1/3 af nettonedbøren (fra befæstede arealer). Den viser også en tilstrømning til området fra prækvartæret (lag 3) af samme størrelsesorden som nettonedbøren, og at næsten alt udstrømningen fra området sker via randen (udstrømning fra Terrassemagasinet i lag 2 til Silkeborg Langsø).



Akkumuleret vandbalance fra 02-05-2009 12:00:00 til 01-05-2012 12:00:00. Datatype : Storage depth [millimeter].

Figur 1 Vandbalance for topografisk opland til Terrassemagasinet (tal i mm/år)

Der er gennemført en række test af modelopsætningen (justeret klimainput, vægtningskemaer for objektivfunktioner i parameteroptimeringen, forskellige parameter koblinger og a priori angivelser af øvre parameter intervaller) i forhold til simuleringer af nuværende og fremtidige klima. Konklusionen af disse test er, at vi har en tilsyneladende numerisk stabil model uden åbenlyse fejlkilder i hverken opsætningen eller i fremtidsklimaberegningerne, og at modelopsætningen er temmelig følsom overfor parameter ændringer og variationer i klima input data.

Klimaberegninger

Der er beregnet ekstremværdier for maximal grundvandsstand for forskellige gentagelsesperioder (10%, 21, 50 og 100 år) svarende til klimaet som det forventes at være i år 2100. Klimafremskrivningsberegningerne er gennemført for de ni klimamodeller og de to nedskaleringsmetoder. Der er beregnet usikkerhed på middelværdien som følge af følgende tre fejlkilder, som vi vurderer, er de væsentligste. Detaljer i metoden er beskrevet i Kidmose et al. (2013) og i Appendix 1:

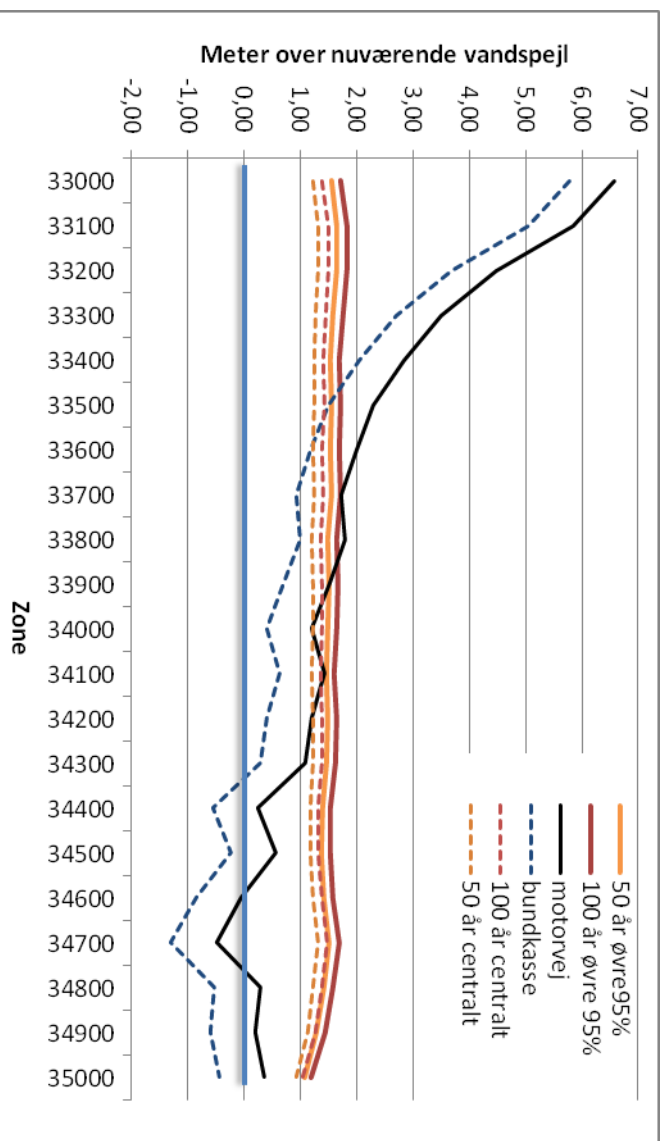
- **Klimamodeller:** usikkerheden på klimaprojektionerne er vurderet ved at benytte ni forskellige klimamodeller.
- **Nedskalering:** usikkerheden på nedskaleringsmetode er vurderet ved at benytte to forskellige metoder
- **Ekstremværdianalyse:** ekstremværdianalyserne er gennemført med Gumbel beregninger, hvor usikkerheden på fremskrivningerne er estimeret.

Under forudsætning af at de tre fejlkilder er indbyrdes uafhængige, kan vi beregne den samlede usikkerhed ved fejlphobningsloven.

Tabel 2 Relativ forøgelse af maksimum grundvandsstand i forhold til nuværende niveau for 10%, 21, 50 og 100 års hændelser (m)

Zone	Centralt estimat				Øvre 95 %				Nedre 95 %			
	10%	21	50	100	10%	21	50	100	10%	21	50	100
33000	0,86	1,02	1,22	1,38	1,25	1,46	1,72	1,93	0,46	0,58	0,73	0,84
33100	0,92	1,10	1,32	1,50	1,33	1,55	1,84	2,06	0,52	0,65	0,81	0,93
33200	0,93	1,11	1,33	1,50	1,33	1,55	1,84	2,07	0,53	0,66	0,82	0,94
33300	0,89	1,07	1,28	1,45	1,28	1,50	1,77	2,00	0,51	0,64	0,79	0,90
33400	0,87	1,04	1,24	1,41	1,24	1,45	1,72	1,93	0,49	0,62	0,76	0,88
33500	0,88	1,05	1,26	1,42	1,26	1,47	1,74	1,95	0,50	0,63	0,78	0,89
33600	0,87	1,03	1,23	1,39	1,23	1,44	1,70	1,91	0,50	0,62	0,77	0,88
33700	0,88	1,05	1,25	1,42	1,25	1,46	1,73	1,94	0,51	0,63	0,78	0,89
33800	0,85	1,01	1,21	1,37	1,21	1,41	1,67	1,87	0,50	0,62	0,76	0,86
33900	0,87	1,03	1,23	1,39	1,23	1,43	1,69	1,90	0,51	0,63	0,77	0,88
34000	0,86	1,02	1,22	1,37	1,21	1,41	1,66	1,87	0,51	0,63	0,77	0,88
34100	0,85	1,01	1,20	1,36	1,19	1,39	1,64	1,84	0,51	0,63	0,77	0,88
34200	0,87	1,03	1,23	1,38	1,21	1,41	1,67	1,88	0,52	0,65	0,79	0,89
34300	0,87	1,03	1,22	1,38	1,20	1,40	1,65	1,86	0,53	0,65	0,79	0,90
34400	0,83	0,99	1,17	1,32	1,14	1,34	1,58	1,78	0,52	0,64	0,77	0,87
34500	0,84	0,99	1,18	1,33	1,13	1,33	1,57	1,77	0,55	0,66	0,79	0,89
34600	0,88	1,04	1,23	1,38	1,18	1,38	1,63	1,83	0,59	0,70	0,83	0,93
34700	0,95	1,12	1,32	1,48	1,26	1,47	1,74	1,96	0,65	0,77	0,91	1,01
34800	0,89	1,05	1,24	1,39	1,17	1,37	1,63	1,83	0,62	0,72	0,85	0,94
34900	0,83	0,97	1,13	1,26	1,06	1,24	1,47	1,65	0,61	0,69	0,80	0,87
35000	0,71	0,81	0,94	1,04	0,88	1,02	1,20	1,35	0,54	0,60	0,67	0,73

Relateres analysen af klimaets indflydelse til den forventede placering af motorvejskonstruktionen i forhold til grundvandsspejlet kan det visualiseres som på Figur 2. Forskellen mellem en 50 og 100 års hændelse er mindre end forskellen mellem et centralt og et øvre 95% estimat. Motorvejens tilsyneladende ujævne overflade skal ses som et udtryk for lokale variationer i grundvandsstand, da motorvejens overflade naturligvis kotemæssigt vil være relativt jævn.

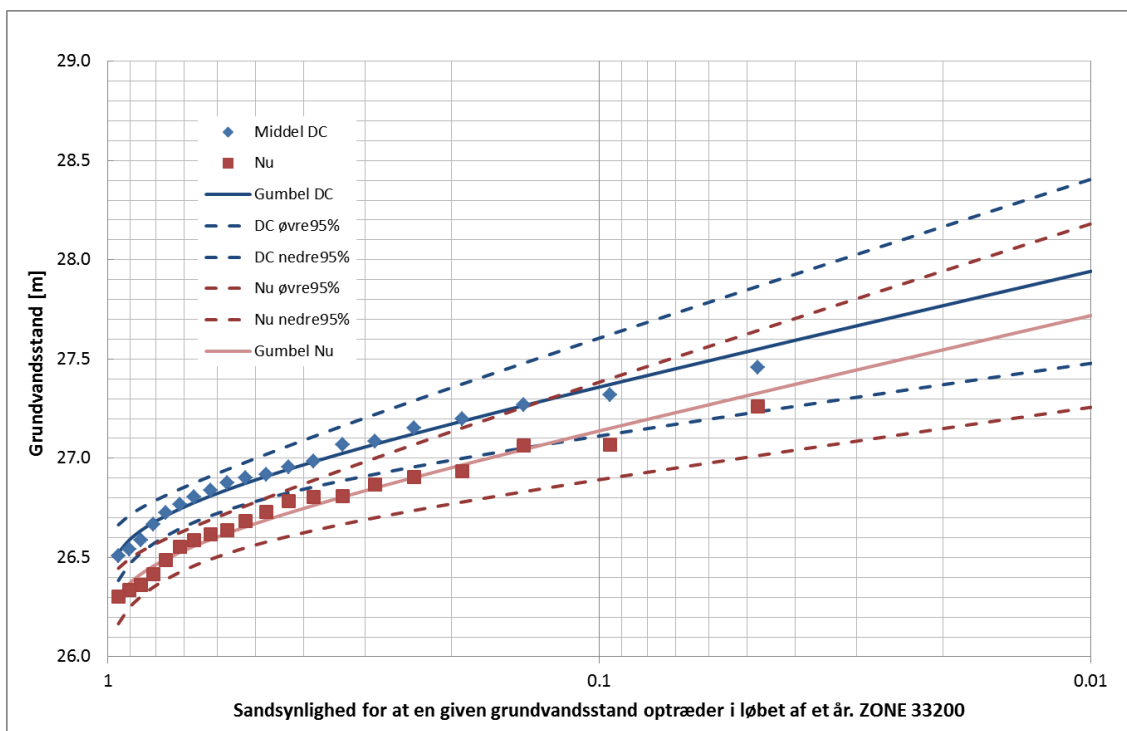


Figur 2 Udvikling af grundvandsstand relativt til middel af nuværende grundvandsstand

Vurderinger og forbehold

Det største bidrag til den samlede usikkerhed stammer fra ekstremværdi analysen, derefter kommer bidraget fra variationer mellem klimamodeller og det mindste bidrag stammer fra nedskaleringen. Det estimerede konfidensinterval i ovenstående tabel inkluderer ikke effekten af usikkerhed på geologi eller modelparametre, og resultaterne vil være følsomme overfor ændringer i vidensgrundlag og parametrisering.

En analyse af størrelsen af de enkelte hændelser sammenholdt med middel af nuværende situation viser, at langt det største bidrag til ekstrem høj grundvandsstand stammer fra variationer i det eksisterende klima (rød linje i eksemplet Figur 3), mens kun en mindre del stammer fra forandringer i klimaet (forskøl på rød og blå linje i eksemplet Figur 3).



Figur 3 Eksempel på Gumbel fremskrivning af simulerede ekstremværdi hændelser for nuværende klima (Gumbel Nu) og for fremtidigt klima (Gumbel DC) baseret på middel af klimamodellerne med delta change (DC) nedskaleringsmetode. Sandsynligheden 0.1 og 0.01 svarer til en henholdsvis 10 og 100 års hændelse

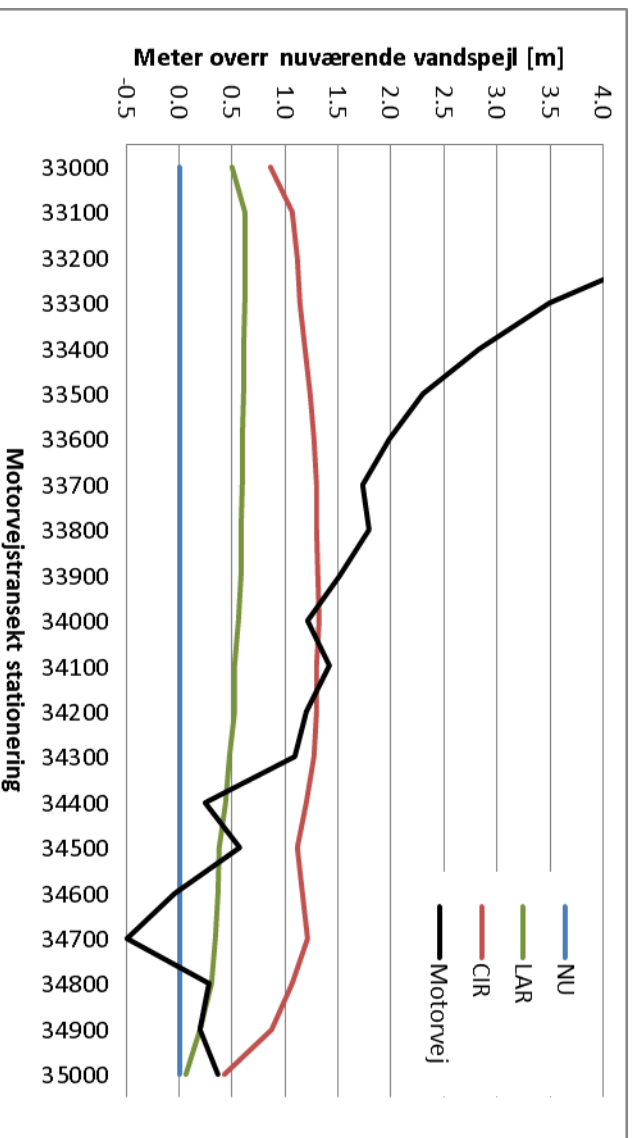
I analysen er det forudsat, at årlige maksima kan udvælges som ekstremværdi hændelser. Endvidere antages det, at disse maksima tilhører ekstremværdifordelingen Gumbel. Det bemærkes, at estimaterne på $GVS_{10,5}$, GVS_{21} , GVS_{50} og GVS_{100} er lavere end estimaterne i Troldborg et al. (2011). Dette bekræfter dels, at ekstremværdianalyserne er forholdsvis følsomme overfor om modellen simulerer et korrekt niveau af grundvandsspejlsfluktuationer og dels, at tallene i Troldborg et al. (2011) er for høje.

Test af simple infiltrations scenarier

Kommunerne skal frem mod udgangen af 2013 have udarbejdet klimatilpasningsplaner, som skal indeholde både et risikobillede og en handlingsplan for klimatilpasning. Indholdet af handlingsplanen for klimatilpasning vil variere fra område til område, men arbejdet med ændret regnvandshåndtering vil uden tvivl udgøre et væsentligt element i mange kommuner. I forbindelse med handlingsplaner for ændret regnvandshåndtering er der meget fokus på LAR løsninger. Lokal afledning af regnvand (LAR) dækker over, at regnvand, der falder på befæstede arealer, håndteres tæt ved kilden. Typisk ved at infiltrere det lokalt, men det kunne også være ved at udlede det til arealer eller bassiner, hvorfra det kan fordampe/infiltrere, eller hvor det kan skabe en rekreativ værdi. Håndteringen af regnvand tæt på kilden har det primære formål, at forhindre/reducere oversvømmelser, som følge af høj befæstelsesgrad.

Området af Silkeborg, hvor motorvejen vil skære igennem, er tidligere plaget af oversvømmelser i forbindelse med store regnhændelser, og der er gennemført et betydeligt arbejde med at udvikle regnaflednings systemet med forsinkelsesbassiner. Et sandsynligt klimatilpasningstiltag kunne derfor være at forsøge at få nye og eksisterende befæstede områder dækket af LAR løsninger. Der er derfor gennemført to screeningsscenarier for at belyse mulige konsekvenser af et sådant klimatilpasningstiltag (Randall et al. 2013).

Første scenarie (LAR) forudsætter en fuldt implementeret LAR løsning, hvor alt nedbør som falder indenfor alle eksisterende og fremtidige befæstede arealer indenfor oplandet forsøges infiltreret lokalt. Det andet scenarie (CIR – central infiltration af regnvand) belyser et LAR scenarie hvor alt regnvand opsamles via et regnvandssystem og ledes mod få centrale bassiner, herunder boldbanerne syd for motorvejen, hvorefter regnvandet søges infiltreret fra disse bassiner.



Figur 4 Scenarie beregninger for ændringer af middelgrundvandsstand under nuværende klima og to klimatilpasningsstrategier for ændret infiltrationspraksis

Scenarierne er beregnet for såvel nuværende klima som for fremtidigt klima, og de viser entydigt, at et fuldt udviklet LAR system kan få dramatiske konsekvenser for grundvandsniveauet (middelværdi) langs motorvej transektet, som vil yderligere forstærkes, hvis der vælges en løsning, hvor vandet infiltreres via bassinger pga mindsket fordampning ift den rene LAR løsningen (der er mindre areal at fordampe fra i bassin løsningen end i LAR løsningen). Der er ikke gennemført en formaliseret ekstremværdi analyse af de to scenarier, men der er umiddelbart ikke nogen forskel i relativ påvirkning som følge af fremtidigt klima, hvorved de beregnede ændringer i middel grundvandspejl (Figur 4) i praksis ville skulle adderes ekstremer fra Tabel 2, såfremt man ønsker en samlet vurdering af effekten på grundvandsektremer, som følge af LAR klimatilpasningstiltag og klimaforandringer.

Status for håndtering af online data

Cowi står for pejledatalogger håndtering og publicering af pejledata, så de er tilgængelige via internettet med login adgang. Data indgår dels i projekteringen af motorvejen til bestemmelse af design vandspejl, dels til opsætningen af den geologiske - og hydrologiske model, dels direkte til beregning af prognoser med den hydrologiske model under anvendelse af data assimilering (i HydroCast, se senere afsnit) og dels i forbindelse med dokumentation for vandstandspåvirkninger under og efter motorvejskonstruktionen gennem Silkeborg. I det nuværende format er pejledata knyttet via et excelark til boringsdata med projektnavngivne boringer, placering og indtagsinformation. Datatransport af pejledata mellem Cowi og GEUS er tilsvarende på excelark format. På trods af disse forhold har den eksisterende data transportform overvejende fungeret godt til formålet.

For at imødekomme kravet om opdateringsfrekvens til modelbaserede prognoser skal datatransport af pejledata mellem Cowi og GEUS automatiseres. Tilsvarende skal der sikres bedre sammenhæng mellem boringsdata og pejledata, dels for at gøre dokumentationen for vandstandspåvirkninger mere gennemskuelig, og dels for at sikre at samtlige pejledata og geologiske data bliver udnyttet fremover. For at data skal være ordentlig tilgængelig for den geologiske opdatering såvel som til data assimilering bør boringsdata indlægges i Jupiter databasen.

På tilsvarende vis står Orbicon for håndteringen af afstrømningsdata fra tre vandføringsstationer etableret som en del af motorvejsprojektet, samt for datatransport af vandstandsdata fra Silkeborg Langsø (indtil videre samarbejde med Forsyningen og manuelt tapning af data) og fra bassinet i Dyrehaven. Data indgår dels i kalibreringen af modellen og dels direkte i den hydrologiske modellering af prognoser. Data transporten er indtil videre forgået via mail korrespondance, hvilket har været tidskrævende men tilstrækkeligt ift. modelopsætning og kalibrering. DMI har efter en særaftale givet adgang til klimadata via NOVANA protalen. Fordampning og temperatur data har løbende været tilgængelige med 3 timers opløsning og med 2-12 ugers forsinkelse. Tilsvarende har nedbørsdata været tilgængelige med døgn opløsning og med 1-3 måneders forsinkelse. Formatet har været tilstrækkeligt ift opsætningen og kalibreringen af grundvandsmodellen.

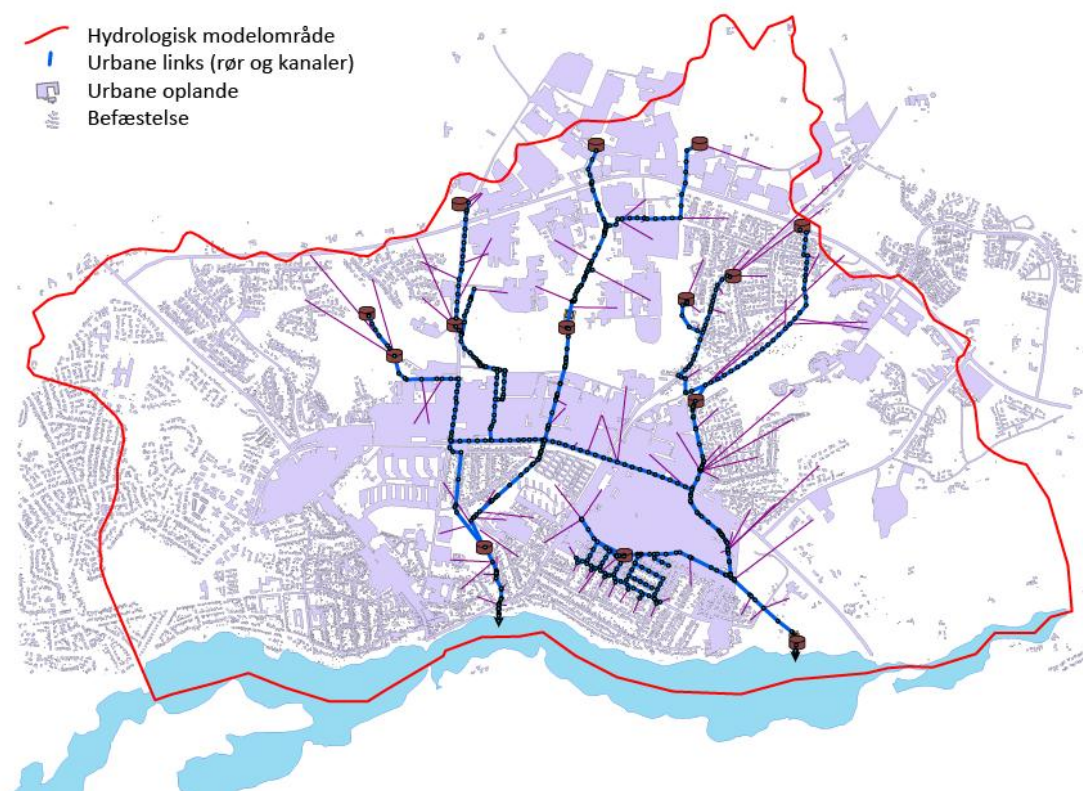
Der er etableret og testet strukturer for online dataudveksling med DMI, COWI og Orbicon. For DMI er aftalen etableret i HydroCast regi og berører time nedbør, mens COWI og Orbicon aftalerne er etableret i VD regi. Cowi har givet adgang til pejledata via en webservice løsning, mens Orbicon og DMI har givet adgang via en ftp server. Via HydroCast har vi i projektet fået adgang til DHI's MIKE Customized Decision Support Platform(DSS) til håndtering af bl.a. realtidsdata. På GEUS er der etableret en dedikeret serverløsning med en database service, der via DSS'en løbende vil kunne hente og organisere online data fra DMI, Orbicon og Cowi systemerne. I HydroCast projektet arbejdes der på at udvikle platformen (DSS) til at kunne eksekvere ensemble forecasting og data assimilering. Serverløsningen forventes at være operationel med daglige ajourføringer af datagrundlaget medio 2013.

Modelkobling af grundvandsmodellen (MIKE SHE) og regnvandshåndterings modellen (MIKE URBAN)

I løbet af efteråret 2012 blev den eksisterende hydrologiske model for fokusområdet ved Silkeborg, det topografisk opland for terrassemagasinet, koblet med den eksisterende model for afledning af regnvand i det urbane område nord for Langsøen (Figur 5). Regnafledningsmodellen er overdraget fra Silkeborg forsyning via Orbicon. Modelkoblingen er foretaget af GEUS i samarbejde med Orbicon, hvor GEUS har stået for selve modelkoblingen, mens Orbicon har udtrukket kortdata om befæstelse fra den eksisterende MIKE URBAN model samt generelt assisteret på MIKE URBAN delen af koblingen. Præliminære resultater fra den koblede model blev præsenteret mundtligt på en international videnskabelig konference i slutningen af 2012 (Kidmose et al., 2012). Fokus for præsentationen var optimering af simulerede trykniveauer som følge modelkoblingen i det urbane område.

Opstilling af koblet model

Koblingen af de to modeller foregår via udveksling af vandmængder ved fire forskellige typer. De fire typer er, udveksling mellem dræn (MIKE SHE) og Manholes (MIKE URBAN, opsamlings brønde), mellem overland flow (MIKE SHE) og Links (MIKE URBAN rør og kanaler), befæstede områder (MIKE SHE) og Manholes (MIKE URBAN), og endelig udveksling mellem den mættede zone (MIKE SHE) og Manholes/links (MIKE URBAN).



Figur 5 Modelområder for den hydrologiske model samt oplande for regnafledningsmodellen. Regnafledningsmodellen er overdraget fra Silkeborg forsyning via Orbicon Kortet viser de befæstede områder som indgår som MIKE URBAN oplande.

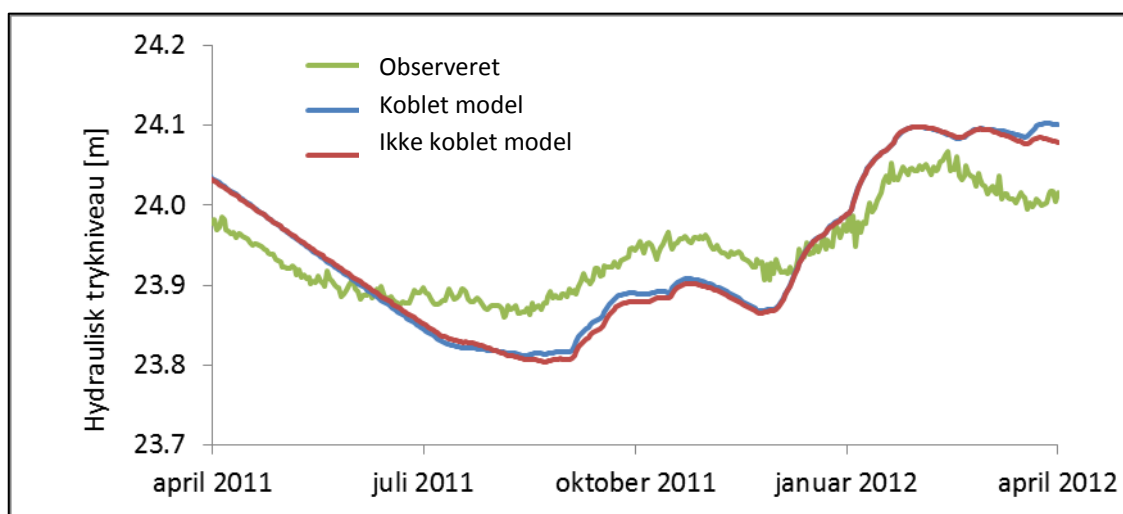
Koblingen af de to modeller opsættes via en instruktionsfil, som refereres i MIKE SHE opsætningen og den samlede kørsel foregår ved, at MIKE SHE kører et defineret tidsskridt, eksempelvis en time, hvorefter MIKE URBAN kører det antal MIKE URBAN tidsskridt, der svarer til MIKE SHE tidsskridtet, da MIKE URBAN tidsskridtene som regel er kortere. Efter hvert MIKE SHE tidsskridt beregnes udvekslingen mellem modellerne afhængigt af de simulerede forhold. Hvis eksempelvis grundvandsspejlet simuleres over et MIKE URBAN rør, vil grundvand strømme til kanalen i det givne tidsskridt. Ligeledes vil drænafstrømning tilføres de definerede opsamlingsbrønde for hvert tidsskridt. Beregningstiden for den nye koblede model er forøget betragteligt da MIKE URBAN modellen kører med en meget fin tidslig opløsning (maks. 10 sek.).

Et afgørende element i koblingen har været definition af nedbør, så den samlede mængde simuleres korrekt, men også at den områdevisse fordeling af nedbør til henholdsvis befæstede MIKE URBAN oplande og områder med grundvandsinfiltration simuleret af MIKE SHE er i overensstemmelse. I den eksisterende MIKE URBAN model er der til ethvert opland en vurderet befæstelsesgrad (foretaget af Silkeborg forsyning og Orbicon ved opstilling af modellen). Denne befæstelsesgrad er brugt til dannelse af et nyt kort, som angiver områder indenfor et MIKE URBAN opland med og uden nedbør til MIKE SHE modellen, sådan at den overordnede befæstelsesgrad for de enkelte MIKE URBAN oplande bibeholdes. I områder, hvor der ikke er defineret MIKE URBAN oplande, vil alle MIKE SHE celler modtage nedbør. Det nye kort er opstillet i samarbejde mellem Orbicon og GEUS.

Resultater

Den koblede model er på nuværende tidspunkt fungerende og resultater viser en klar forbedring af simulerede trykniveauer i terrassemagasinet. Årsagen til forbedringen findes i den bedre og mere systemkorrekte beskrivelse af nedbørsfordelingen mellem såkaldte grønne urbane områder og områder delvist eller fuldt befæstede. Den simulerede udveksling mellem den mættede grundvandszone, rør, kanaler og opsamlingsbrønde er minimal. Dette er forventeligt, da grundvandet kun i få områder står højt nok til at være i kontakt med afledningssystemet. Tilsvarende løber der kun små vandmængder (<5 l/s) mellem drænene i MIKE SHE modellen og opsamlingsbrøndene i MIKE URBAN modellem, hvilket også er forventet, da grundvandstanden kun i få områder ligger i niveau eller over de indlagte dræn (1 m under terræn), og dermed ses lav drænstrømning. Beregninger fra den koblede model viser at ca. 10 % af strømmingen i regnvands modellen kommer fra den mættede zone i MIKE SHE modellen og dræningen af denne. Modelresultater fra den ikke koblede MIKE SHE model viser samme minimale drænstrømning. Udveksling mellem overfladisk afstrømning (overland flow) og opsamlingsbrønde ses kun ved få steder, hvor værdier på godt 1 l/s optræder.

Den største effekt af koblingen er på nuværende tidspunkt de forbedrede simulerede trykniveauer, mindre årlige fluktuationer, som følge af implementering af de definerede oplande i MIKE URBAN modellen med tilhørende befæstelsesgrader. Implementering af befæstelsesgraden uden en direkte kobling af MIKE SHE og MIKE URBAN giver dog tilsvarende stor forbedring af simulerede trykniveauer (**Figur 6**).



Figur 6 Simulerede og observerede trykniveauer i terrassemagasinet (boring 3398_1)

Arbejdet med koblingen af MIKE URBAN og MIKE SHE modellerne har derfor været afgørende for opnåelse af en korrekt fysisk baseret grundvandsmodel, der kan efterligne de små årlige variationer i terrassemagasinet grundvandsspejl og dermed har implementeringen af MIKE URBAN konceptet til MIKE SHE modellen betinget en præcis estimering af fremtidige ekstremvandstande.

Bidrag fra HydroCast

Vejdirektoratet og GEUS indgår som partnere i forskningsprojektet HYDROCAST, som har fået en bevilling på 14,9 millioner kr. fra Det Strategiske Forskningsråd (DSF) for perioden 2012-2015. Formålet med HYDROCAST er at udvikle og teste metodikker og værktøjer til real-tids prognoser og opdatering af hydrologiske modeller med feed-back fra feltdata (data assimilerings) så der sker en integration af on-line data, radar målinger og hydrologiske modeller. HYDROCAST ledes af Professor Henrik Madsen, DHI. Silkeborg motorvejen indgår som ét af tre test cases i HYDROCAST, hvor PhD studerende bl.a. vil udvikle og teste værktøjer til at lave real-tids prognoser for grundvandsstand og vandløbsafstrømning ved Silkeborg motorvejen.

HYDROCAST projektaktiviteter forudsætter anvendelse af modelværktøjer, som i forvejen udvikles i VD-GEUS projektet. Nogle af VD-GEUS projektaktiviteterne indgår derfor som medfinansiering i HYDROCAST. Hovedelementerne og de gensidige fordele ved dette samarbejde er følgende:

- I det omfang der er et sammenfald mellem aktiviteter i VD-GEUS projektet og HYDROCAST aktiviteter, optræder omkostningerne hertil som VD medfinansieringen overfor DSF. Disse aktiviteter har i Fase 1 omfattet udvikling af grundvandsmodellen og udvikling af MIKE SHE – MIKE URBAN koblingen. Endvidere bliver data fra projektet (pejlinger, vandføringsdata) anvendt i HYDROCAST til testkørsler med prognosemodeller.
- Samspillet fortsætter i VD-GEUS projektet's Fase 2 med monitorering og modelanalyser i forbindelse med anlægsarbejdet. Endvidere vil VD finansiere en lokal radar som AAU skal implementere i Silkeborg for at samkøre vidensopbygning ved brug af vejrradar i anlæg og drift for VD.

HYDROCAST bidrager til VD-GEUS samarbejdet med følgende:

- Nedbørsdata fra DMI og AAU.
- Ekstra tests af grundvandsmodel gennemført af HYDROCAST PhD studerende.
- Erfaringer med håndtering og kvalitetskontrol af on-line data og vejrprognoser ved vejanlæg.
- Erfaringer med real-tidsprognoser ved vejanlæg, som kan bidrage til vurderinger af hvorvidt real-tids prognoser kan have interesse for VD.

Vurdering af opnåede resultater

Grundvandsmodellen er, for så vidt angår geologiske strukturer, ikke væsentligt ændret siden første status rapport (Trolborg et al. 2011), men alligevel er modelresultaterne hvad angår grundvandsektremer af noget mere dæmpet karakter end tidligere simuleret. Dette skyldes i høj grad inddragelsen af længere tidsserier med trykniveau observationer, hvilket har muliggjort mere detaljeret kalibrering af dynamik følsomme parametre. Et andet væsentligt bidrag til den ændrede model dynamik stammer fra mere detaljeret og mere fysisk stringent beskrivelse af regnvandshåndtering i det urbane rum, hvilket har været kraftigt inspireret af arbejdet med MIKE URBAN koblingen.

Klimafremskrivnings beregningerne viser, at de ekstreme grundvandsstande vil være i størrelses ordenen 1 - 1,5 meter over middel grundvandsstand påvirkninger for en 100 års hændelse med et 95% konfidensinterval på en halv meter. Det væsentligste bidrag til usikkerheden på estimatet stammer fra ekstremværdi analysen. I beregningen af konfidensintervallet er der ikke taget hensyn til usikkerhed på geologi eller modelparametre. Hertil kommer, at arbejdet med koblingen af grundvandsmodellen og den urbane model har vist, at regnhåndteringen og beskrivelsen af denne i modellen har forholdsvis stor betydning for resultaterne. LAR scenarierne understreger dette og indikerer samtidigt, at klimatilpasnings strategier kan få væsentlig indflydelse på grundvandsspejlets placering i fremtiden.

Sammenligning af simuleringer af grundvandsvariationer for koblet og ikke-koblet model under anvendelse af døgnedbør, sammenholdt med den betragteligt forøgede beregningstid for den koblede model betyder, at arbejdet med at koble modellen til MIKE URBAN er sat på pause. Et fremtidigt perspektiv med en grundvandsmodel koblet med MIKE URBAN kunne være bedre vurderinger af integrerede oversvømmelser. Kritiske og ikke-testede elementer, i forhold til simulering af ekstrem situationer for integrerede oversvømmelser, inkluderer formodentligt at den koblede model har tilstrækkelig præcis fysisk beskrivelse af ledningsnettet og forsinkelsesbassiner, herunder en tilstrækkelig konsistent topografisk model for lavninger, hydrologiske barrierer og –underføringer. Udvikling af egentligt varsling vil ydermere kræve on-line data håndtering og kapacitet indenfor dataassimilering, hvilket er væsentlige elementer i HydroCast projektet.

Referencer

Kidmose JB, JC Refsgaard, L Trolborg, LP Seaby & MM Escrivà. 2013. *Climate change impact on groundwater levels: Ensemble modelling of extreme values*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, 1619–1634

Randall M, L Trolborg, JC Refsgaard, JB Kidmose. 2013. *Assessing urban groundwater table response to climate change and increased stormwater infiltration*. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 28, 33–36

Trolborg L, JC Refsgaard, JB Kidmose, MM Escrivà & P Nyegaard. 2011. *Grundvandsmodel for motorvejsstrækning gennem Silkeborg. Statusrapport fase 1.1 og 1.2*. GEUS rapport 2011/136.

Appendix 1: Notat om modelopdatering sommer 2012 og genberegnet ekstremværdi-analyse, Funder-Hårup motorvejen

Lars Trolborg, Jacob Kidmose, Jens Christian Refsgaard og Mark Randall, GEUS 29-10-2012

Baggrund og formål

GEUS foretog beregninger af dimensioneringsgrundlaget som rapporteret i Statusrapporten for fase 1.1. og 1.2 (Trolborg et al., 2011). Disse beregninger havde nogle erkendte svagheder, der bl.a. kom til udtryk ved at modellen simulerede alt for store vandspejls fluktuationer. Dette blev i første omgang imødegået ved at lave en simpel amplitude korrektion i ekstremværdianalysen af grundvandsspejl ændringer (Refsgaard et al. 2012).

GEUS har i den mellemliggende periode opdateret model grundlaget på følgende punkter:

- En ændret konceptualisering af afstrømning fra befæstede arealer og en efterfølgende omkalibrering af modellen.
- En revision af grundlaget for den ene nedskaleringsmetode (HE), som var unøjagtig på punktskala. Ændringerne var primært orienteret omkring nedbørs estimatet, men påvirkede også temperatur - og evapotranspiration estimateterne.

GEUS har, som i notatet om amplitude korrektion (Refsgaard et. 2012), ændret på ekstremværdi analysen ift. analysen fra statusrapporten (Trolborg et al. 2011) på følgende punkter:

- Ekstremværdi analysen er gjort relativ i forhold til nuværende situation ved eksplicit at angive forskelle mellem maksimale grundvandsstande opgjort på 10, 20, 50 og 100 års hændelser for det fremtidige klima i forhold til middel af nuværende klima (spørgsmål af typen: hvor stor er en fremtidig 50 års hændelse i forhold til nuværende grundvandstand). I Trolborg et al. (2011) var der beregnet relative ændringer af ekstremværdi hændelser (spørgsmål af typen: hvor meget større end nuværende 50 års hændelse bliver en 50 års hændelse i fremtiden?).
- En mere systematisk præsentation af usikkerhedsangivelser, hvor effekten af de forskellige usikkerhedskilder kombineres, i stedet for som i Trolborg et al. (2011) at angives hver for sig.

Modelmodifikationer

Der er lavet enkelte model modifikationer i forhold til modellen anvendt i Troldborg et al. (2011). Formålet med modelmodifikationerne er dels at rette småfejl fundet i opsætningen og dels at sikre bedre overensstemmelse mellem opsætningen af grundvandsmodellen og opsætningen anvendt i den urbane model (Orbicon/Forsyningen).

Ændret beskrivelse af vandaflledning fra befæstede arealer.

Indledende øvelser med ændret beskrivelse af den urbane overfladiske afstrømning viste, at grundvandets dynamik kunne påvirkes væsentligt. Modelteknisk bliver nedbøren for hvert tidsskridt lagt på overfladen, hvorefter vandet enten bliver tilgængelig for infiltrationen til rodzonen eller afledes direkte til kloak/vandløb. Andelen af nedbør, der nedsiver til rodzonen, er afhængigt af vandmætningen i rodzonen, således, at der ved fuldt mættede forhold genereres topografisk styret overfladisk afstrømning til kloak/vandløb. Ved tidligere afrapporteringer er det beskrevet, at en 1/3 af nedbøren over befæstede arealer afledes direkte til kloak/vandløb. De befæstede arealer var opgjort som alle bebyggede grunde og vejnet. I den reviderede udgave har GEUS taget udgangspunkt i et grundkort over placering af huse, veje og andre impermeable strukturer udarbejdet af Orbicon. Kortet beskriver arealinformationerne via polygoner. Kortet er transformeret til et grid format anvendeligt for modellen, og efterfølgende tjekket/tilrettet således at befæstelsesandele på mindre deloplande er af samme størrelse som for grundkortet. Anvendelse af det ændrede befæstelseskort har gjort det muligt dels at opnå ganske differentierede andele af nedbøren pr opland, som skulle afledes direkte til kloak/vandløb, og dels at indlægge impermeable zoner i modellen i de befæstede grid og derved gennem opnå en alternativ, men mere fysisk korrekt beskrivelse af det urbane område. Konsekvensen af dette arbejde er desuden en reduktion af infiltrationen indenfor det urbane område, hvilket har en dæmpende effekt på grundvandsdynamikken i modelsimuleringerne. Sammenligning af observerede og simulerede data fra tidligere modeller viser at selv mindre regn episoder medførte påvirkning af simuleret trykniveau i grundvandsmagasinet, mens det observerede trykniveau ikke viser tilsvarende respons på selv mindre regn episoder. Den nye model viser et væsentligt mere afdæmpet respons i det simulerede trykniveau.

Indarbejdelse af informationer fra 1:25.000 jordartskortet

Den geologiske model er blevet opdateret med informationer om fordeling af sand, ler og tørv fra jordartskortet 1:25.000. Kortet er transformeret til model grid format og simplificeret til de tre geologiske enheder og indlagt i modellen som geologiske linser af 2 meter tykkelse. Hydraulisk set er de enkelte linser sand og ler parametriseret identisk med henholdsvis terrasse-sand (TS) og kvartært ler (KL) fra Troldborg et al. (2011), mens tørv er fastlåst mod KL i forholdet 1:10 for så vidt angår hydrauliske ledningsevner.

Justering af randbetingelser

Randbetingelserne er ændret i forhold til Troldborg et al.(2011), således at der fra 100 m modellen kun udtrækkes tidsvarierende trykniveau betingelser til de Kvartære magasiner (lag 2) og de Prækvartære enheder (lag 3) til den detaljerede model, samt at disse ikke påføres tæt ved Silkeborg Langsø og Gudenåen. Ændringen er gennemført for at undgå sammenfaldende rande mellem de overordnede 500 meter og 100 meter modeller og den detaljerede model.

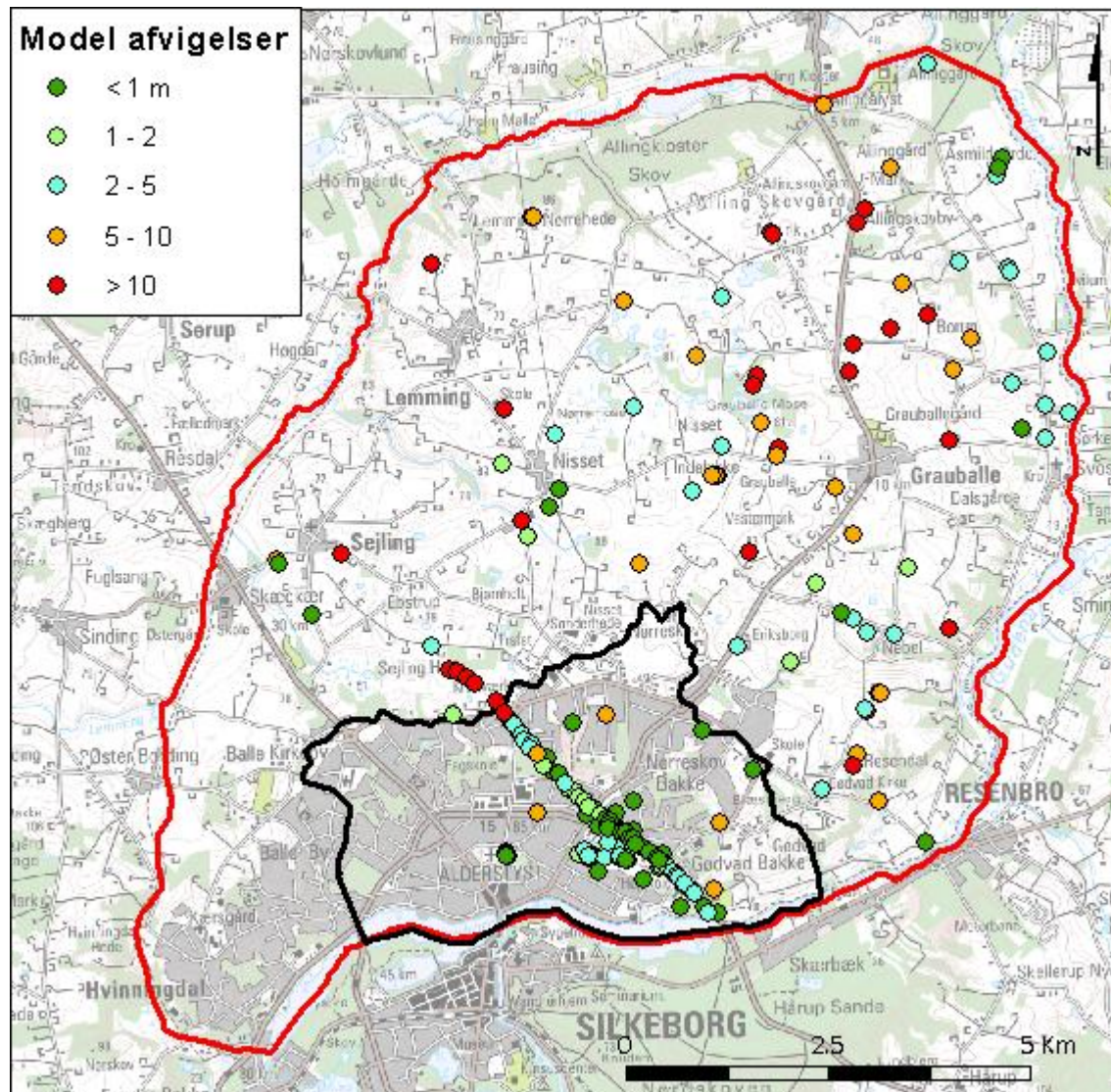
Model kalibrering

Re-kalibreringen af modellen har haft det primære formål at forbedre modellens evne til at simulere grundvandsdynamik langs det projekterede motorvejs transekt. I forhold til kalibreringen i Troldborg et al. (2011) er objektivfunktionen ændret således, at der vægtes indgår fejl på middelrykniveau (*hts_me*) og amplituden på grundvandsfluktuationen fra pejledata (*hts_errampl*) langs det projekterede transekt (35 filtre med observationer fra 2010 og frem, midlet på døgnniveau). Ydermere indgår vægtede afvigelser fra Jupiter database pejledata med middelværdi for 1990-2011 (*mean_hobs*) og vægtede vandbalancefejl for de fire nye vandføringsstationer på sæson niveau i kalibreringen (*mfbal_120102*, *mfbal_030405*, *mfbal_060708*, *mfbal_091011*). Kalibreringen er også udvidet i forhold til Troldborg et al. (2011) således at parametre til beskrivelse af frie og spændte magasintal samt en parameter for overflade magasinering har indgået i kalibreringen. Herudover er det under kalibreringen inddraget vertikal-horisontal anisotropi forhold ift. hydraulisk ledningsevne i Terressemagasinet. Som ved tidligere kalibreringer af modellen er parametergruppen rodzone og umættet zone hentet fra DKmodel2009 Midtjylland. Ligesom under kalibreringen i Troldborg et al. (2011) er der indlagt zoner omkring boring 3368, 3399 og 3456, som er blevet prøvepumpet, med en K-værdi fundet ved tolkning af prøvepumpningerne på $1,15 \cdot 10^{-3}$ m/s. Zonernes hydrauliske ledningsevne indgår derfor ikke i kalibreringen. Objektiv funktionen er angivet i Bilag 2.

Modellen er kalibreret for perioden 2010 – 2012, men da erfaringer har vist, at der kan gå lang tid før effekten af en ændring i en parameterværdi er slået fuldt igennem, er det valgt at anvende perioden 1990-2009 som opvarmningsperiode for modellen. Under antagelse af linearitet omkring optimale kalibreringsparametre kan der udregnes 95% konfidensintervaller for disse. Der er efterfølgende lavet sensitivitets analyse på modellens parametre, resultatet fremgår af Bilag 3.

Det optimerede parametersæt giver større afvigelser på trykniveauer end der tidligere er af-rapporteret i Troldborg et al. (2011), mens afvigelsen på amplitudeniveau og vandbalance er væsentligt mindre. Generelt ses det af Figur 1, at de mindste trykniveau afvigelser er langs motorvejs transektet, mens der i resten af oplandet er større afvigelser. Der synes ikke umiddelbart at være nogen trend i afvigelserne. I områder med stor topografisk gradient, f.eks.

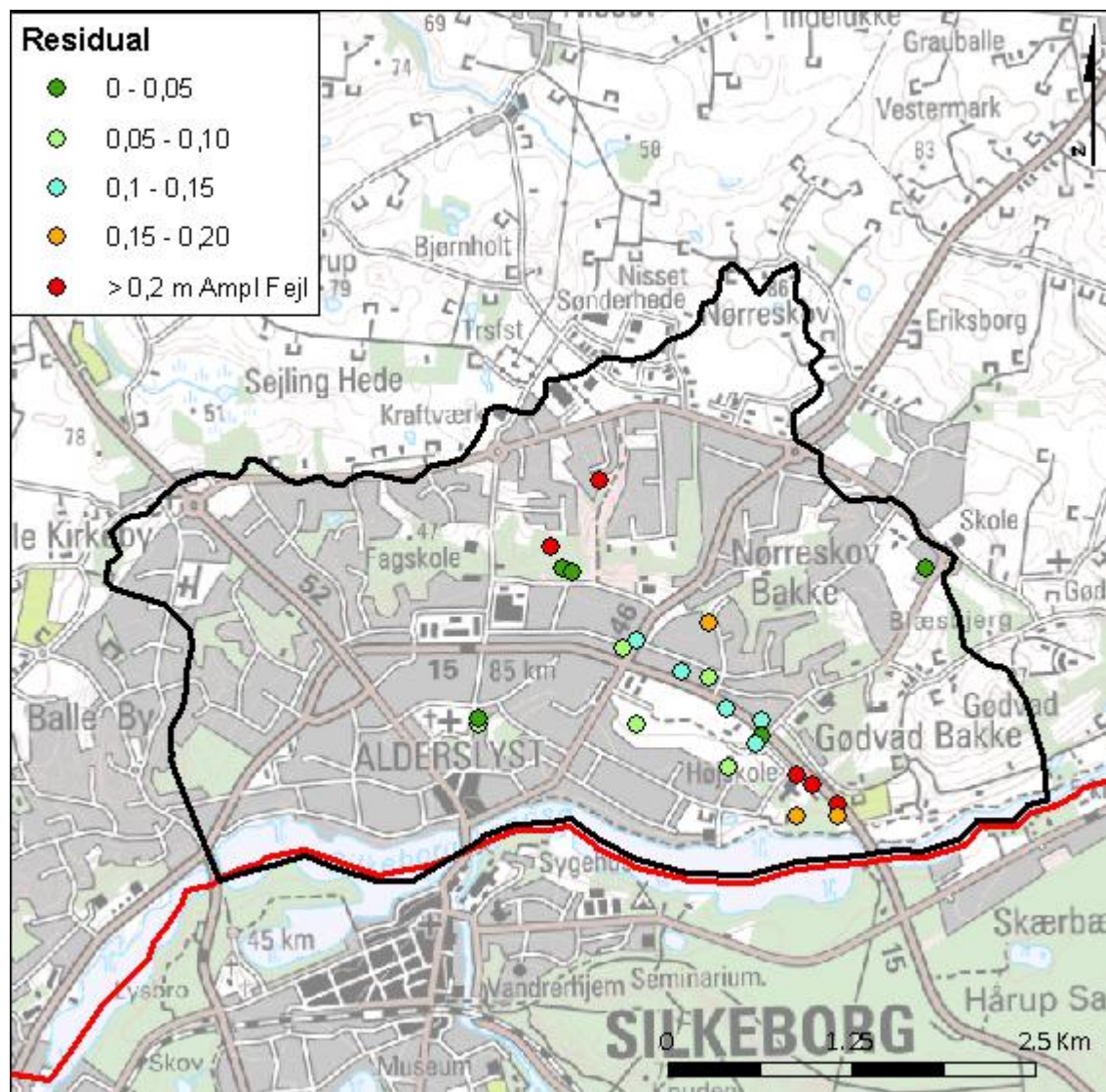
langs skræntzonen, er der en tendens til større afvigelser end i de fladere områder. Flere boringer i Dyrehaven afviger med mere end 10 m fra observerede trykniveauer. Dette kan skyldes at modellen ikke opløser den topografiske variation tilstrækkeligt indenfor disse områder, men det kan også skyldes, at den geologiske model ikke er tilstrækkelig detaljeret i disse områder. Det er umiddelbart plausibelt, at skræntzonerne mod Søholt-terrassemagasinet har en højere grad af geologisk heterogenitet, end den resterende del af området, men da der er ganske få boringer, der beskriver denne zone, er det sandsynligt at den geologiske model er mindre præcis her.



Figur 1 Modellens evne til at simulere målte grundvandspotentialer

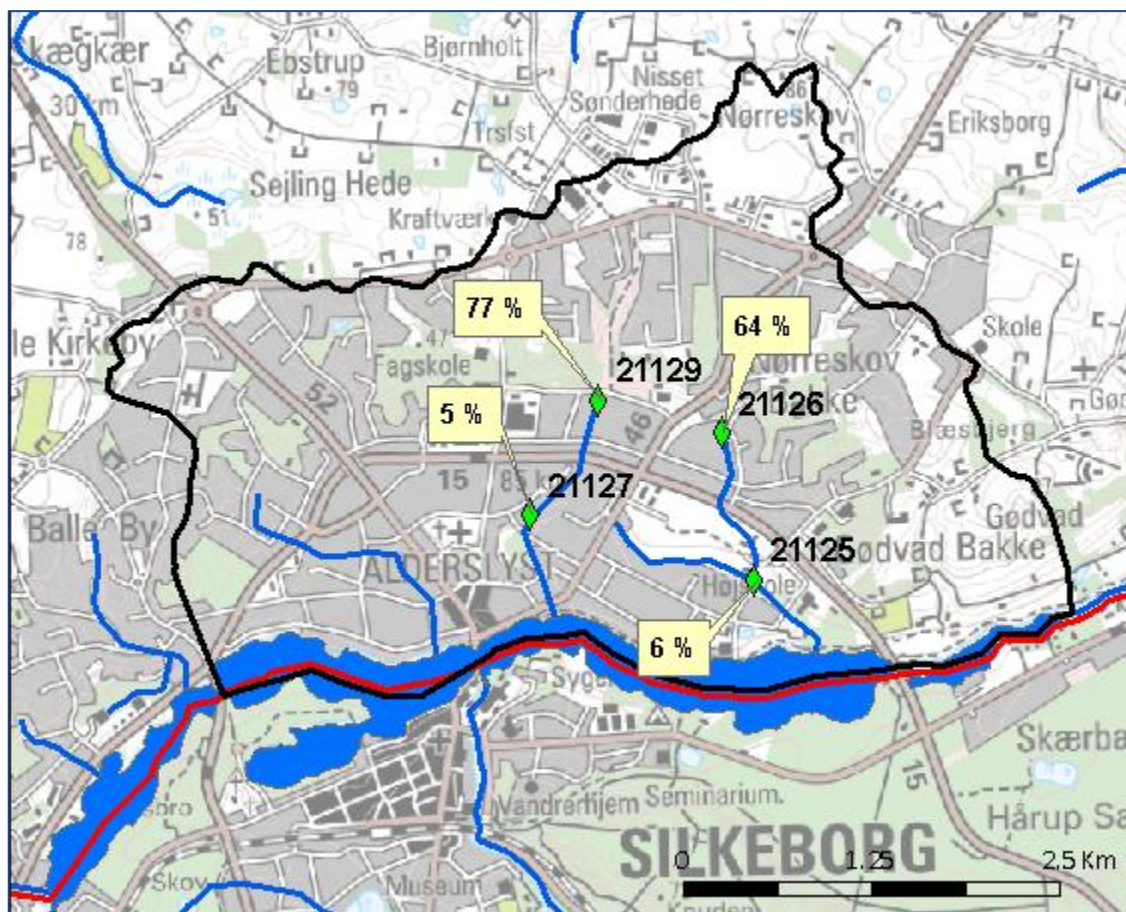
Observationernes gennemsnits amplitude for perioden 1/1-2010 til 6/5-2012 er 11 cm. For modellen anvendt i Troldborg et al. (2011) og i Refsgaard et al. (2012) er der fundet en gennemsnits amplitude på 41 cm. Den reviderede og re-kalibrerede model har en gennemsnits amplitude på 20 cm for samme periode med generelt små afvigelser (Se tabel i bilag 1). Resultatet er en klar forbedring af den modelerede amplitude sammenholdt med den observerede Amplitude afvigelserne på de enkelte boringer er opgjort i Bilag 1 og visualiseret på nedenstående

ende Figur 2, hvoraf det fremgår at specielt området tæt ved søen og ved Dyrehaven er påvirket af svingninger i grundvandsspejlet som modellen ikke kan reproducere. Begge område må antages i betydeligt omfang at være påvirket af grundvandsstrømninger fra prækvartæret.



Figur 2 Numeriske amplitude afvigelser for de filtre som har mere end ti enkelt pejl i perioden 2010-2012

Modellens evne til at simulere vandafstrømningen er illustreret på oversigtskortet, Figur 3, hvor afvigelserne på vandgennemstrømningen fra 2010 til 2012 er angivet på stationsniveau. De to nedstrøms stationer rammer bedre for så vidt angår vandbalance end de to opstrøms stationer.

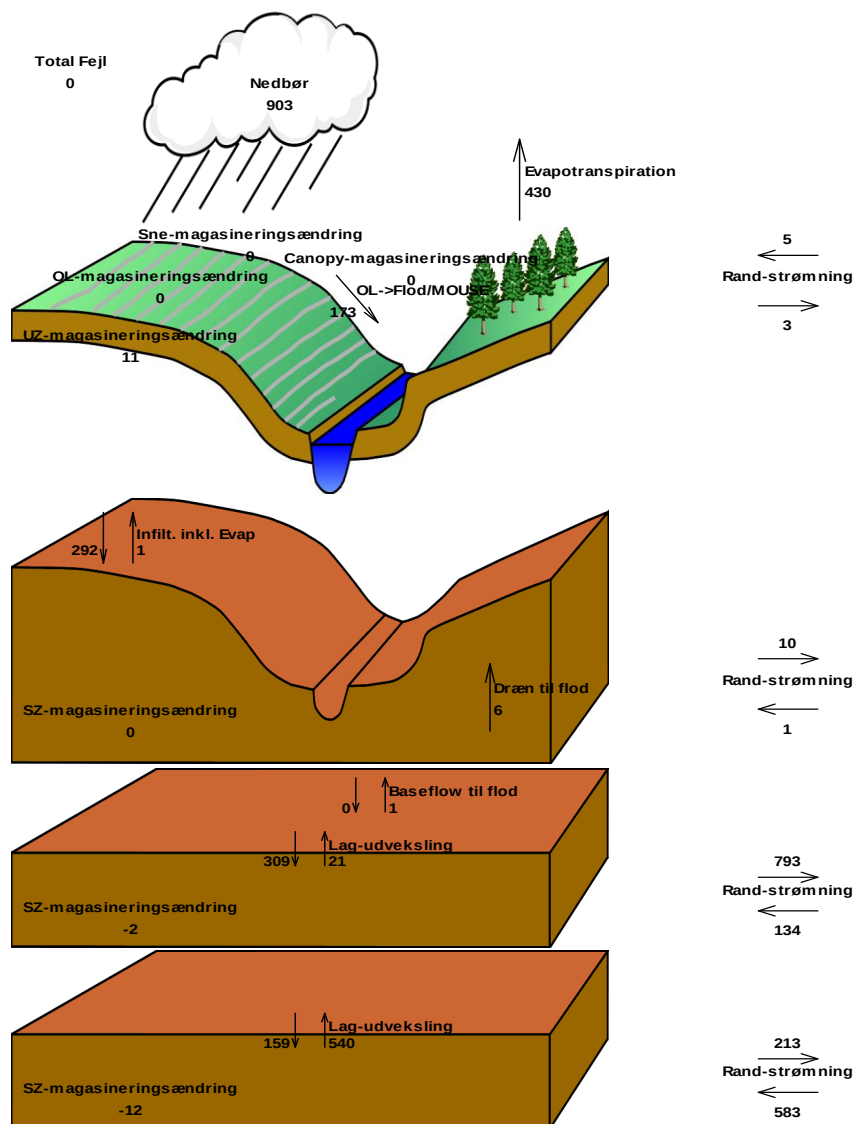


Figur 3 Simulerede vandbalance afvigelser på stationsniveau

De simulerede hydrografer (Bilag 4) har typisk højere peaks og er af kortere varighed end de målte, hvilket kan skyldes at modellen ikke arbejder med opmagasinering eller strukturer i vandløbssystemet. Der er ikke gjort forsøg med kalibrering af vandløbssystemets parametre som følge af disse forhold. Strukturer og magasiner/søer bliver indarbejdet i modellen i forbindelse med koblingen af grundvandsmodellen med Orbicons Mike Urban opsætning

Vandbalance

Den modelberegnete vandbalance for det topografiske opland til Søholt terrassemagasin (fokusområdet, 20 m modellen) ses af Figur 4. Vandbalancen viser, at en forholdsvis lille del af nedbøren strømmer af via vandløb. Den viser også en tilstrømning til området fra prækvartæret (lag 3) er af samme størrelsesorden som nettonedbøren, og at næsten alt udstrømningen fra området sker via randen (udstrømning fra Terrassemagasinet i lag 2 til Silkeborg Langsø).



Akkumuleret vandbalance fra 02-05-2009 12:00:00 til 01-05-2012 12:00:00. Datatype : Storage depth [millimeter].
 Flow-resultatfil : F:\DHI\data\silkeborg\linv100m07optim\Moto100m_07optim.she - Result Files\Moto100m_07optim
 Titel : Motorvej fase2 rekalkulering Tekst : Baseret paa opdateret geologi version 3 - initial kalibrering af paved area fra

Figur 4 Vandbalance for topografisk opland til Terrassemagasinet

Afstrømningen til vandløb udgør ca. 1/3 af nettonedbøren, hvilket stemmer rimeligt overens med befæstelsesgraden. Der er tilsyneladende ikke den store udveksling mellem grundvand og vandløb. Det ganske betydelige bidrag til vandbalancen fra de omkringliggende prækvarter enheder gør det vanskeligt at vurdere vandbalancen på baggrund af målinger i vandløbssystemet. Tilstrømningen af vand fra prækvarteret til området virker umiddelbart realistisk i betragtning af koten for Terrassemagasinet.

Modelusikkerhed

Til vurdering af modelusikkerheden er der gennemført en analyse af fluktuationer og midelværdi af grundvandsspejl opgjort for de enkelte zoner langs transektet; resultatet af analy-

sen er opsummeret i Tabel 1. Det bemærkes at modellen til trods for modelforbedringerne overestimerer amplituden for alle zoner på nær zone 35000, og at der tilsyneladende ikke er en sammenhæng mellem middel tryk afvigelser og amplitude fejl. Der er i opsummeringen kun medtaget filtre med mere end 10 enkelt observationer ved sammenligningen, således er ikke alle zoner opgjort i sammenligningen.

Tabel 1 Model afvigelser i forhold til observationer opsummeret pr. zone

	32500	32700	33400	33800	33900	34200	34500	34900	35000	35200	35300
Model amplitude [m]	0,24	0,18	0,18	0,19	0,20	0,21	0,23	0,27	0,19	0,22	0,19
Observeret amplitude [m]	0,09	0,12	0,05	0,06	0,23	0,15	0,22	0,16	0,23	0,10	0,07
Middel tryk afvigelse [m]	0,08	2,12	-1,25	-0,83	-0,31	0,50	1,04	2,80	2,78	5,53	6,73

Klimafremskrivninger og usikkerhedsvurderinger

Klimafremskrivnings beregningerne er gennemført for de 9 klimamodeller og de 2 nedskaleringer som angivet i Troldborg et al. (2011). Vi har herefter estimeret middelværdien af ekstreme grundvandsspejl som middel af de 9 klimamodeller og de 2 nedskaleringer. Til dette tal skal adderes GVS_{middel} (fx skønnet ud fra målte værdier) for at opnå et grundvandsspejl i absolut kote. Det er ikke fundet rimeligt at lave en korrektion som følge af dårligt simulerede grundvandsfluktuationer i modsætning til i Refsgaard et al. (2012), dels fordi modellen i gennemsnit rammer forholdsvis tæt på observerede, og dels fordi der er bedre balance mellem for høje og for lave amplitude estimater for de målte zoner.

Der er beregnet usikkerhed på middelværdien svarende til følgende tre fejlkilder som vi vurderer, er de væsentligste. Vi karakteriserer usikkerheden ved følgende tre standardafvigelser:

- **Klimamodeller** ($\sigma_{\text{klimamodel}}$). Forskellen mellem centralt skøn og øvre 95% estimerer svarer til $1,96 \sigma_{\text{klimamodel}}$.
- **Nedskalering** ($\sigma_{\text{nedskalering}}$). Standardafvigelsen beregnes ud fra de to estimater fra HE og DC.
- **Ekstremværdianalyse** (σ_{EVA}). Forskellen mellem centralt og øvre 95 % estimat i Gumbel beregningerne fra HE og DC svarer til $1,96 \sigma_{\text{EVA}}$.

Under forudsætning af at de tre fejlkilder er indbyrdes uafhængige, kan vi beregne den samlede standardafvigelse ved fejlafhobningsloven:

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{\sigma_{\text{klimamodel}}^2 + \sigma_{\text{nedskalering}}^2 + \sigma_{\text{EVA}}^2}$$

hvorefter øvre og nedre 95% konfidensgrænse beregnes ved at tillægge eller fratrække $1,96 \sigma_{\text{total}}$ i forhold til middelværdien.

Tabel 2 Usikkerhedsbidrag fra delkomponenter. Samlet standard afvigelse estimeret under antagelse af uafhængighed mellem delkomponenter

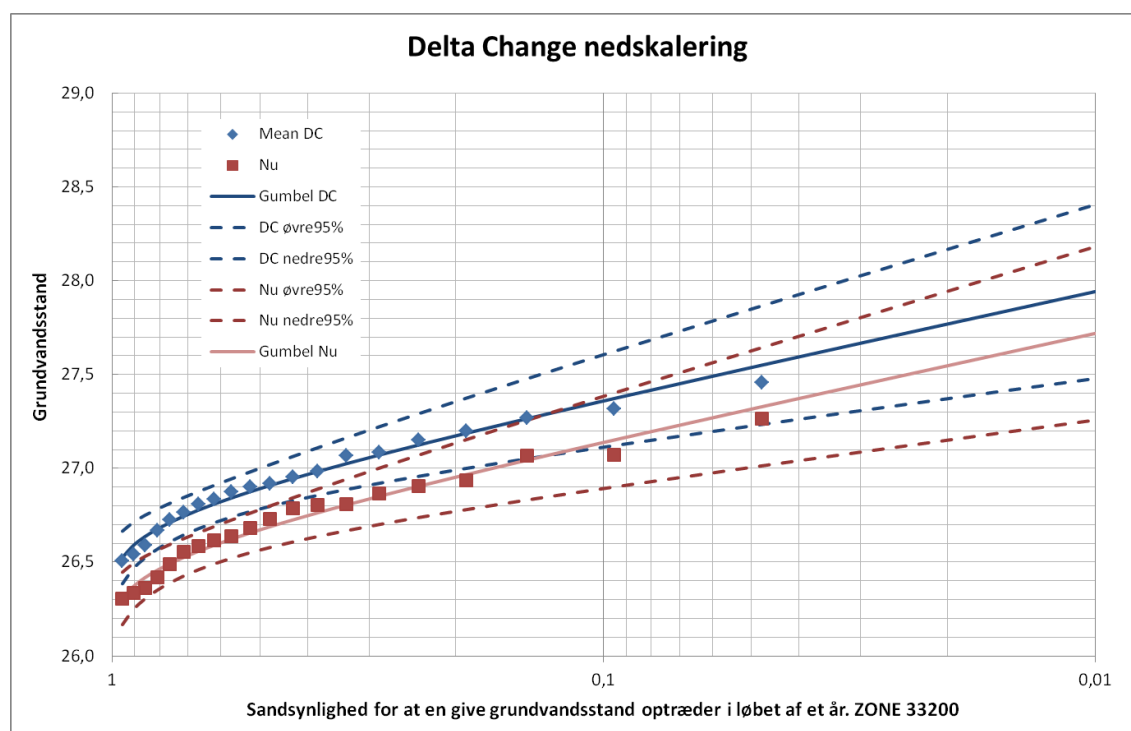
Zone	σ Ekstremværdi analyse				σ Klimamodeller				σ Nedskalering				Samlet standard afvigelse			
	10,5	21	50	100	10,5	21	50	100	10,5	21	50	100	10,5	21	50	100
33000	0,12	0,15	0,19	0,22	0,14	0,15	0,15	0,15	0,08	0,08	0,08	0,08	0,20	0,22	0,25	0,28
33100	0,13	0,16	0,20	0,24	0,14	0,14	0,15	0,15	0,07	0,07	0,07	0,07	0,21	0,23	0,26	0,29
33200	0,13	0,16	0,20	0,24	0,14	0,14	0,15	0,15	0,07	0,07	0,07	0,07	0,21	0,23	0,26	0,29
33300	0,12	0,16	0,20	0,23	0,14	0,14	0,14	0,14	0,06	0,06	0,07	0,07	0,20	0,22	0,25	0,28
33400	0,12	0,15	0,19	0,22	0,13	0,14	0,14	0,14	0,06	0,06	0,06	0,06	0,19	0,21	0,24	0,27
33500	0,12	0,15	0,19	0,22	0,14	0,14	0,14	0,14	0,06	0,06	0,06	0,06	0,19	0,21	0,25	0,27
33600	0,12	0,15	0,19	0,22	0,13	0,13	0,13	0,14	0,06	0,06	0,06	0,06	0,19	0,21	0,24	0,26
33700	0,12	0,15	0,19	0,22	0,13	0,14	0,14	0,14	0,06	0,06	0,06	0,06	0,19	0,21	0,24	0,27
33800	0,12	0,15	0,18	0,21	0,13	0,13	0,13	0,13	0,06	0,05	0,05	0,05	0,18	0,20	0,23	0,26
33900	0,12	0,15	0,19	0,22	0,13	0,13	0,13	0,13	0,06	0,05	0,05	0,05	0,18	0,21	0,24	0,26
34000	0,12	0,15	0,18	0,21	0,13	0,13	0,13	0,13	0,05	0,05	0,04	0,04	0,18	0,20	0,23	0,25
34100	0,11	0,14	0,18	0,21	0,12	0,12	0,12	0,12	0,04	0,04	0,04	0,03	0,17	0,19	0,22	0,25
34200	0,12	0,15	0,18	0,21	0,12	0,12	0,13	0,13	0,04	0,04	0,03	0,03	0,17	0,20	0,23	0,25
34300	0,12	0,15	0,18	0,21	0,12	0,12	0,12	0,12	0,04	0,03	0,02	0,01	0,17	0,19	0,22	0,25
34400	0,11	0,14	0,17	0,20	0,11	0,11	0,11	0,11	0,03	0,02	0,01	0,01	0,16	0,18	0,21	0,23
34500	0,11	0,14	0,17	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,02	0,01	0,01	0,02	0,15	0,17	0,20	0,22
34600	0,11	0,14	0,18	0,21	0,10	0,10	0,10	0,10	0,01	0,00	0,02	0,03	0,15	0,17	0,20	0,23
34700	0,12	0,15	0,19	0,22	0,10	0,10	0,10	0,09	0,01	0,00	0,02	0,04	0,15	0,18	0,21	0,24
34800	0,11	0,14	0,18	0,20	0,09	0,09	0,09	0,08	0,00	0,02	0,04	0,05	0,14	0,17	0,20	0,23
34900	0,10	0,12	0,15	0,18	0,06	0,06	0,06	0,06	0,02	0,03	0,05	0,07	0,12	0,14	0,17	0,20
35000	0,07	0,09	0,12	0,14	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,06	0,07	0,09	0,11	0,13	0,16

Tabel 3 Relativ forøgelse af grundvandsstand i forhold til nuværende niveau

Zone	Centralt estimat				Øvre 95 %				Nedre 95 %			
	10,5	21	50	100	10,5	21	50	100	10,5	21	50	100
33000	0,86	1,02	1,22	1,38	1,25	1,46	1,72	1,93	0,46	0,58	0,73	0,84
33100	0,92	1,10	1,32	1,50	1,33	1,55	1,84	2,06	0,52	0,65	0,81	0,93
33200	0,93	1,11	1,33	1,50	1,33	1,55	1,84	2,07	0,53	0,66	0,82	0,94
33300	0,89	1,07	1,28	1,45	1,28	1,50	1,77	2,00	0,51	0,64	0,79	0,90
33400	0,87	1,04	1,24	1,41	1,24	1,45	1,72	1,93	0,49	0,62	0,76	0,88
33500	0,88	1,05	1,26	1,42	1,26	1,47	1,74	1,95	0,50	0,63	0,78	0,89
33600	0,87	1,03	1,23	1,39	1,23	1,44	1,70	1,91	0,50	0,62	0,77	0,88
33700	0,88	1,05	1,25	1,42	1,25	1,46	1,73	1,94	0,51	0,63	0,78	0,89
33800	0,85	1,01	1,21	1,37	1,21	1,41	1,67	1,87	0,50	0,62	0,76	0,86
33900	0,87	1,03	1,23	1,39	1,23	1,43	1,69	1,90	0,51	0,63	0,77	0,88
34000	0,86	1,02	1,22	1,37	1,21	1,41	1,66	1,87	0,51	0,63	0,77	0,88
34100	0,85	1,01	1,20	1,36	1,19	1,39	1,64	1,84	0,51	0,63	0,77	0,88
34200	0,87	1,03	1,23	1,38	1,21	1,41	1,67	1,88	0,52	0,65	0,79	0,89
34300	0,87	1,03	1,22	1,38	1,20	1,40	1,65	1,86	0,53	0,65	0,79	0,90
34400	0,83	0,99	1,17	1,32	1,14	1,34	1,58	1,78	0,52	0,64	0,77	0,87
34500	0,84	0,99	1,18	1,33	1,13	1,33	1,57	1,77	0,55	0,66	0,79	0,89
34600	0,88	1,04	1,23	1,38	1,18	1,38	1,63	1,83	0,59	0,70	0,83	0,93
34700	0,95	1,12	1,32	1,48	1,26	1,47	1,74	1,96	0,65	0,77	0,91	1,01
34800	0,89	1,05	1,24	1,39	1,17	1,37	1,63	1,83	0,62	0,72	0,85	0,94
34900	0,83	0,97	1,13	1,26	1,06	1,24	1,47	1,65	0,61	0,69	0,80	0,87
35000	0,71	0,81	0,94	1,04	0,88	1,02	1,20	1,35	0,54	0,60	0,67	0,73

Vurderinger og forbehold

Tabel 2 viser de enkelte usikkerheds elementer i forhold til den relative ændring af grundvandsstanden som fremgår af Tabel 3. I lighed med notatet om amplitude korrektionen (Refsgaard et al. 2012), men i modsætning til statusrapporten (Trolborg et al. 2011) har vi også denne gang kombineret usikkerhederne til et samlet usikkerheds estimat under antagelse af uafhængighed. Det fremgår af Tabel 2, at det største bidrag til den samlede standard afvigelse stammer fra usikkerheden på ekstremværdi analysen. Som det fremgår af eksemplet på figur 5, så er tendensen af det ekstra bidrag til de ekstreme grundvandsstande fra klimaforandringerne begrænset i forhold til hvad der allerede måtte forventes med det nuværende klima. Det forholdsvis lille bidrag til den samlede usikkerhed fra variationer mellem klimamodeller ($\sigma_{\text{klimamodel}}$) og som følge af nedskaleringen ($\sigma_{\text{nedskalering}}$), som det fremgår af Tabel 2 bekræfter denne tendens.



Figur 5 Eksempel på Gumbel fremskrivning af simulerede ekstremværdi hændelser (DC=Delta change nedskalering)

Tabel 3 viser vores bedste bud på ekstremværdi hændelser under fremtidigt klima relativt til middel af nuværende grundvandsstand med angivelse af øvre- og nedre 95% konfidensintervaller. Ekstremværdi hændelserne er udvalgt som årlige maksima. Endvidere antages det, at disse maksima tilhører ekstremværdi fordelingen Gumbel. Det nedre 95% konfidensinterval er medtaget dels fordi det største bidrag til den samlede standard afvigelse stammer fra usikkerheden på ekstremværdi analysen, og dels fordi Gumbel fremskrivningen af de årlige ekstremværdier kvalitativt vurderet ikke rammer data særligt godt på de mest ekstreme hændelser. Antagelsen om tilhørsforhold til Gumbel fordelingen er testet med Chi- og Kolmogorov Smirnov test mod simulerede ekstremer og alle test er accepterede ($\alpha = 0,1$). Antagelsen om at eks-

tremværdierne tilhører Gumbel fordelingen er klassisk anvendt, men andre fordelinger ville også kunne bruges. Gumbel (der har to styrende parametre) kan have en tendens til at overestimere ekstremværdier og vil give et mere smalt konfidensinterval sammenlignet med f.eks. den Generelle Ekstremværdi (tre parametre) fordeling, som Gumbel er et grænsetilfælde af (Persson og Rydén, 2010). Det bemærkes, at estimerne på $GVS_{10,5}$, GVS_{21} , GVS_{50} og GVS_{100} er lavere end estimerne i Troldborg et al. (2011), men på niveau med værdierne i Refsgaard et al. (2012). Dette bekræfter dels at ekstremværdianalyserne er forholdsvis følsomme overfor om modellen simulerer et korrekt niveau af grundvandsspejlsfluktuationer og dels at tallene i Troldborg et al. (2011) er for høje.

Det estimerede konfidensinterval i ovenstående to tabeller afspejler ikke usikkerhed på geologi eller model parametrisering, og det er erkendt at resultaterne vil være følsomme overfor ændringer i vidensgrundlag og parametrisering (i bilag 5 er der opgjort en figur der viser hvordan dette 100 års estimat ligger i forhold til modelresultater december 2011 og delresultater i genberegningsperioden sommer 2012). Der er gennemført en række test af modelopsætningen (justeret klimainput, vægtningskemaer, forskellige parameter koblinger og a priori angivelser af øvre parameter intervaller) i forhold til simuleringer af nuværende og fremtidige klima. Konklusionen af disse test er dels at vi har en tilsyneladende numerisk stabil model uden åbenlyse fejlkilder i hverken opsætningen eller i fremtidsklimaberegningerne og dels at model opsætningen er temmelig følsom overfor parameter ændringer og variationer i klima input data. Vi har i modelkalibreringen inddraget frie og spændte magasintal, og disse ligger efter kalibreringen ved den øvre grænse af det realistiske interval, specielt for så vidt angår det frie magasintal; parametrene kompenserer med andre ord for noget i modelopsætningen/klimadata som ikke harmonerer særligt godt med de observationer af grundvandsfluktuationer og afstrømninger.

Referencer

- Cowi. Funder-Hårup. Forslag til designvandspejl for Spuns Syd. Notat til Vejdirektoratet. Version 0.9, 09.07.2012
- Persson K, Rydén J (2010) Exponentiated Gumbel Distribution for Estimation of Return Levels of Significant Wave Height. Journal of Environmental Statistics 2010-1(3) p1-12
- Refsgaard JC, Troldborg L, Kidmose J (2012) Notat om designvandspejl for Silkeborg Motorvejen_juli2012. GEUS 2012
- Troldborg L, Refsgaard, JC, Kidmose J, Escrivá MM, Nyegaard P (2011) Grundvandsmodel for motorvejsstrækning gennem Silkeborg. Statusrapport fase 1.2 og 1.2. GEUS Rapport 2011/136.

Bilag 1: Amplitude og middelgrundvandsstand for pejlinger langs motorvejstransekt

Beregnete afvigelser ift observationer

Zone	32500			32700					33400	33800	33900		34200		34500		34900	35000		35200		35300
Boring	middel	3259_1	3259_2	3275_1	3275_2	3278_1	3278_2	3278_3	3345_1	3385_1	3398_1	3399_1	3420_1	3448_1	3452_1	3457_1	3495_1	3500_1	3500_2	3525_1	3525_2	3530_1
Amplitude																						
zone	0.12	0.16		0.05					0.13	0.13	0.10		0.15		0.11		0.11	0.09		0.22		0.12
boring	0.10	0.16		0.16	0.04	-0.03	0.03		0.13	0.13	0.09	-0.01	0.11	0.11	0.08	0.07	0.11	0.09		0.16	0.16	0.12
Middel tryk fi	middel	3259_1	3259_2	3275_1	3275_2	3278_1	3278_2	3278_3	3345_1	3385_1	3398_1	3399_1	3420_1	3448_1	3452_1	3457_1	3495_1	3500_1	3500_2	3525_1	3525_2	3530_1
Observation	0.11	0.00	0.09	0.04	0.17	0.20	0.05	0.12	0.05	0.06	0.10	0.21	0.10	0.11	0.14	0.16	0.16	0.20	0.10	0.07	0.07	0.07
Før kalibrering	0.41	0.34	0.34	0.26	0.30	0.38	0.33	0.33	0.52	0.54	0.58	0.54	0.55	0.54	0.56	0.49	0.44	0.34	0.34	0.31	0.31	0.20
model	0.20	0.24	0.24	0.20	0.20	0.18	0.15	0.15	0.18	0.19	0.20	0.20	0.21	0.22	0.22	0.24	0.27	0.19	0.19	0.22	0.22	0.19
Middel tryk																						
zone	1.74	0.08		2.12					-1.25	-0.83	-0.31		0.50		1.04		2.80	2.78		5.53		6.73
boring	1.77	-2.66	2.82	-5.40	-0.53	-1.78	7.85	10.45	-1.25	-0.83	-0.22	-0.39	0.02	0.98	1.07	1.01	2.80	3.48	2.08	5.84	5.21	6.73
Observation	31.70	39.72	45.20	35.22	40.08	34.20	40.43	43.04	24.01	23.77	23.96	23.41	23.48	24.05	23.80	23.64	24.36	26.13	24.73	28.22	27.59	26.48
Før kalibrering	29.51	38.66	38.66	34.57	36.13	32.33	32.87	32.87	23.94	23.46	23.35	23.04	22.81	22.77	22.35	22.06	20.79	20.82	20.82	20.27	20.27	19.69
model	30.67	42.38	42.38	40.61	40.61	35.98	32.59	32.59	25.26	24.60	24.18	23.81	23.46	23.08	22.74	22.62	21.56	22.65	22.65	22.37	22.37	19.74

Zone															
Boring	middel	87_1224	P1_1	P11_1	P13_1	P14_1	P14_2	P15_1	P15_2	P16_1	P16_2	P2_1	P3_1	P4_1	P5_1
Amplitude															
zone	0.12														
boring	0.10	0.10	-0.53	0.01	0.05	0.07	-2.00			-0.48	-2.04	-0.08	0.07	0.08	0.11
Middel tryk fit	middel	87_1224	P1_1	P11_1	P13_1	P14_1	P14_2	P15_1	P15_2	P16_1	P16_2	P2_1	P3_1	P4_1	P5_1
Observation	0.11	0.06	0.69	0.14	0.13	0.22	2.01	3.00	2.42	0.71	2.38	0.24	0.12	0.09	0.13
Før kalibrering	0.41	0.32	0.18	0.32	0.42	0.70	0.22	0.64	0.22	0.57	0.17	0.17	0.48	0.49	0.54
model	0.20	0.15	0.15	0.15	0.18	0.29	0.01	0.34	0.16	0.23	0.34	0.16	0.19	0.17	0.24
Middel tryk															
zone	1.74														
boring	1.77	-0.05	-0.03	0.20	-0.36	-1.79	-1.54	4.91	-3.43	1.52	3.13	1.65	0.33	-0.99	-4.71
Observation	31.70	22.61	19.40	22.87	22.62	43.64	50.05	49.82	49.39	43.16	67.06	21.58	22.08	23.81	26.02
Før kalibrering	29.51	22.04	19.28	22.11	22.25	43.63	51.72	46.68	52.69	45.22	62.91	19.67	21.39	23.75	27.04
model	30.67	22.66	19.43	22.66	22.98	45.42	51.59	44.91	52.82	41.64	63.93	19.93	21.75	24.79	30.72

Bilag 2: Objektiv funktion

$$\begin{aligned} Obj = & \sum_i (w_i \times HTS_ME_i)^2 + \sum_i (w_i \times HTS_ErrAmpl_i)^2 + \sum_j (w_j \times hobs_mean_j)^2 \\ & + \sum_k (w_k \times mfbal_{120102_k})^2 + \sum_l (w_l \times mfbal_{030405_l})^2 \\ & + \sum_m (w_m \times mfbal_{050607_m})^2 + \sum_n (w_n \times mfbal_{060708_n})^2 \end{aligned}$$

HTS_ME er middelfejlen i forhold til de enkelte Cowi_pejl)

HTS_ErrAmpl forskel i maksimal amplitude i forhold til de enkelte Cowi_pejl

hobs_mean er afvigelsen middel af pejl fra Jupiter databasen i perioden 1990-2011 ift middel simulering 2010-2012

mfbal_120102 vandbalancefejl for de fire nye vandføringsstationer for vinter sæsonen

mfbal_030405 vandbalancefejl for de fire nye vandføringsstationer for forår sæsonen

mfbal_060708 vandbalancefejl for de fire nye vandføringsstationer for sommer sæsonen

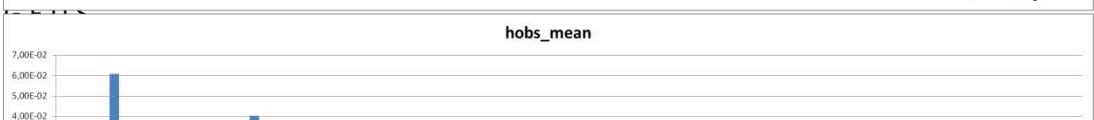
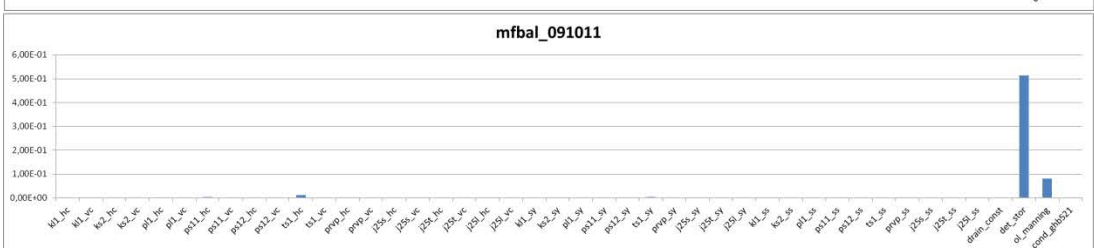
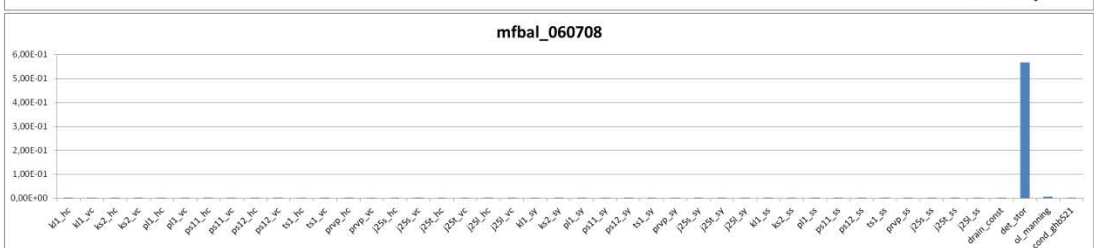
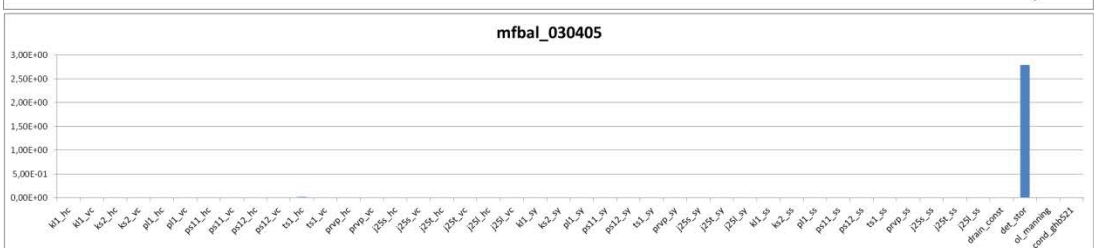
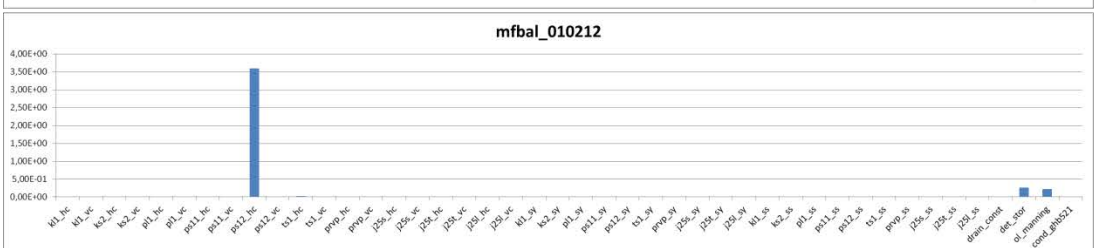
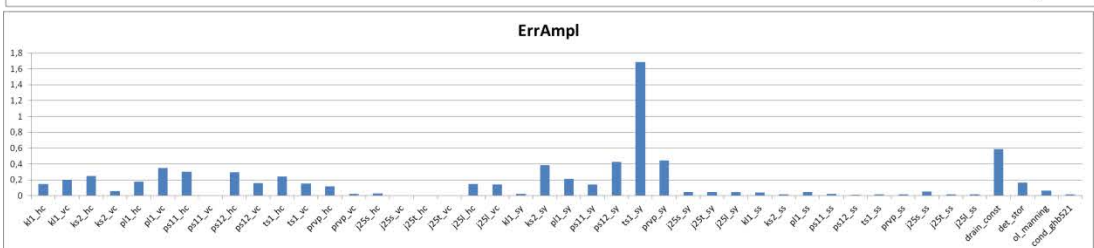
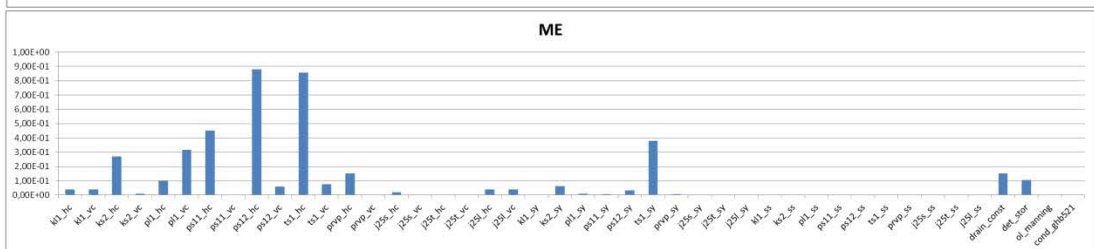
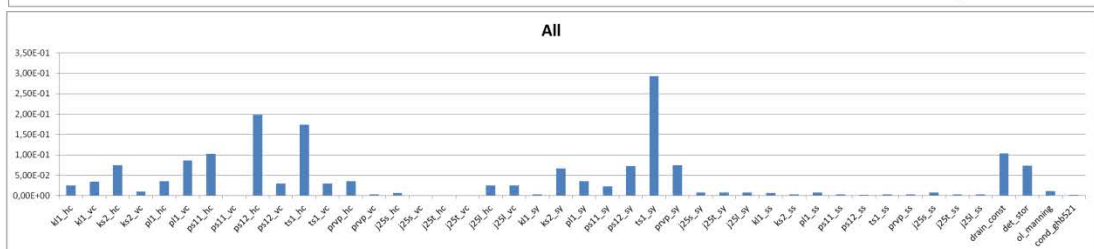
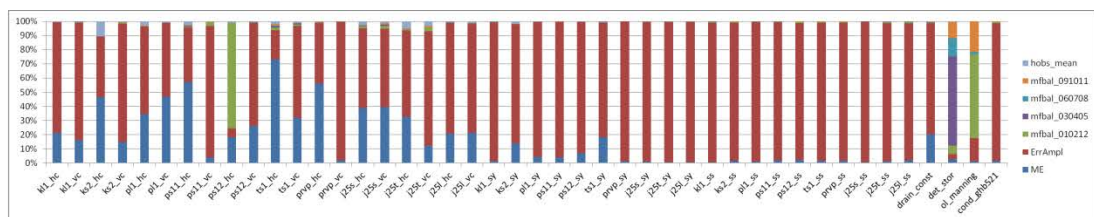
mfbal_091011 vandbalancefejl for de fire nye vandføringsstationer for efterår sæsonen

w er vægtningen af de enkelte observationer

Vægtene er udregnet således at samlede vægt for de enkelte delkomponent grupper er ca. 100 gange så høj for HTS_ME og HTS_ErrAmpl grupperne sammenlignet med for de resterende grupper.

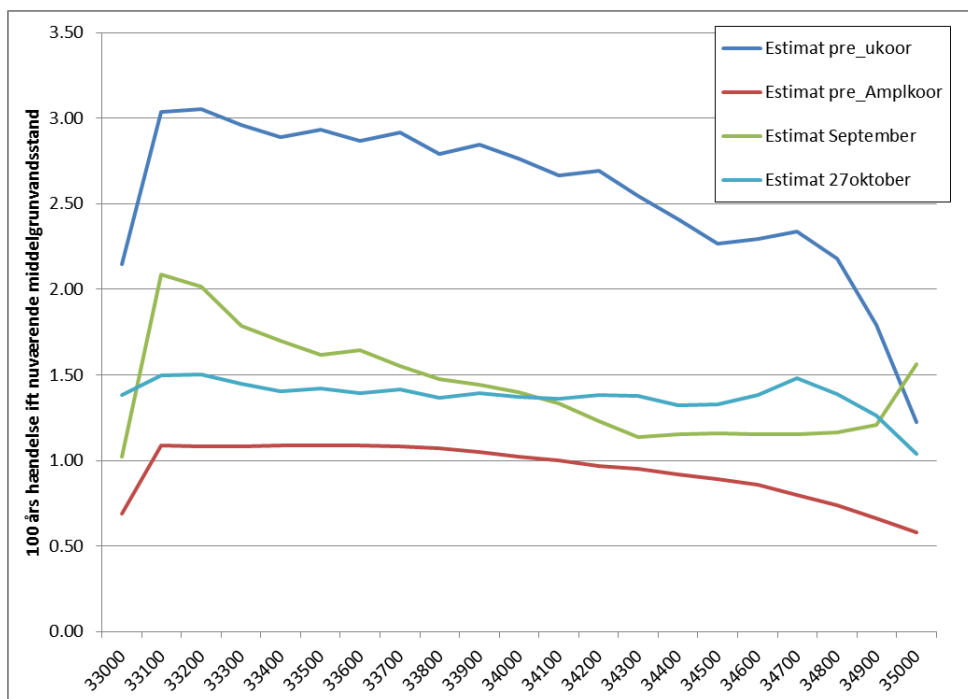
Bilag 3: Sensitivitets analyse

PARAMETER		SENSITIVITET							
Parameter	Current Value	ME	ErrAmpl	mfbal_010212	mfbal_030405	mfbal_060708	mfbal_091011	hobs_mean	All
kl1_hc	1,71E-05	3,93E-02	0,145197	5,11E-04	4,36E-04	9,65E-05	3,45E-04	6,16E-04	2,57E-02
kl1_vc	1,71E-07	3,93E-02	0,199416	5,06E-04	4,36E-04	9,63E-05	3,40E-04	5,41E-04	3,45E-02
ks2_hc	1,54E-05	0,270266	0,248439	4,42E-04	1,39E-04	1,98E-05	7,49E-05	6,09E-02	7,53E-02
ks2_vc	1,54E-06	1,03E-02	5,84E-02	3,25E-04	4,67E-06	8,76E-06	2,29E-04	5,05E-04	1,01E-02
pl1_hc	1,04E-05	9,88E-02	0,17819	6,39E-04	4,59E-04	9,98E-05	3,71E-04	8,97E-03	3,61E-02
pl1_vc	1,04E-06	0,315707	0,351306	6,84E-04	2,44E-04	2,33E-05	2,14E-04	6,20E-03	8,59E-02
ps11_hc	7,72E-04	0,450357	0,302393	6,08E-03	4,29E-03	7,00E-04	3,13E-03	1,97E-02	0,102735
ps11_vc	7,72E-05	1,95E-04	4,87E-03	1,29E-04	3,98E-06	1,41E-06	1,79E-05	1,15E-05	8,22E-04
ps12_hc	5,39E-05	0,878788	0,294296	3,59409	3,27E-03	5,03E-04	2,31E-03	4,03E-02	0,198305
ps12_vc	5,39E-06	5,75E-02	0,160506	5,43E-04	3,49E-04	8,04E-05	3,11E-04	6,83E-04	2,93E-02
ts1_hc	1,06E-03	0,85633	0,242711	2,15E-02	1,45E-02	2,55E-03	1,15E-02	2,26E-02	0,173717
ts1_vc	2,39E-05	7,56E-02	0,154421	2,28E-03	1,71E-03	3,26E-04	1,32E-03	2,01E-03	3,00E-02
j25s_hc	1,06E-03	2,01E-02	2,92E-02	7,22E-04	2,14E-04	5,29E-05	1,88E-04	1,41E-03	6,35E-03
j25s_vc	1,06E-04	1,43E-03	2,01E-03	7,38E-05	3,10E-05	4,34E-06	2,68E-05	5,15E-05	4,41E-04
j25t_hc	2,16E-04	1,93E-03	3,64E-03	5,12E-05	7,00E-06	3,80E-06	9,48E-06	3,03E-04	7,40E-04
j25t_vc	2,16E-05	2,85E-04	1,88E-03	6,26E-05	3,83E-06	8,34E-07	2,42E-05	7,34E-05	3,24E-04
j25l_hc	1,71E-05	3,81E-02	0,145429	4,97E-04	4,30E-04	9,57E-05	3,35E-04	4,66E-04	2,56E-02
j25l_vc	1,71E-07	3,83E-02	0,139339	4,88E-04	4,32E-04	9,75E-05	3,33E-04	1,92E-03	2,47E-02
kl1_sy	0,2	2,32E-04	2,19E-02	8,60E-05	2,82E-05	5,52E-06	3,31E-06	1,94E-05	3,69E-03
ks2_sy	0,2	6,29E-02	0,385554	9,09E-04	3,43E-04	5,48E-05	2,42E-04	7,14E-03	6,63E-02
pl1_sy	0,2	9,27E-03	0,213175	1,79E-04	5,18E-05	1,47E-05	6,66E-05	6,10E-04	3,60E-02
ps11_sy	0,2	5,54E-03	0,138444	1,53E-04	7,01E-05	1,42E-05	6,04E-05	1,63E-04	2,34E-02
ps12_sy	0,2	3,11E-02	0,428996	1,82E-04	1,59E-04	2,03E-05	1,20E-04	1,42E-03	7,26E-02
ts1_sy	0,308242	0,379062	1,68294	4,36E-03	4,03E-03	1,03E-03	3,53E-03	4,50E-03	0,293281
j25s_sy	0,2	4,28E-04	4,67E-02	1,63E-04	2,76E-05	4,85E-06	1,55E-05	2,73E-05	7,88E-03
j25t_sy	0,2	2,57E-04	4,60E-02	1,86E-04	4,54E-05	7,80E-06	2,34E-05	1,70E-05	7,75E-03
j25l_sy	0,2	2,07E-04	4,62E-02	1,47E-04	1,49E-05	4,38E-06	3,04E-06	1,26E-05	7,79E-03
kl1_ss	3,19E-02	1,99E-04	4,25E-02	2,63E-04	5,89E-05	1,09E-05	1,97E-05	2,00E-05	7,16E-03
ks2_ss	3,19E-02	2,88E-04	1,71E-02	7,11E-05	3,46E-05	4,09E-06	2,13E-05	1,86E-05	2,88E-03
pl1_ss	3,19E-02	4,75E-04	4,86E-02	1,85E-04	4,36E-05	4,30E-06	5,30E-06	2,20E-05	8,19E-03
ps11_ss	3,19E-02	3,54E-04	2,00E-02	7,60E-05	2,65E-05	7,66E-07	8,64E-06	1,45E-05	3,38E-03
ps12_ss	3,19E-02	2,90E-04	1,35E-02	1,19E-04	2,56E-05	1,05E-05	1,49E-05	9,40E-06	2,28E-03
ts1_ss	3,19E-02	3,05E-04	1,85E-02	1,12E-04	3,51E-05	4,09E-06	1,11E-05	1,81E-05	3,11E-03
j25s_ss	3,19E-02	2,98E-04	4,94E-02	1,25E-04	2,94E-05	7,52E-06	1,15E-05	1,83E-05	8,32E-03
j25t_ss	3,19E-02	1,97E-04	1,63E-02	1,11E-04	3,19E-05	6,57E-06	2,25E-05	2,19E-05	2,74E-03
j25l_ss	3,19E-02	3,51E-04	1,81E-02	1,59E-04	3,04E-05	3,76E-06	8,97E-06	1,03E-05	3,05E-03
drain_const	1,70E-07	0,152553	0,588662	3,38E-03	2,09E-03	4,17E-04	1,53E-03	2,56E-03	0,103658
det_stor	4,44485	0,105644	0,166504	0,26202	2,78946	0,567623	0,514931	7,11E-03	7,41E-02
ol_manning	4	4,13E-03	6,13E-02	0,221638	6,16E-05	6,89E-03	8,02E-02	1,04E-04	1,16E-02
cond_ghb521	2,00E-07	2,61E-04	1,49E-02	1,41E-04	3,51E-05	6,72E-06	9,69E-06	1,66E-05	2,51E-03



Bilag 5: Model følsomhed af 100 års estimat

Figur der viser hvordan dette 100 års estimat ligger i forhold til modelresultater december 2011 og delresultater i genberegningsperioden sommer 2012



Appendix 2: Notat om designvandspejl for Spuns Syd, Funder-Hårup motorvejen

Jens Christian Refsgaard, Lars Trolborg og Jacob Kidmose, 11 juli 2012

Baggrund og formål

Cowi sendte 9. juli 2012 et notat til Vejdirektoratet om forslag til designvandspejl for konstruktioner omfattet af udbuddet for Spuns Syd for Funder-Hårup motorvejen. Cowi notatet blev sendt til kommentarer til bl.a. GEUS. Den i notatet valgte metodik, specielt med hensyn til fastlæggelse af 20 års og 100 års hændelser svarende til det nuværende klima, er på nogle områder inkonsistent.

GEUS har tidligere foretaget beregninger af dimensioneringsgrundlaget som rapporteret i Statusrapporten for fase 1.1. og 1.2 (Trolborg et al., 2011). Disse beregninger har nogle erkendte svagheder, og GEUS er derfor i færd med at opdatere modellen og de tilhørende ekstremværdianalyser på følgende punkter:

- En anderledes konceptualisering af afstrømning fra befæstede arealer og en efterfølgende omkalibrering af modellen. Vi forventer det vil gøre modellen i stand til at reproducere den målte dynamik i grundvandsspejlsfluktuationer markant bedre end i øjeblikket, hvor modellen simulerer alt for store fluktuationer.
- En revision af grundlaget for den ene nedskaleringsmetode (HE), som vi har fundet ud af giver en fejl, hvis virkning på designgrundlaget pt er ukendt.
- Beregninger og eksplicit angivelse af maksimal grundvandsspejl for 10, 20, 50 og 100 års hændelser for det nuværende klima og for det fremtidige klima, i stedet for som i Trolborg et al. (2011) kun at beregne og angive ændringen i grundvandsspejl forårsaget af klimaændringer.
- En mere systematisk præsentation af usikkerhedsangivelser, hvor effekten af de forskellige usikkerhedskilder kombineres, i stedet for som i Trolborg et al. (2011) at angives hver for sig.

Dette arbejde forventes at være færdigt i starten af september. Designfolkene i Cowi har imidlertid brug for det bedst mulige estimat på et designgrundlag her og nu. Formålet med dette notat er derfor, på baggrund af GEUS' nuværende vidensgrundlag, her midt i genberegningsprocessen, at give det bedst mulige estimat på ekstreme grundvandsspejl under fremtidigt klima.

Modelgrundlag - grundvandsspejlsfluktuationer

Den reviderede og omkalibrerede model, som vi forventer vil være i stand til at reproducere de målte fluktuationer i grundvandsspejl, er ikke parat endnu. Den nuværende model giver for

store fluktuationer af det nuværende grundvandsspejl, hvilket oveni købet kan forventes at resultere i overestimering af fremskrivningerne af ekstreme grundvandsspejl. Dette var årsagen til, at vi i Troldborg et al., (2011) lavede beregninger af ændringer ekstreme grundvandsspejl i stedet for beregninger af absolutte værdier.

For at kunne lave ekstremværdianalyser af grundvandsspejl, som har realistiske årlige fluktuationer, har vi gjort følgende:

1. Analyseret forskellene i grundvandsspejlsfluktuationer mellem observationer og modelsimuleringer for observationsperioden. Vi har observationer med flere end 10 observationer i 11 zoner. Forskellen, udtrykt som en faktor, varierer mellem 1,9 og 9,0 med et gennemsnit på $F_{gvl_fluk_gns} = 4.55$. Vi har valgt at benytte den næstlaveste faktor $F_{gvl_fluk_lav} = 2,8$ til beregningerne.
2. Benyttet 20 års modelberegninger, hvorfra der beregnes middel grundvandsspejl for perioden GVS_{middel} . For hvert år findes det maksimale grundvandsspejl $GVS_{model-max}$.
3. Korrigeret de maksimale årlige grundvandsspejl ved at fratrække middel og korrigere for dynamik: $GVS_{model-max-korrigeret} = (GVS_{model-max} - GVS_{middel}) / F_{gvl_fluk_lav} + GVS_{middel}$
4. Gennemført ekstremværdianalyser med Gumbel fordelingen baseret på de korrigerede maksimale årlige grundvandsspejl $GVS_{model-max-korrigeret}$.
5. Beregnet ekstreme grundvandsspejl for forskellige gentagelsesperioder (ekstremværdi hændelser, $GVS_{10,5} - GVS_{100}$) for det fremtidige klima: $GVS_{10,5}$, GVS_{21} , GVS_{50} og GVS_{100} .

Metodik for klimafremskrivninger og usikkerhedsvurderinger

Beregningerne er gennemført for de 9 klimamodeller og de 2 nedskaleringsmetoder som angivet i Troldborg et al. (2011). Vi har herefter estimeret middelværdien af de ekstreme grundvandsspejl som middel af de 9 klimamodeller og de 2 nedskaleringsmetoder. Til dette tal skal adderes GVS_{middel} (fx skønnet ud fra målte værdier) for at opnå et grundvandsspejl i absolut kote.

Der er beregnet usikkerhed på middelværdien svarende til følgende fire fejlkilder som vi vurderer, er de væsentligste. Vi karakteriserer usikkerheden ved følgende fire standardafvigelse:

- **Klimamodeller** ($\sigma_{klimamodel}$). Forskellen mellem centralt skøn og øvre 95% estimerer svarer til $1,96 \sigma_{klimamodel}$.
- **Nedskalering** ($\sigma_{nedskalering}$). Standardafvigelsen beregnes ud fra de to estimerer fra HE og DC.
- **Ekstremværdianalyse** (σ_{EVA}). Forskellen mellem centralt og øvre 95 % estimat i Gumbel beregningerne svarer til $1,96 \sigma_{EVA}$.
- **Model fluktuationer** ($\sigma_{modelfluktuationer}$). Standardafvigelsen beregnes ud fra estimerer beregnet med to forskellige korrektionsfaktorer $F_{gvl_fluk_gns} = 4.55$ og $F_{gvl_fluk_lav} = 2,8$.

Under forudsætning af at de fire fejlkilder er indbyrdes uafhængige kan vi beregne den samlede standardafvigelse ved fejlphobningsloven:

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{klimamodel}^2 + \sigma_{nedskalering}^2 + \sigma_{EVA}^2 + \sigma_{modelfluktuationer}^2}$$

hvorefter 95% og 99% konfidensgrænserne kan beregnes ved at tillægge henholdsvis $1,96 \sigma_{total}$ og $2,58 \sigma_{total}$ til middelværdien.

Resultater

Resultaterne fremgår af nedenstående to tabeller.

Tabel 1 Relativ forøgelse af grundvandsstand i forhold til nuværende niveau

Zone	Estimat				95% konfidens				99% konfidens			
	10,5	21	50	100	10,5	21	50	100	10,5	21	50	100
33000	0,47	0,54	0,62	0,69	0,72	0,82	0,94	1,04	0,80	0,91	1,04	1,15
33100	0,73	0,84	0,98	1,09	1,13	1,28	1,46	1,62	1,26	1,41	1,62	1,79
33200	0,72	0,83	0,97	1,08	1,12	1,27	1,46	1,61	1,25	1,41	1,61	1,78
33300	0,72	0,83	0,97	1,08	1,13	1,27	1,46	1,61	1,25	1,41	1,61	1,78
33400	0,72	0,84	0,98	1,09	1,13	1,28	1,46	1,62	1,26	1,41	1,62	1,78
33500	0,73	0,84	0,98	1,09	1,13	1,28	1,47	1,62	1,26	1,42	1,62	1,79
33600	0,73	0,84	0,98	1,09	1,13	1,28	1,47	1,62	1,26	1,42	1,62	1,79
33700	0,72	0,83	0,97	1,08	1,12	1,27	1,45	1,60	1,25	1,40	1,60	1,77
33800	0,71	0,82	0,96	1,07	1,10	1,24	1,43	1,58	1,23	1,38	1,57	1,74
33900	0,70	0,81	0,94	1,05	1,08	1,22	1,39	1,54	1,20	1,34	1,53	1,69
34000	0,69	0,79	0,92	1,02	1,05	1,18	1,36	1,50	1,16	1,31	1,49	1,65
34100	0,67	0,77	0,90	1,00	1,02	1,15	1,32	1,46	1,13	1,27	1,45	1,60
34200	0,66	0,75	0,88	0,97	0,99	1,11	1,28	1,41	1,09	1,23	1,40	1,55
34300	0,64	0,74	0,86	0,95	0,96	1,09	1,25	1,38	1,06	1,19	1,37	1,51
34400	0,63	0,72	0,83	0,92	0,93	1,05	1,21	1,34	1,03	1,16	1,33	1,47
34500	0,61	0,70	0,81	0,89	0,90	1,02	1,17	1,30	0,99	1,12	1,29	1,42
34600	0,58	0,67	0,77	0,86	0,87	0,98	1,12	1,24	0,95	1,08	1,23	1,37
34700	0,55	0,63	0,73	0,80	0,81	0,92	1,05	1,17	0,89	1,01	1,16	1,28
34800	0,51	0,58	0,67	0,74	0,75	0,84	0,97	1,07	0,82	0,93	1,06	1,17
34900	0,46	0,52	0,60	0,66	0,67	0,75	0,87	0,96	0,73	0,83	0,95	1,05
35000	0,40	0,46	0,52	0,58	0,58	0,65	0,75	0,83	0,63	0,72	0,83	0,91

Tabel 2 Usikkerhedsbidrag fra delkomponenter. Samlet standard afvigelse estimeret under antagelse af uafhængighed mellem usikkerhed på delkomponenter

Zone	σ Ekstremværdi analyse				σ Klimamodeller				σ Nedskalering				σ Modelfluktuationer				Samlet standard afvigelse			
	10,5	21	50	100	10,5	21	50	100	10,5	21	50	100	10,5	21	50	100	10,5	21	50	100
33000	0.05	0.07	0.08	0.10	0.09	0.09	0.09	0.10	0.05	0.04	0.03	0.03	0.07	0.08	0.10	0.11	0.13	0.14	0.16	0.18
33100	0.08	0.10	0.13	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.08	0.07	0.06	0.05	0.10	0.12	0.15	0.17	0.21	0.22	0.25	0.27
33200	0.08	0.10	0.13	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.08	0.07	0.06	0.05	0.10	0.12	0.15	0.17	0.21	0.22	0.25	0.27
33300	0.08	0.10	0.13	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.09	0.07	0.06	0.05	0.10	0.12	0.15	0.17	0.21	0.22	0.25	0.27
33400	0.08	0.10	0.13	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.09	0.07	0.06	0.05	0.10	0.12	0.15	0.17	0.21	0.22	0.25	0.27
33500	0.08	0.10	0.13	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.09	0.08	0.06	0.05	0.10	0.12	0.15	0.17	0.21	0.22	0.25	0.27
33600	0.08	0.10	0.13	0.15	0.14	0.14	0.14	0.13	0.09	0.08	0.06	0.05	0.10	0.12	0.15	0.17	0.21	0.22	0.25	0.27
33700	0.08	0.10	0.13	0.15	0.13	0.13	0.13	0.13	0.09	0.07	0.06	0.05	0.10	0.12	0.15	0.17	0.20	0.22	0.24	0.27
33800	0.08	0.10	0.13	0.15	0.13	0.13	0.13	0.13	0.08	0.07	0.05	0.04	0.10	0.12	0.15	0.17	0.20	0.21	0.24	0.26
33900	0.08	0.10	0.12	0.14	0.12	0.12	0.12	0.12	0.08	0.07	0.05	0.04	0.10	0.12	0.15	0.17	0.19	0.21	0.23	0.25
34000	0.07	0.09	0.12	0.14	0.12	0.12	0.11	0.11	0.07	0.06	0.04	0.03	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24
34100	0.07	0.09	0.11	0.13	0.11	0.11	0.11	0.11	0.07	0.06	0.04	0.03	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.19	0.21	0.23
34200	0.07	0.09	0.11	0.13	0.10	0.10	0.10	0.10	0.06	0.05	0.04	0.02	0.10	0.11	0.14	0.16	0.17	0.18	0.21	0.23
34300	0.07	0.09	0.11	0.12	0.10	0.10	0.10	0.09	0.06	0.05	0.03	0.02	0.09	0.11	0.13	0.15	0.16	0.18	0.20	0.22
34400	0.07	0.08	0.10	0.12	0.10	0.09	0.09	0.09	0.05	0.04	0.03	0.02	0.09	0.11	0.13	0.15	0.16	0.17	0.19	0.21
34500	0.06	0.08	0.10	0.12	0.09	0.09	0.09	0.08	0.05	0.04	0.02	0.01	0.09	0.11	0.13	0.15	0.15	0.17	0.19	0.21
34600	0.06	0.08	0.10	0.11	0.09	0.08	0.08	0.08	0.05	0.04	0.02	0.01	0.09	0.10	0.12	0.14	0.14	0.16	0.18	0.20
34700	0.06	0.07	0.09	0.10	0.08	0.08	0.08	0.08	0.04	0.03	0.02	0.01	0.08	0.10	0.12	0.13	0.13	0.15	0.17	0.18
34800	0.05	0.06	0.08	0.09	0.07	0.07	0.07	0.07	0.03	0.03	0.01	0.01	0.08	0.09	0.11	0.12	0.12	0.13	0.15	0.17
34900	0.05	0.06	0.07	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06	0.03	0.02	0.01	0.00	0.07	0.08	0.10	0.11	0.11	0.12	0.14	0.15
35000	0.04	0.05	0.06	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.02	0.01	0.00	0.01	0.06	0.07	0.09	0.10	0.09	0.10	0.12	0.13

Vurderinger og forbehold

Resultaterne i ovenstående to tabeller er vores bedste estimat på ekstreme grundvandsspejl i det fremtidige klima. Det bemærkes, at estimaterne på $GVS_{10,5}$, GVS_{21} , GVS_{50} og GVS_{100} er lavere end estimaterne i Troldborg et al. (2011), hvor ændringer i ekstreme grundvandsspejl rapporteredes, hvilket indikerer at ekstremværdianalyserne er meget følsomme overfor om modellen simulerer et korrekt niveau af grundvandsspejlsfluktuationer, samt at tallene i Troldborg et al. (2011) er for høje. Set i forhold til de observerede grundvandsspejlsfluktuationer vurderer vi de nye estimater som plausible.

Følgende forhold kan bevirke ændringer i tallene i forbindelse med de kommende ugers beregninger:

- Den metode vi har anvendt her med en simpel korrektion af amplituderne i fluktuationerne er meget grov. Det er uvist om modellen forøger eller reducerer fejlen på amplituden under fremtidigt klimainput i forhold til nuværende. Den korrekte korrektionsfaktor for amplituden under fremtidigt klima er ukendt. En model som kan reproducere nuværende observerede grundvandsfluktuationer, vil sandsynligvis mere robust kunne forudsige fremtidige fruktuationer. Vi har ingen formodning om, hvorvidt tallene vil blive mindre eller større, men det burde dog være muligt at reducere usikkerheden fra dette bidrag.
- Den forskel vi ser nu mellem HE og DC metoderne er meget lille. Vi har en formodning om, at HE tallene nu er underestimerede, hvilket kan påvirke estimatet på såvel midelværdi som usikkerheder i opadgående retning.

I modsætning til tidligere (Troldborg et al. (2011) har vi denne gang kombineret usikkerhederne til et estimat, så det ikke er nødvendigt at forholde sig til, om man vil benytte det central skøn for Gumbel og det øvre 95% estimat for klimafremskrivninger eller omvendt eller øvre 95% estimater for begge. Det burde give et mere konsistent grundlag for risikovurderingerne. Det er ikke GEUS' opgave at rådgive Vejdirektoratet om, hvilket risikoniveau, der er acceptabelt. Men i lyset af den grove korrektionsmetode vi har anvendt på grundvandsspejlsfluktuationerne vil vi dog anbefale at der anvendes et højere usikkerhedsniveau (sikkerhedsfaktor) indtil vi har de forbedrede beregninger i slutningen af august.

Referencer

Cowi. Funder-Hårup. Forslag til designvandspejl for Spuns Syd. Notat til Vejdirektoratet. Version 0.9, 09.07.2012

Troldborg L, Refsgaard, JC, Kidmose J, Escrivá MM, Nyegaard P (2011) Grundvandsmodel for motorvejsstrækning gennem Silkeborg. Statusrapport fase 1.2 og 1.2. GEUS Rapport 2011/136.