

Indholdsfortegnelse

Introduktion	4
Geologisk model	5
Område beskrivelse	5
Geologisk tolkningsmodel og -princip.....	7
Data tynde områder og dataindsamling	8
Udvikling af den geologiske model	10
Diskussion af den geologiske model	13
Hydrologisk model	14
Hydrologisk konceptualisering / parametrisering	14
Nedbør/fordampning – areal anvendelse	15
Overflade modul	22
Grundvandsmodul	25
Indvindinger og pejlinger	28
Model kalibrering.....	30
Vandbalance	36
Data eksport til detailmodellering	37
Samlet model vurdering	38
Generel vurdering af fit og data tæthed.....	38
Vurdering af vandspejls variationer i forhold til model variationer	38
Sammenhæng ift geologisk model.....	39
Effekter af klimaændringer	40
Det fremtidige klima	40
Hvordan beregnes klimaeffekter?	41
Usikkerhed på klimaeffekter	43
Beregningsmetodik for Silkeborg motorvejen.....	44

Beregninger af klimaændringer for Silkeborg motorvejen.....	45
Ekstremværdi analyse metodik	47
Vurdering af klimaeffektberegninger	52
Referencer	54
Bilag 1: Oprindelige profiler brugt til etablering af den geologiske model	56
Bilag 2: Notat om forslag til nye boringer	64
Bilag 3: Analyse af vandstands variationer	70
Bilag 4: Anbefalinger til opstilling af vandføringsstationer ved Søholt	73
Bilag 5: Notat om GEUS modellering af klimaeffekter for motorvejsstrækning gennem Silkeborg	86

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.

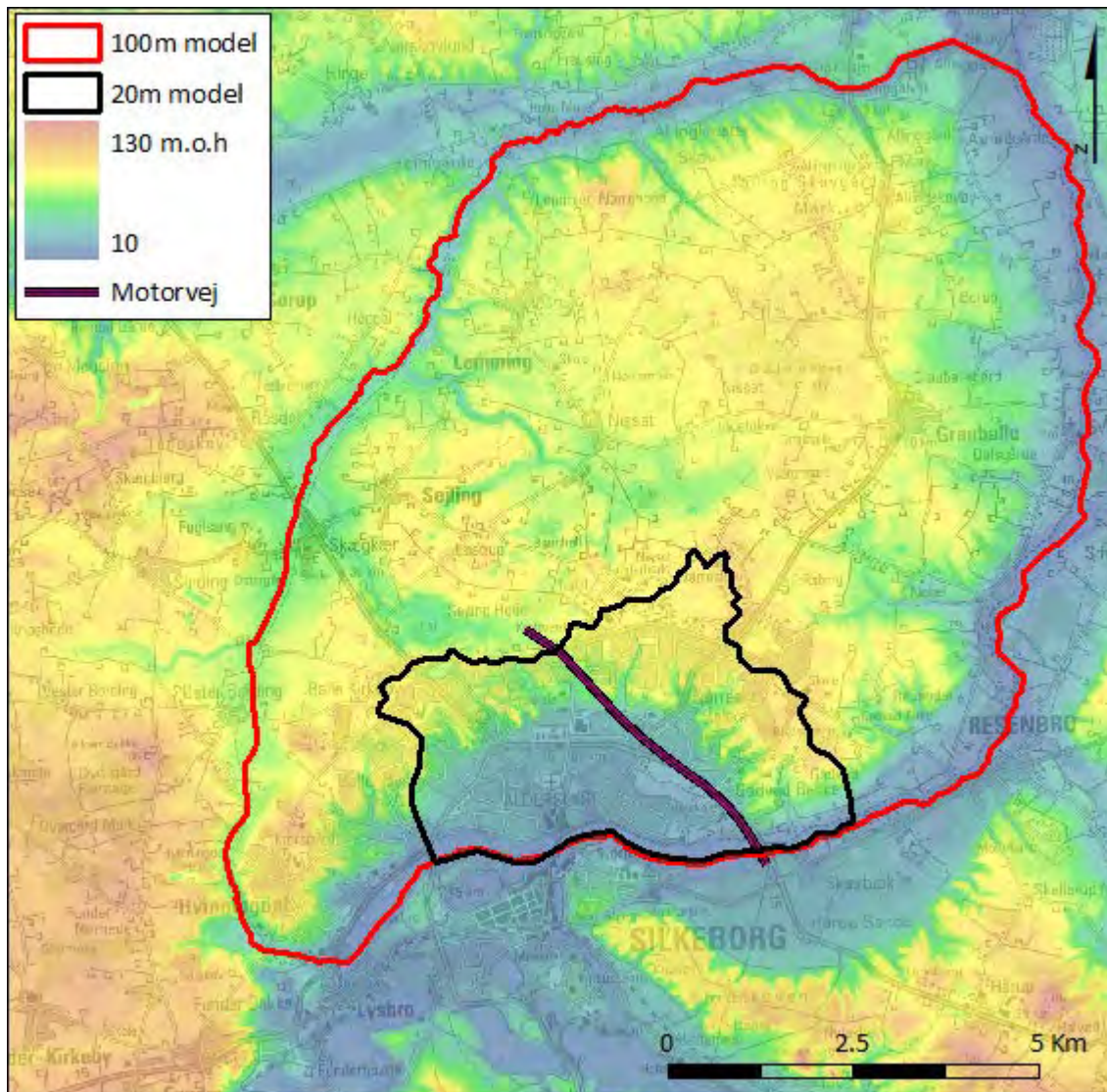
Denne rapport giver en beskrivelse af de aktiviteter der er gennemført siden samarbejdsprojektets start i april 2010 samt en status og vurdering af de opnåede resultater. Projektets aktiviteter har i den forløbne periode været styret af de behov Vejdirektoratet har haft for at opnå bedst muligt informationsgrundlag til projekteringen. Arbejdet har derfor været tæt koordineret med projekteringsarbejdet, herunder specielt Cowi's arbejde, hvortil GEUS løbende har leveret modelleringsresultater.

Geologisk model

Område beskrivelse

Topografisk er lokalområdet afgrænset af Gudenåen, Silkeborg Langsø, Lemming å og Alling sø, markeret med rødt på Figur 1. Der er flere små vandløb, der afvander modelområdet ned mod disse større vandløb og søer. Når der fokuseres på lokalområdet, hvor motorvejstransektet er planlagt, er der to vandløb der krydser transektet, Søholt Bæk og Kejlstrup Grøft. Det topografiske opland til disse, der er optegnet med sort på Figur 1, udgør afgrænsningen for fokusområde modelleringen.

Området er underlejret af prækvartære lerede aflejringer fra Oligocæn og sand- og leraflejringer fra Miocæn. Derpå følger kvartære aflejringer, som består af moræneler og sand og smeltevandssand og grus. Gudenådalen ved Silkeborg er en smeltevandssdal, hvor der er afsat større mængder af sand i et terrasseformet landskab under afsmeltningen af NØ-isen og Ungbalten (Larsen og Kronborg, 1994). De seneste aflejringer er postglaciale ferskvandsdannelser af tørv, gytje, sand og grus. Den prækvartære flades kote varierer sammen med terrænet og går fra kote -60 til -30 meter i Gudenåsystemet, hvor der løber en dybt nedskåret dal, og op til kote 70 meter nord for Silkeborg (Binzer og Stockmarr, 1985).

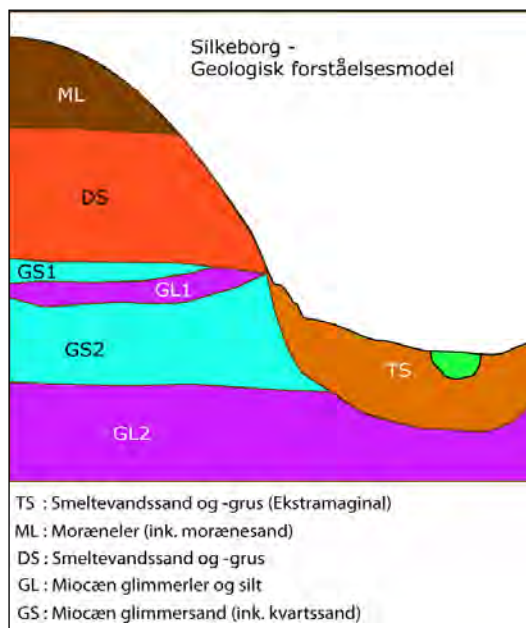


Figur 1 Topografisk model for området omkring Silkeborg, område afgrænsning og planlagt motorvejs transekt. Lokalområdet afgrænsningen er markeret med en rød streg, mens fokusområdet er markeret med en sort streg

Ud fra jordartskortet i 1:200.000 og profiler med boringer er der opstillet en relativ simpel forståelsesmodel for området. Bunden af modellen består af Miocæn glimmerler og –silt overljet af glimmersand med en linse af glimmerler og –silt, evt. med indslag af få linser af kvartsand. I dalstrukturerne i den prækvartære flade findes ofte sedimenter beskrevet i den nationale geologiske database, Jupiter, som værende af Miocæn alder, men vil nok i mange tilfælde være omlejet Miocæne sedimenter. De kvartære aflejringer består nederst af smeltevandsand, som er afskåret af Gudenå-systemets dalstrukturer. Oven på smeltevandsandet findes aflejringer af primært moræneler af varierende tykkelse, som i nogle områder helt kan mangle. Moræneleret er også skåret af Gudenåsystemets dalstrukturer. De seneste betydende aflejringer er de ekstramarginale glacial/senglacial terrasseformede smeltevandsaflejringer fra isens afsmeltning gennem Gudenåsystemet.

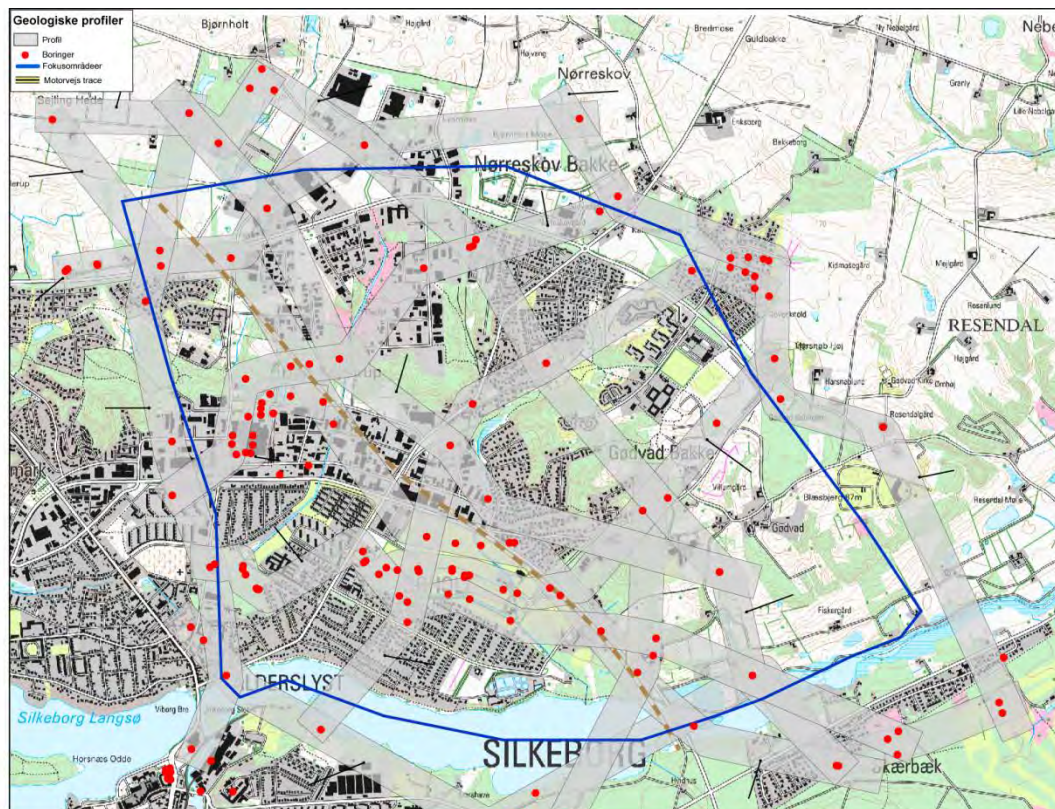
Geologisk tolkningsmodel og -princip

Der er valgt et tolkningskoncept (Figur 2) med top- og bundbeskrivelser af et kvartært sandlag (DS), der primært består af smeltevandssand og -grus. Dette er dækket af kvartært ler (ML), som primært består af moræneler og morænesand, hvor bundkoten er tolket. Der er tolket to prækvartære sand enheder (GS1 og GS2), som de fleste steder er adskilt af et tyndere lag prækvartært ler (GL1) og en bund (GL2), der ligeledes udgøres af prækvartært ler. Indenfor fokus området er der i det meste af området yderligere tolket i top og bund af Søholt terrassemagasin, som primært består af smeltevandssand og -grus (TS), hvor de DS og GS enheder mangler eller er meget usammenhængende.



Figur 2 Geologisk forståelsesmodel

Den geologiske model er profiltolket med udgangspunkt i den geologiske forståelsesmodel, dvs. fra de borer i Jupiter-databasen hvor der er lavet lithologisk beskrivelse, er lagfølgen fra den geologiske forståelsesmodel forsøgt indplaceret. Dette er sket ved at optegne en række profiler (Bilag 1) gennem fokusområdet (Figur 3) med det terrasseformede landskab og en række profiler udenfor dette område, men disse er sidenhen udvidet med "rullende" profiler, som er trukket på tværs af fokusområdet i det omfang boringsinformation er blevet indsamlet i projektet. For flere af lagene er der tolket både top og bund af laget. Under profiltolkningen er den topografiske overflade (lidar2008) og jordartskortet anvendt. Desuden er data fra de tidligere amters projekt angående "Begravede dale" (Jørgensen og Sandersen, 2009) anvendt til styring af Prækvartære dalstrukturer i tolkningen. Der er lokaliseret dalstrukturer i den østlige del af området, som er betegnet som værende svagt dokumenteret. Dalene er nederoderet ca. 75 meter i den gode leder, bredden er 0,7 til 1 km og længden 6 til 8 km. Dalene er muligvis fyldt op med omlejet miocæne sedimente.



Figur 3 Placering af profiler gennem fokusområdet (Søholt - terrassemagasin)

Ud fra tolkningen af geologien foretaget på boringsniveau med støttepunkter mellem boringerne er der optegnet udbredelsespolygoner for de miocæne lag. Den mindste udbredelse har det øvre glimmersand, derpå følger det øverste glimmerler og det nedre glimmersand. Det nederste lag og bunden af modellen findes i hele områdets udstrækning. Fordelingen viser, at det miocæne landskab er blevet nederoderet mod nordøst, og kun den ene begravede dal fremtræder tydeligt. Udbredelsespolygonerne for de kvartære aflejringer er lavet ud fra jordartskortet i 1:200.000 og profiltolkningen.

Data tynde områder og dataindsamling

I forbindelse med opstillingen af den initiale geologiske model var der især fokus på at etablere en bedre beskrivelse af overgangen mellem de prækvartære glimmersandmagasiner og de højtbeliggende kvartære magasiner (bilag 2). Hovedbekymringen var, at vand fra de prækvartære magasiner ved god kontakt ville blive presset op fra de prækvartære magasiner til de kvartære magasiner og videre ud i Søholt-terrassemagasin. Efter etableringen af to boringer med pejlefiltere i de kvartære og prækvartære magasiner er konklusionen midlertidigt, at der tilsyneladende er kontakt, men at gradienten primært er nedadrettet dvs. fra de kvartære til

de prækvartære magasiner. Fra overgangen af de højtbeliggende kvartære magasiner til det ånære Søholt-terrassemagasin (i og tæt på skræntzonen) er den geologiske lagfølge stadig forholdsvis usikker. Der er få boringer, som beskriver dette skift i geologi med undtagelse af området gennem Dyrehaven, hvor der er flere geotekniske boringer udført i forbindelse med projektet. I den sydlige del af skræntzonen tæt mod Silkeborg Langsø ses også omvendte trykforhold, således at der her er opadrettet gradient fra de prækvartære aflejringer mod de kvartære aflejringer.

Sekundært er udbredelsen af de prækvartære magasiner ikke velbestemt. Der er forholdsvis få boringer, der gennemborer Søholt-terrassemagasinet og viser prækvartært sand herunder. Derfor forventes det ikke, at det prækvartære magasin har kontakt helt ud til Silkeborg Langsø under centrale dele af Søholt-terrassemagasin. De igangværende geofysiske undersøgelser og ekstra boringer forventes at kunne bidrage til bedre beskrivelse af denne overgang.

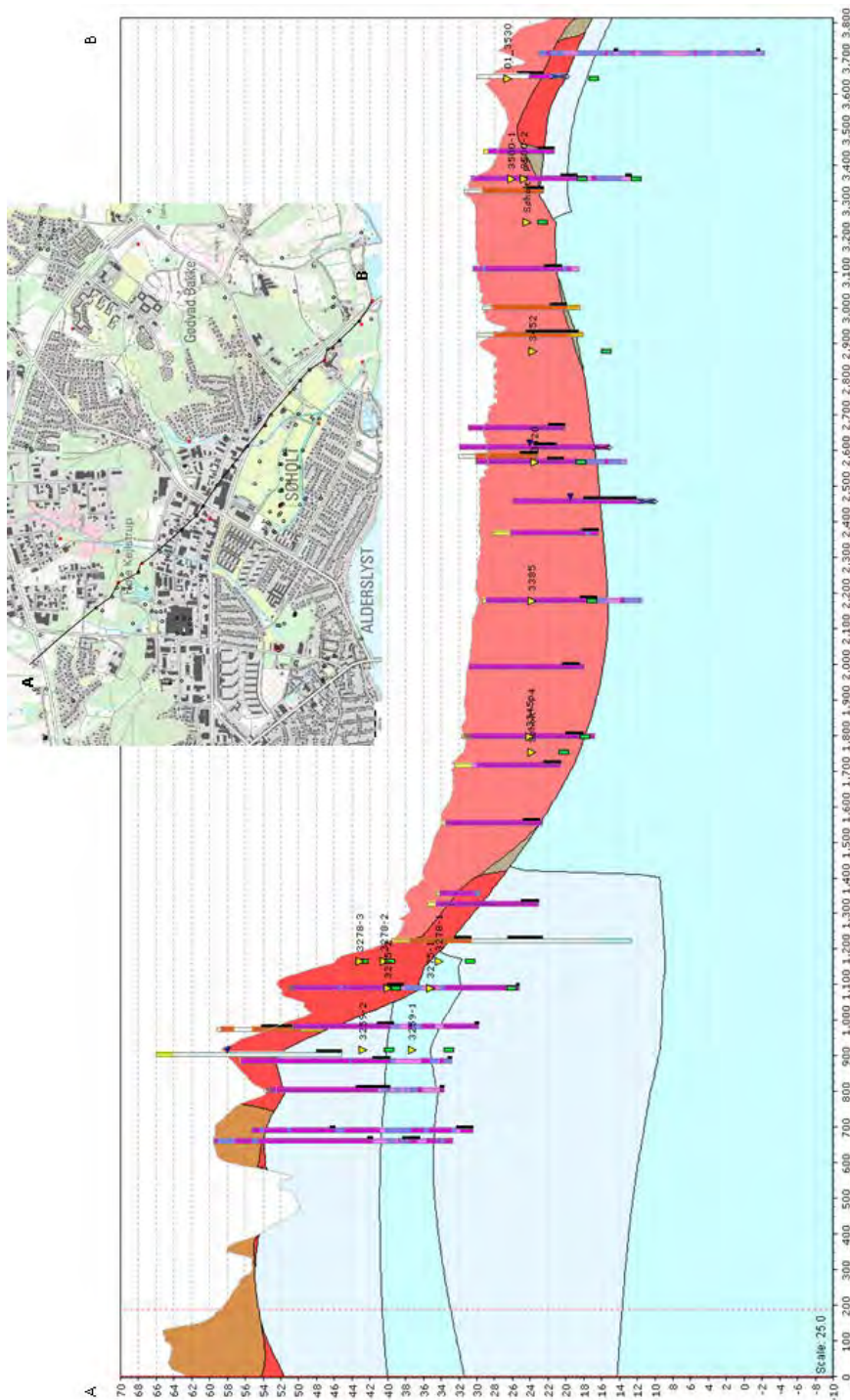
Den geologiske homogenitet af terrasse magasinet er forholdsvis veldokumenteret langs motorvejstransektet dels ved prøvepumpninger og dels ved de geotekniske boringer. Tilsvarende er homogeniteten af Søholt-terrassemagasinet vertikale udbredelse forholdsvis velbestemt langs transektet. Der er dog områder mellem transektet og Silkeborg Langsø, hvor de gamle højboards korts viser optegning af moseområder (Figur 4), hvilket antyder, at der kan være mere heterogent i disse områder.



Figur 4 Højbjergs målekort med placering af historiske mosearealer indenfor Søholt-området (før urbaniseringen af området)

Udvikling af den geologiske model

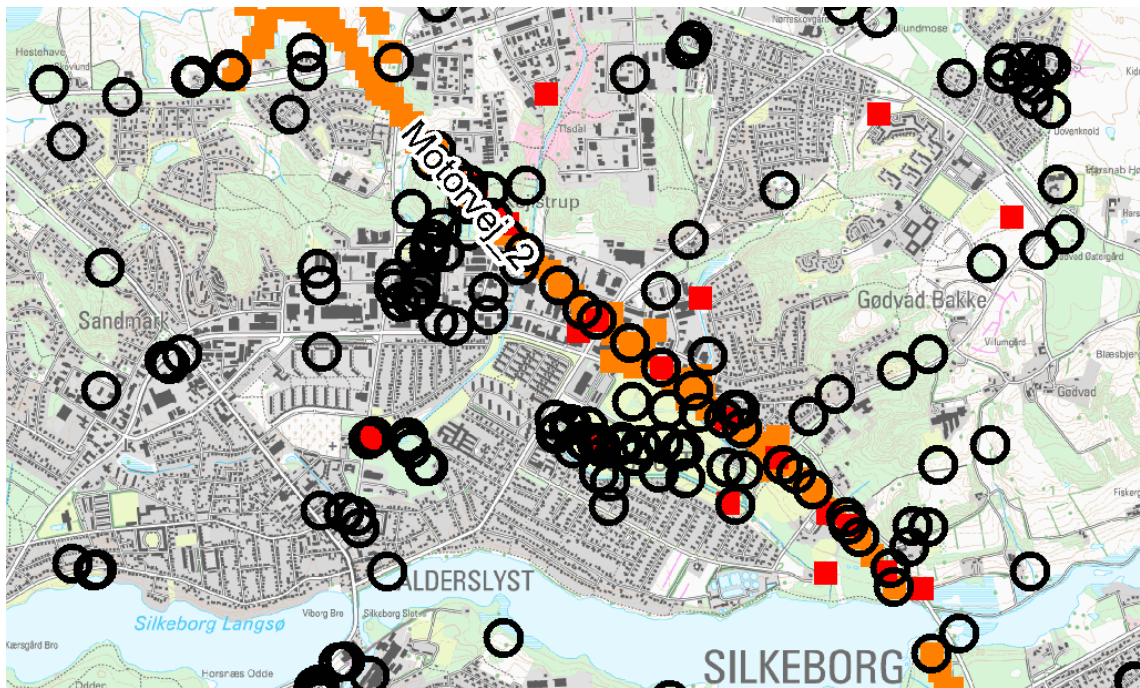
En geologisk model skal dels ses som en arbejdshypotese (en konceptuel model), der i sammenhæng med den hydrologiske model løbende testes og udvikles, og dels ses som en konkret 3D beskrivelse af de geologiske enheder i området. For så vidt angår den geologiske model er denne indtil nu ikke ændret undervejs i projektet. Nye data er kommet til i form af boringsinformation, som har understøttet hypotesen om, at der optræder dybere liggende prækvarter sandenheder under den øvre kvartære lagpakke også tæt på skræntzonerne. Boringerne etableret under dette projekt har givet anledning til mindre justeringer af 3D beskrivelsen af geologien. Justeringerne har primært berørt udbredelsen af de prækvarter sandenheder. I Figur 5 ses et tværsnit langs motorvejstransekten med antydning af to skræntzoner, dels omkring 1200 meter og dels omkring 3500 meter, hvor der er elementer af alle geologiske enheder indenfor samme område.



Figur 5 Tværsnit i den geologiske model langs motorvejstransekten. De lilla farve kombinationer er brugt til geotekniske boringer, vandstandspejlinger angivet med trekant og tilhørende filtre angivet med grøn. Farve kombinationerne i den geologiske model er lyserød=TS, Mørkerød=DS, Brun=ML, Lyseblå=GS og mørkere blå=GL.

Der er etableret en del geotekniske boringer indenfor fokusområdet, som endnu ikke er blevet indlagt i Jupiter databasen (Figur 6), der er den nationale geologiske database. Det er fra denne base, at boringsinformation trækkes ind i det værktøj der bruges til opstillingen af den geologi-

ske model, hvorfor der endnu må forventes at være mulighed for yderligere detaljering af tolkningen, ved at disse sidste geotekniske boringsinformationer er tilgængelige.



Figur 6 Geotekniske boringer uden pejledata information markeret med orange, geotekniske boringer med pejledata information markeret med rødt og boringer med information i Jupiter markeret med sort cirkel

Den seneste revision af den geologiske model har foregået i efteråret 2011 i forbindelse med at der blev gennemført simuleringer af spuns påvirkning i modellen. Der var to formål med revisionen. Det primære formål var at sikre bedre overensstemmelse mellem de i Cowi anvendte terrassesands tykkelser, der er nedre afgrænset af den prækvartære lerpakke. Cowi har i deres simuleringer angivet at afstanden mellem bund af spuns og top af prækvartær overfladen er vital for spuns påvirkning af grundvandsstande. Arbejdet med at justerer prækvartær overfladen indebar blandt andet importering af de geotekniske boringer, hvortil Cowi har retolket boringerne med henblik dels på at få bedre bestemmelse af prækvartær overfladen og dels med henblik på at bestemme heterogeniteten af den øvre del af den prækvartære pakke. Gennemgangen af disse har dels medført justeringer af tolkningspunkterne til den prækvartære overflade med op til 2 meter og dels medvirket til en reinterpolering ud fra disse med ekstra fokus på at dybden til prækvartær overfladen skulle fitte langs transektet. Det sekundære formål var at genoverveje heterogeniteten af de prækvartære enheder. Cowi's gennemgang af de geotekniske boringer, som penetrerede prækvartær overfladen, har medført at Cowi i deres beregninger af spuns påvirkning har tolket en øvre prækvartær lerenhed af højere hydraulisk ledningsevne end den dybere liggende prækvartære lerenhed. Efter at vi har gennemgået en lang række af de ældre geologiske boringer i området med formål at revurdere heterogenitet af de kvartære og prækvartære enheder er konklusionen at det er overvejende sandsynligt at den prækvartære pakke er mere heterogen end oprindeligt antaget i modelleringen. Specielt de nedre to enheder synes forholdsvis heterogene, dvs den nedre prækvartære sandenhed (GS2

på Figur 2) indeholder tilsyneladende en højere grad af lerindslag, men også den nedre prækvartære ler (GL2 på Figur 2) optræder mere sandet end oprindeligt antaget.

Diskussion af den geologiske model

De nye borer, der er lavet i forbindelse med projektet, og den indsamlede geofysik, omend endnu ufuldstændig i tolkning, har indtil videre kun medført mindre justeringer af jordlagenes placering og udbredelse i den geologiske model. Dette giver en vis tillid til modellens robusthed. Som nævnt ovenfor er der stadig områder, hvor den geologiske model er forholdsvis usikker. Til trods for at motorvejstransektet ikke krydser disse områder, kan hydrauliske påvirkning herfra ikke afvises.

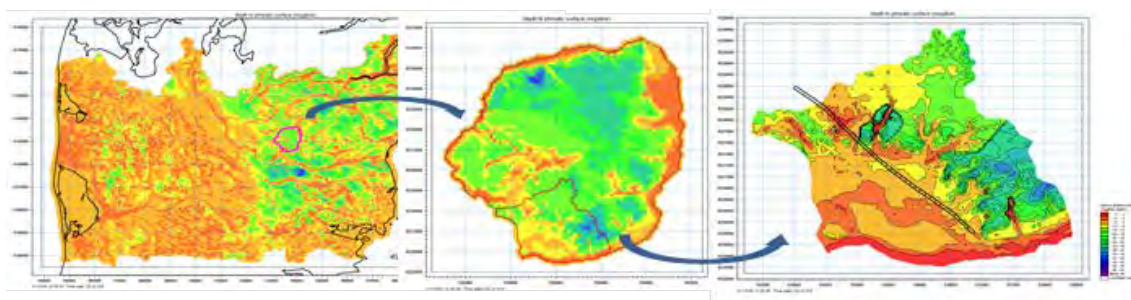
Heterogenitet i Søholt-terrassemagasinet kan tænkes at have betydning for vandstrømningen gennem dette ud til Silkeborg Langsø og Gudenådalene og dermed påvirke såvel gradienten fra skræntzonen mod Silkeborg Langsø som vandspejlsvariationerne i selve magasinet. Analyse af pejledata sammenholdt med den geologiske model (Bilag 3) peger på, at kontakten mellem Søholt terrassemagasin og Silkeborg Langsø er svagere end forventet, hvilket indikerer, at der kan være forhold i den geologiske opbygning, som vi ikke har med i vores geologiske model for området. Test med alternative konceptuelle modeller for betydningen af disse forhold er gennemført i den hydrologiske model, om end uden at det har medført forbedringer af dynamikken i modellen. Testen af de alternative konceptuelle modeller har derfor indtil videre ikke givet medført at den geologiske model er blevet revideret.

Hydrologisk model

Hydrologisk konceptualisering / parametrisering

Den hydrologiske model er opsat som en dynamisk koblet grundvand-overfladevands model, hvor udregning af nedbør-fordampning og dermed infiltration til/fra rodzonen er integreret i modellen. Modellen er opstillet i modelsystemet MIKE SHE / MIKE 11 og inkluderer en fysisk baseret beskrivelse af 1D vandløbs afstrømning, 2D overflade afstrømning, 1D rodzone/umættede zone strømning og 3D grundvandsstrømning. Der er valgt et fysisk baseret model kompleks dels for at kunne simulere distribuerede ændringer som følge af klimaændringer og dels for at kunne udnytte de data, der løbende indsamles under projekteringen og udførelsen af motorvejen.

Modelleringen er gennemført i et sub-model koncept, hvor randbetingelser hentes successivt fra storskala - til lokalskala niveau (Figur 7). Første niveau og dermed største skala er modelleret i 500m grid. Modellen til dette niveau er en modificeret udgave af DKmodel 2009 Midtjylland (GEUS rapport 2010/78), der blandt andet dækker hele oplandet til Gudenåen. Modificeringen er todelt, dels er den geologiske model for lokal området er indarbejdet i DKmodellen, og dels følger beregningslagene for DKmodellen beregningslagene for lokalmodellen. Niveau to er en oplands model opstillet i 100 m grid, der dækker området fra Gudenåen/Silkeborg Langsø i øst og syd til Lemming å og Alling sø mod henholdsvis vest og nord, svarende til lokalområdet i Figur 1. Højeste niveau er en lokalmodel opstillet i 20 m grid, dækkende oplandet til Søholt magasinet, hvor motorvejen er projekteret til at løbe gennem Silkeborg, svarende til fokusområdet i Figur 1. Fra modelleringen i 500 m grid udtrækkes tidsvarierende trykniveau randbetingelser fra de Prækvartære enheder til 100 m modellen, og fra 100 m modellen udtrækkes tidsvarierende trykniveau betingelser til de Kvartære og Prækvartære enheder til 20 m modellen.



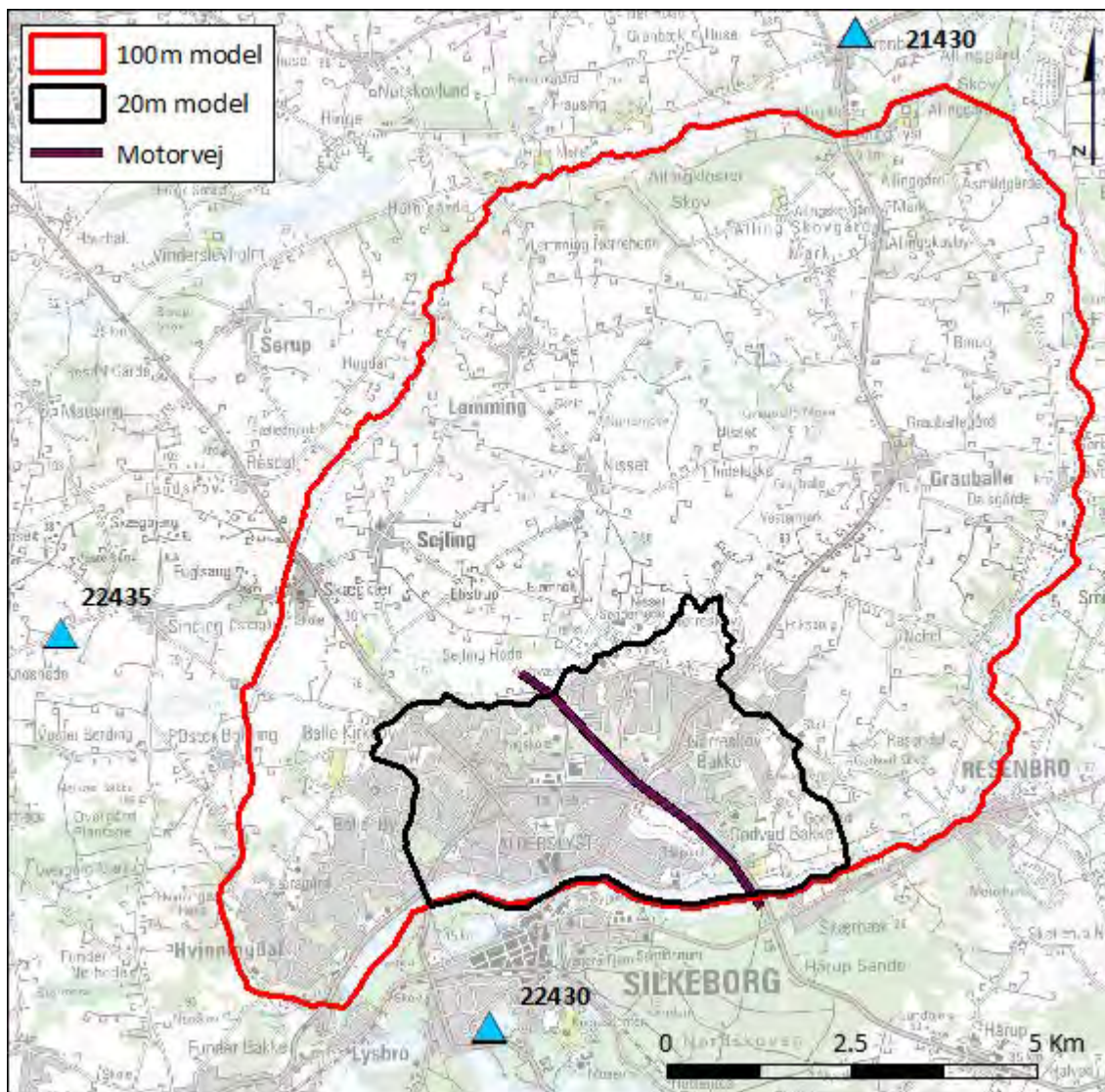
Figur 7 Placering af modeller og submodeller

Modellen er parametriseret ud fra et princip om at anvende enkel parametrisering dels for at undgå overparametrisering og dels for at sikre stor følsomhed overfor strukturelle elementer i modellen. De hydrauliske parametre i grundvandsdelen af den hydrologiske model er uniformt distribueret direkte efter geologiske enheder i den geologiske model, således at der indenfor

hver geologiske enhed er tilknyttet et sæt hydrauliske parametre (horisontal og vertikal hydrauliske ledningsevne, spændte og frie magasintal). I opbygningen af den hydrologiske model er der valgt at gøre maksimal brug af tilgængelige data, hvor mange af disse allerede var pre-processerede enten i DKmodel2009 Midtjylland opsætningen eller i Silkeborg forsyning Mike Urban 2010 opsætningen. Mike Urban 2010 opsætningen er en urban afstrømningsmodel for den nordlige del af Silkeborg med detaljeret information om regn- og spildevands ledningsnettet, som vi velvilligst har fået læse-adgang til via Silkeborg Forsyning og Orbicon.

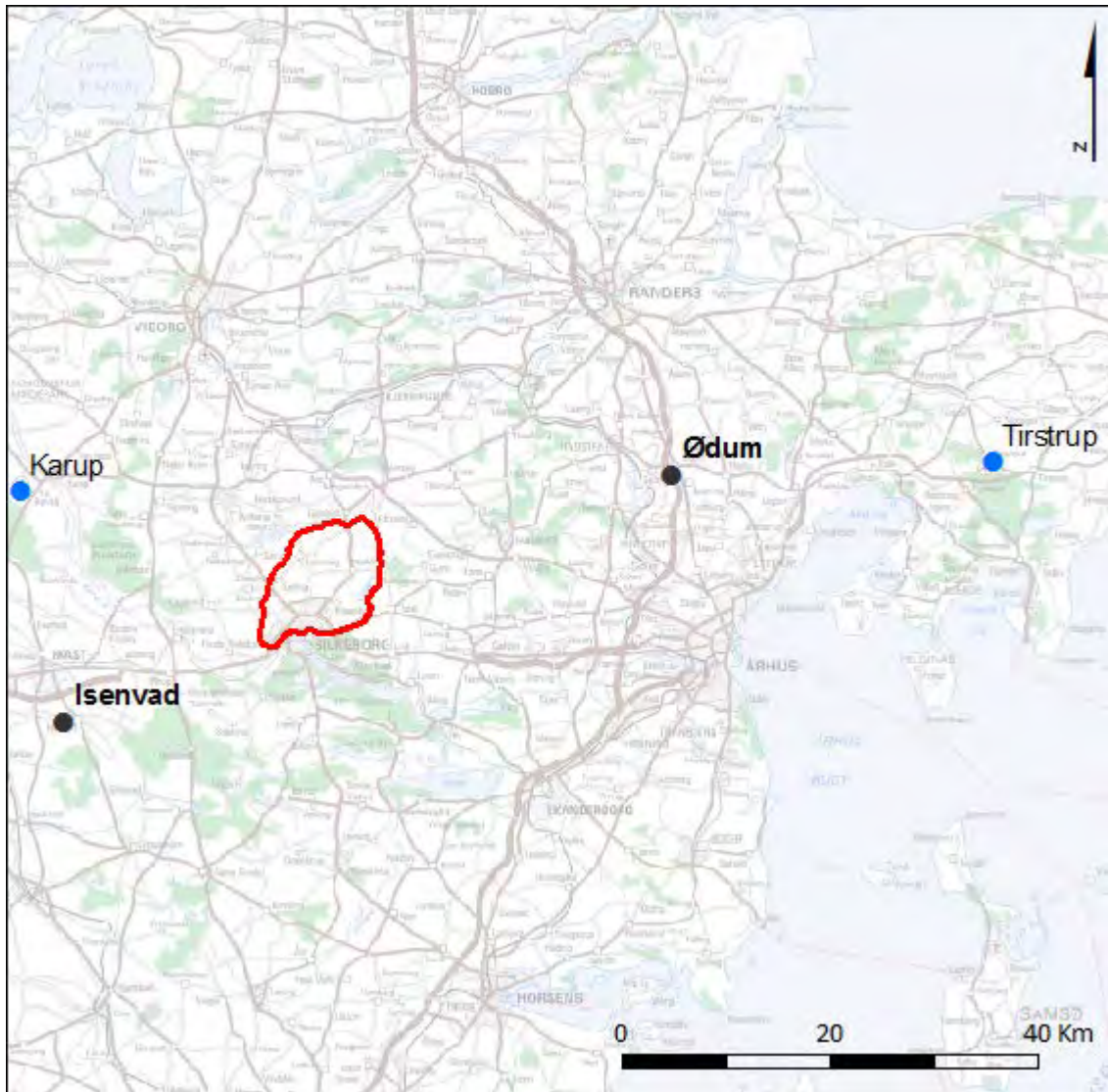
Nedbør/fordampning – areal anvendelse

DMI data i form af daglige værdier for nedbør, temperatur og globalstråling er brugt som input til modellerne. For 500 m modellen er anvendt DMI's klimagrid for nedbør i 10km grid og temperatur og potential fordampning i 20 km grid. For 100 m og 20 m modellerne er der indhentet stationsdata. Nedbørsdata stammer fra stationerne 21430, 22420 og 22435 (Figur 8). Data nedbørskorrigeres med regionale dynamiske korrektionsfaktorer og midles, før de bruges i modellerne (Stisen et al., 2011).



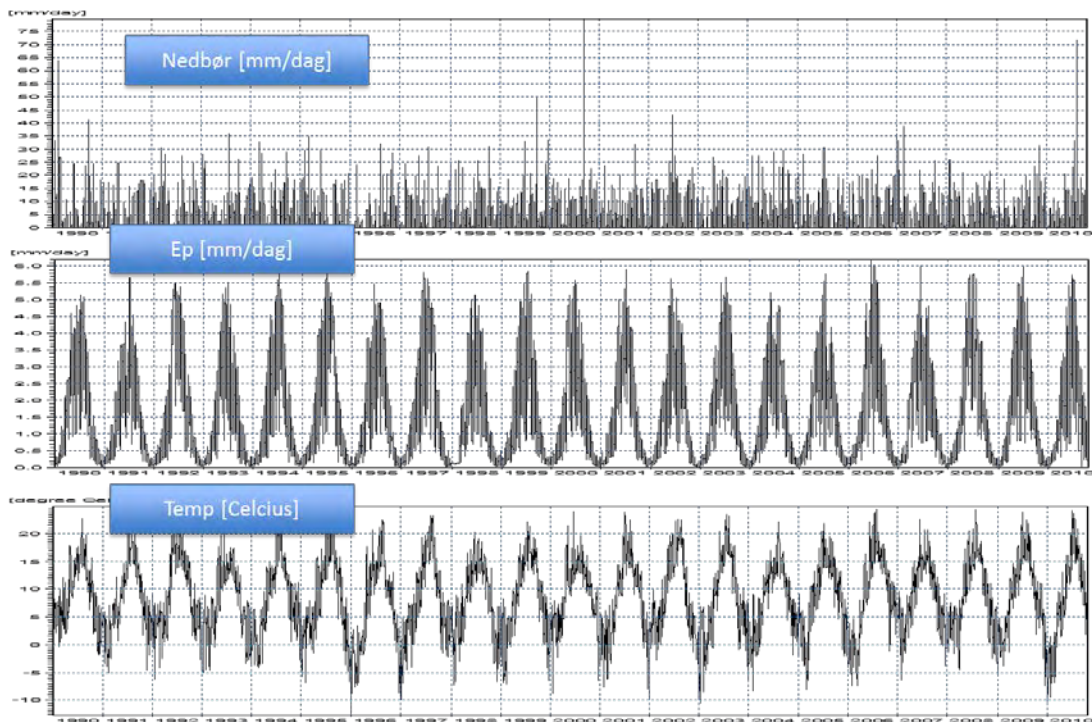
Figur 8 DMI Stationer anvendt til beregning af middelnedbør for området. Der er anvendt regionale dynamiske nedbørskorrektioner

Temperaturdata stammer fra stationerne Karup og Tirstrup (Figur 9). Stationsdata omregnes til daglige værdier af vægtet middel temperatur, hvor vægtingen er omvendt proportional med afstanden mellem stationerne. Temperaturen bruges dels direkte i modellerne til styring af, om nedbøren falder i fast eller flydende form og til smeltning af evt. snepakke efter graddage princippet og dels indirekte i modellen ved, at temperaturen sammen med globalstrålingen anvendes til beregning af daglige værdier for potential fordampning ved hjælp af Makkink formelen. Globalstrålings data stammer fra Ødum og Isenvad (Figur 9).



Figur 9 Potential fordampning beregnet ud fra Makkink formel, med global strålingsdata fra Ødum og Isenvad og vægtet temperatur data fra Karup (0,68) og Tirstrup (0,32)

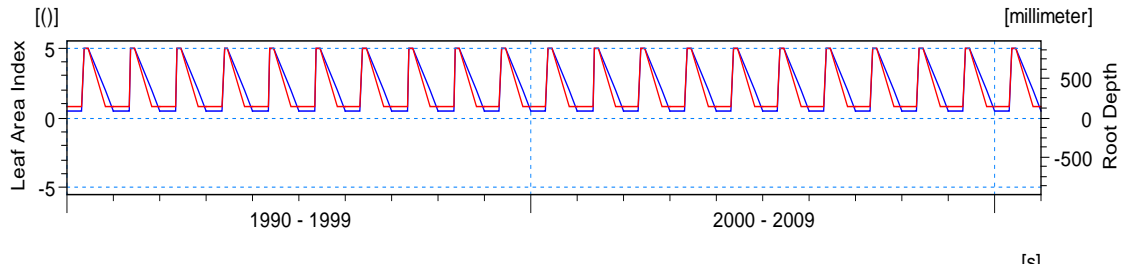
Figur 10 viser de i 100m og 20m modellerne anvendte input data fra middel af daglige værdier for den stations korrigerede nedbør, den Makkink beregnede potentielle fordampning og den vægtede temperatur for hele simulerings perioden 1990-2010.



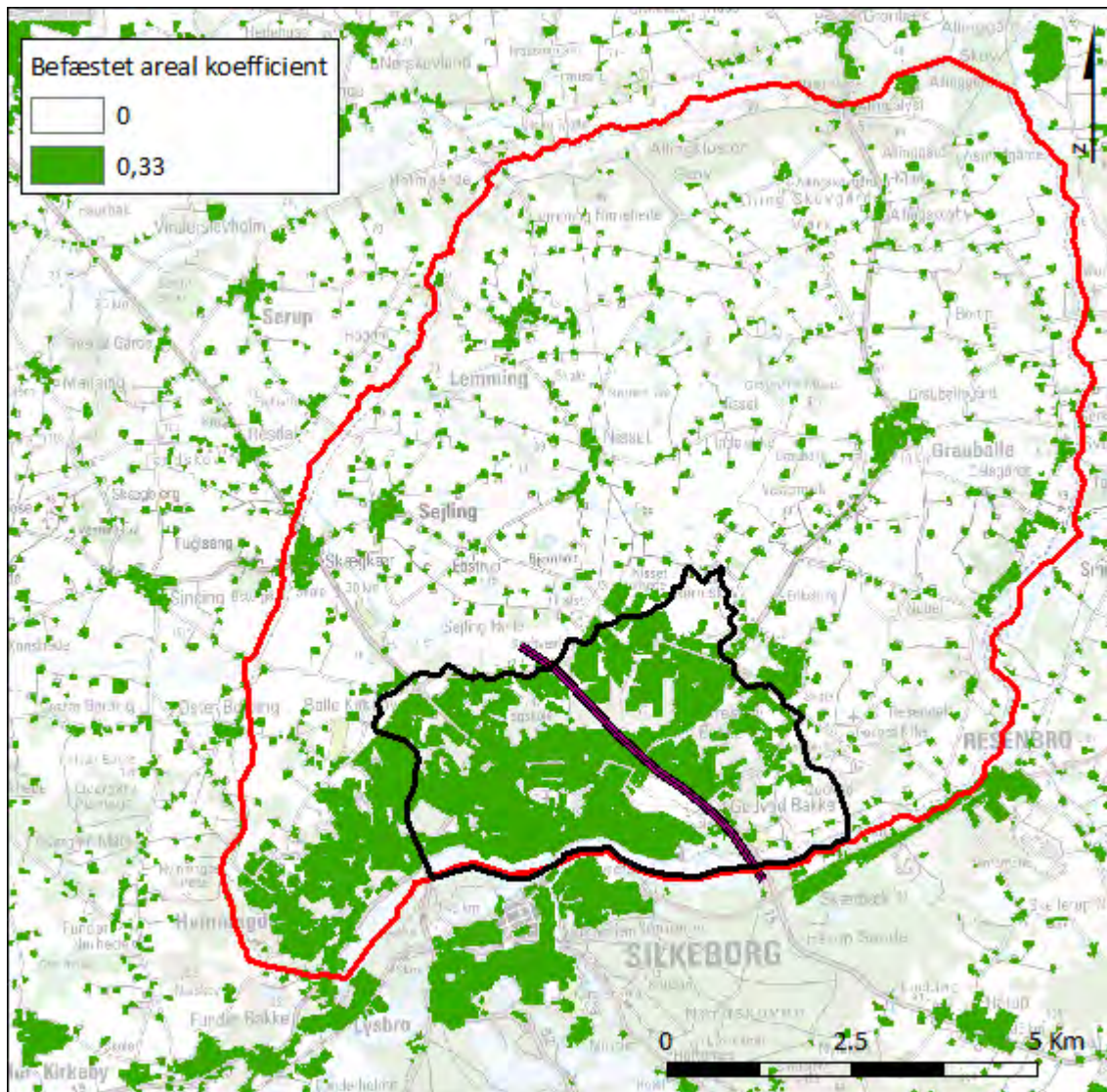
Figur 10 Middelt daglige værdier af stations korrigerede nedbør, Makkink beregnet potentiel fordampning og vægtet temperatur

Modelteknisk bliver nedbøren for hvert tidsskridt lagt på overfladen. På befæstede arealer afledes 1/3 del af nedbøren direkte til kloak/vandløb. Områder med befæstede arealer (Figur 12) er bestemt ud fra Top10DK data og data fra Silkeborg Forsyning Mike Urban model opsætning (Orbicon version 2010). Den restende del af nedbøren nedsiver til rodzonen afhængigt af vandmætningen i rodzonen, således, at der ved fuldt mættede forhold genereres topografisk styret overfladisk afstrømning til vandløb eller lokale depressioner. Ved temperaturer under 0°C akkumuleres nedbøren på overfladen som sne, indtil temperaturen igen stiger og temperatur afhængig afsmeltning påbegynder.

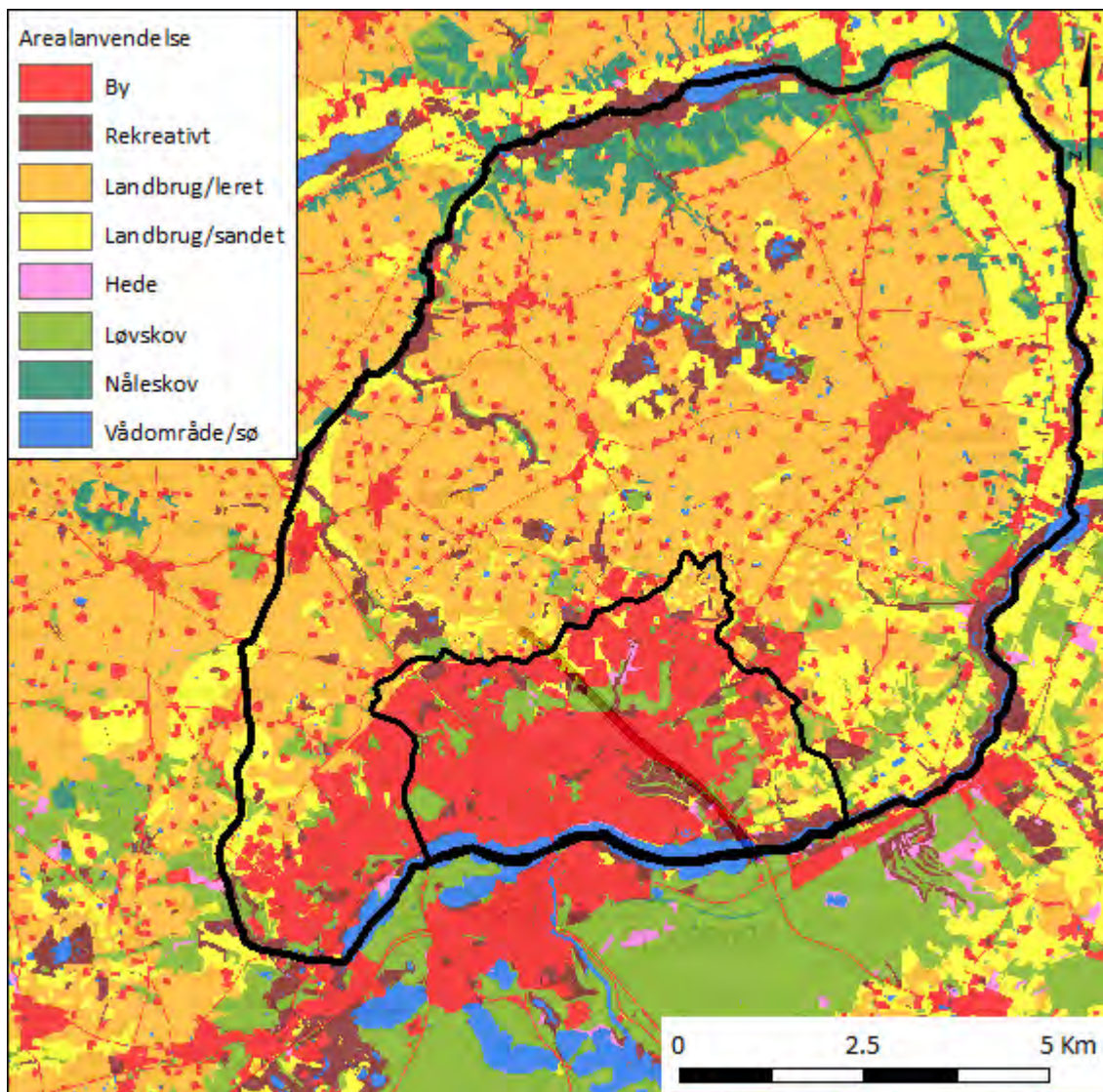
Fordampningen fra rodzonen er en funktion af den potentielle fordampning og vandindholdet i rodzonen, som igen varierer med arealanvendelse og jordtyper. Areal anvendelsen (Figur 13) er fordelt på 10*10 m² celler dels efter AIS databasen og dels efter Mike Urban opsætning (Orbicon version 2010). Areal anvendelsen er simplificeret til 8 forskellige enheder; (zone-nummer:beskrivelse) 1: by, 2: rekreativt, 3: landbrug/leret, 4: landbrug/sandet, 5: hede, 6: løvskov, 7: nåleskov og 9: vådområde/sø. For hver af areal anvendelserne er der specificeret udvikling i rodzonedybde og bladareal indeks (Figur 11).



Figur 11 Udvikling i rodzone dybde og blad index for løvskov



Figur 12 Andelen af regnvand der afledes direkte til vandløb fra befæstede arealer

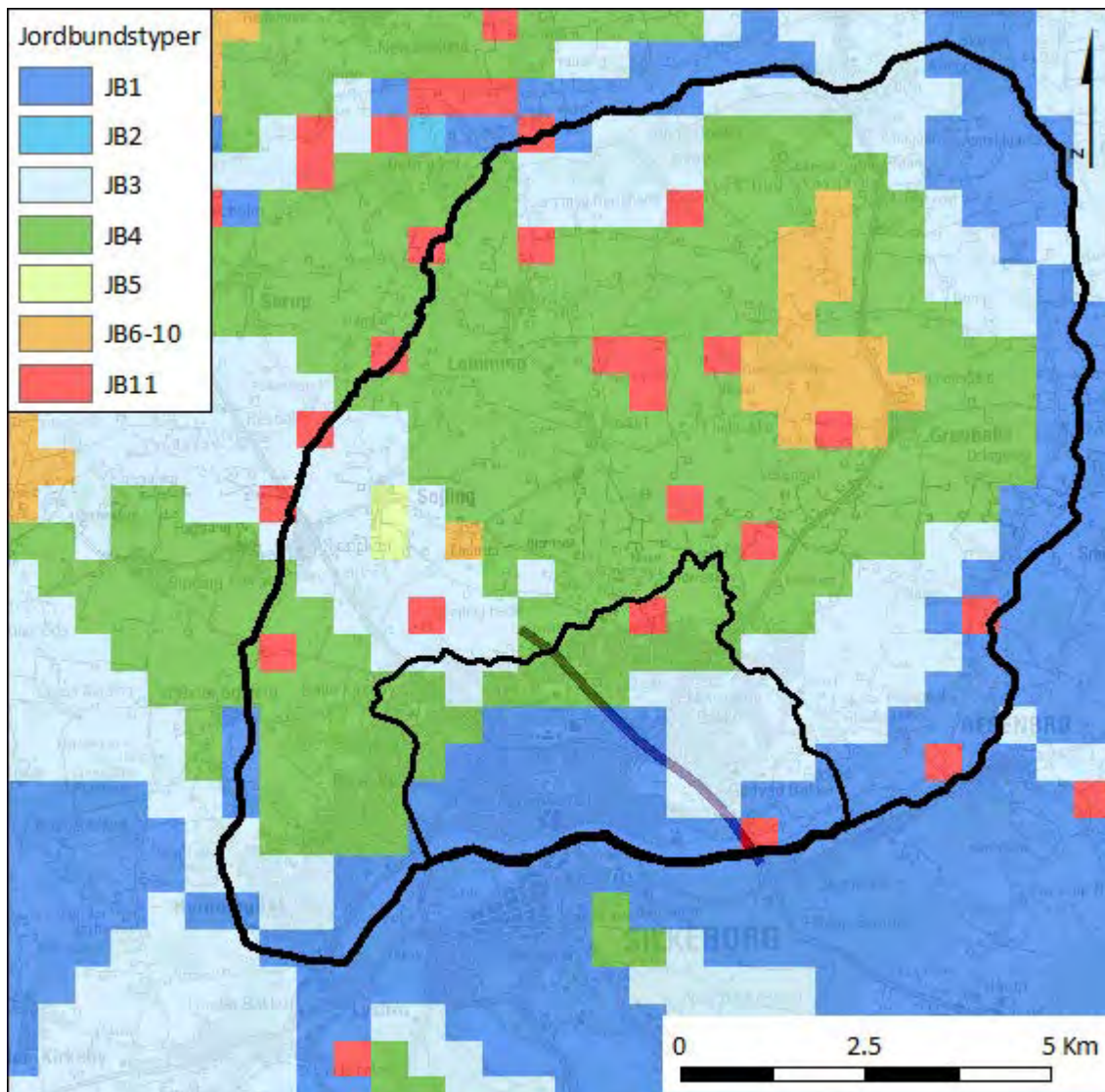


Figur 13 Arealanvendelses fordeling ud fra AIS data og MikeUrban opsætning (Orbicon version 2010)

Rodzonedelen af modellen er koblet til den umættede zone. Der er i modelløsningen valgt at benytte et simplificeret umættet zone modul kaldet "Two-layer", som er fokuseret mod vandbalancen. Det første "layer" udgøres af rodzone beskrivelsen og her beregnes den aktuelle fordampning og volumen af vand. Det andet "layer" danner den forsimplerede kobling mellem UZ og SZ, således at der tages højde for den varierende fordampning, der vil forekomme i tid og sted som resultat af varierende dybde til grundvandsspejlet. Metoden er god til modelløsninger, hvor der som her fokuseres på feedback mellem nedbør-fordampning og grundvandsvariationer, og hvor dybden til grundvandsspejlet ikke er alt for stor.

I Two-layer modulet indgår infiltrationskapaciteten (approksimativt hydraulisk ledningsevne for overjorden) og tre jordfysiske parametre, vandindhold ved hhv. mætning (θ_s), markkapacitet (θ_{fc}) og visnepunkt (θ_{wp}), der alle hentes fra DKmodel2009 Midtjylland. Data til two-layer modulet er en dannet ved en simplificering af Institut for Jordbrugsproduktion og Miljø (JPM)

ved Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet's (DJF) 250 m raster grid af jordbundstyper (Figur 14).

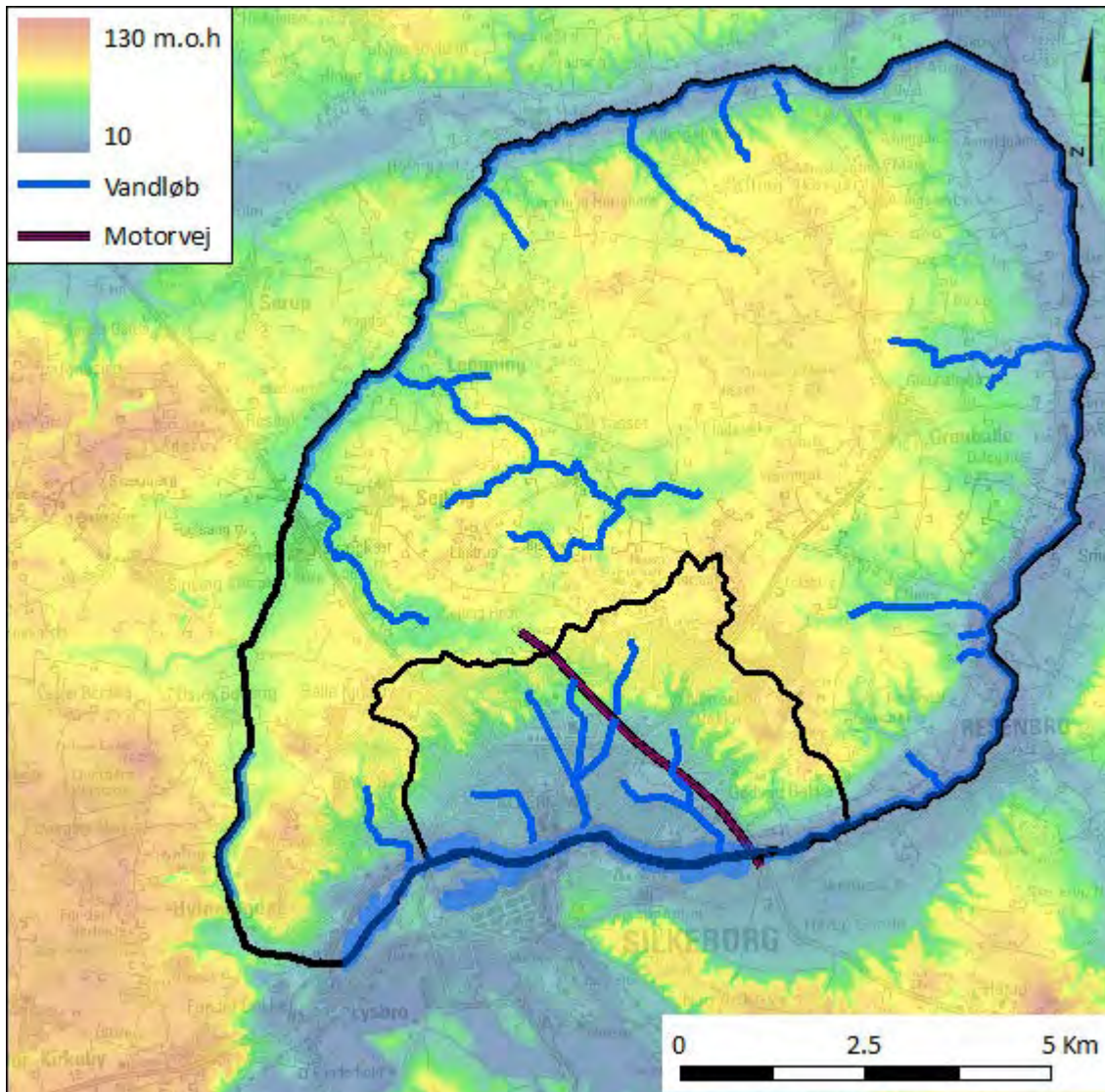


Figur 14 Jordbundstype fordeling i den umættede zone (simplificeret DJF JB type klassificering)

Overflade modul

Overfladevandssystemet løses som en endimensional vandstrømning i vandløb, hvor den fysiske udformning af vandløbssystemet beskrives i MIKE11 med vandløbstværsnit, tværsnit stationering og vandløbs geografi . Vandløbsdata stammer dels fra DKmodel2009 Midtjylland og dels fra yderligere digitalisering af vandløbsgeografi og tværsnit ud fra den landsdækkende laseropmålte højdemodel og feltopmålinger. Tværsnit og vandløbslængde har betydning for routingen af vand i 1D, mens tværsnitskoter og vandløbs geografi er af betydning for vandudveksling mellem vandløb og grundvand/overfladisk afstrømning. Medtagne vandløb og deres

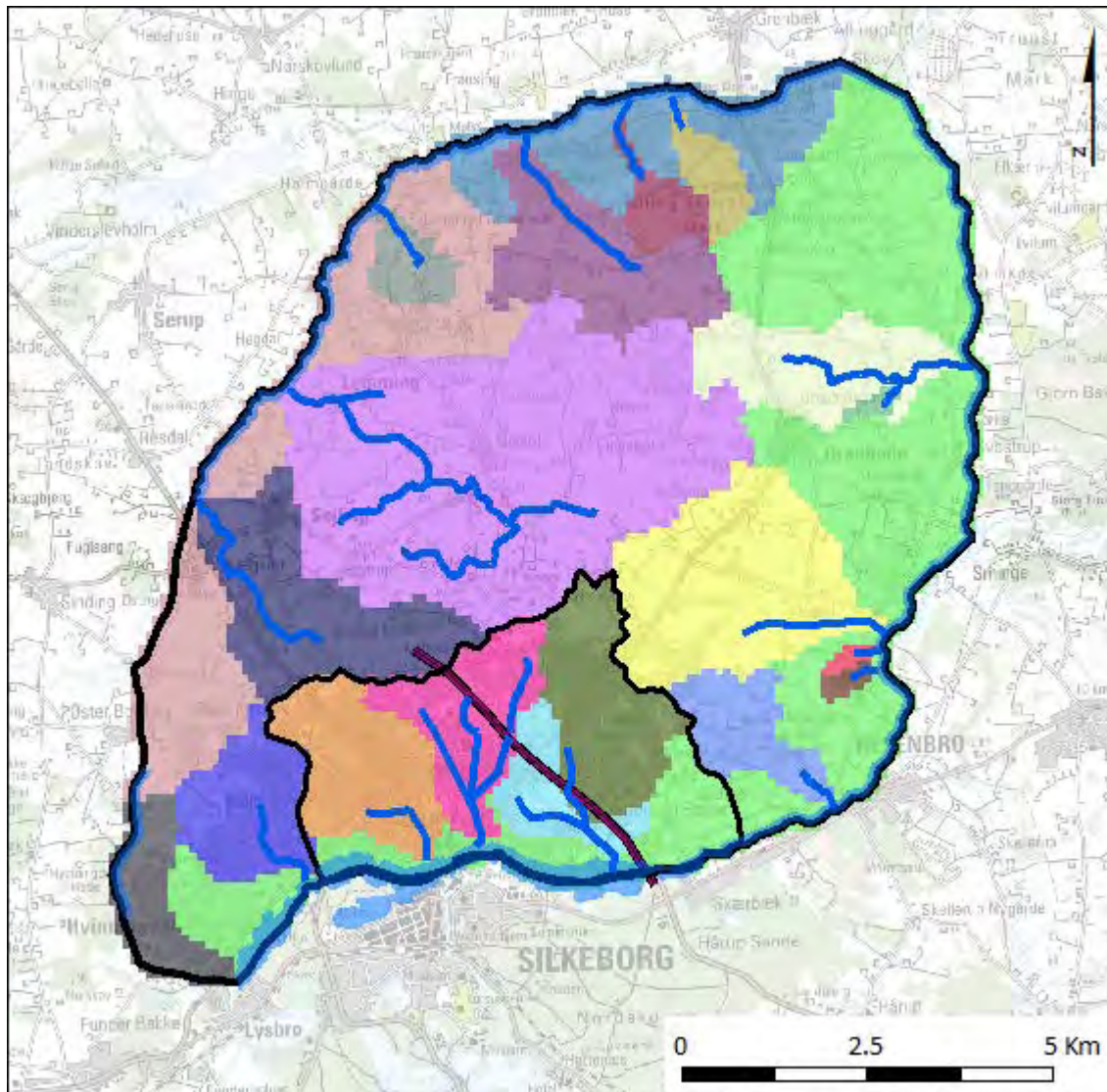
placering ses af Figur 15. Der er i nærværende version ikke medtaget strukturer i vandløbsberegningerne. Vandløbssystemet gennem fokus området er væsentligt modificeret med strukturer, som overløbsværker og forsinkelses bassiner. Dette medfører, at modellen ikke kan forventes at ramme timing og volumener på enkelt hændelser, men stadig forventes at kunne ramme vandbalancer ned til måneds niveau, hvilket er i overensstemmelse med det aktuelle ambitionsniveau.



Figur 15 Vandløbs placering

Overfladeafstrømning til vandløb og grundvand styres af topografiske forskelle og vandstand på overfladen undtagen for den del af afstrømningen, der genereres af befæstede arealer, hvorfra afstrømningen routes direkte til nærmeste vandløb indenfor drænoplandet. Hele området er inddelt i drænoplande (Figur 16), som primært følger spildevandsoplands afgrænsninger fra Mike Urban opsætningen 2010 og sekundært følger de topografiske oplande. Ud over vand fra befæstede arealer routes også "drænvand" fra kunstige dræn, dræningskanaler og

utætte kloaker efter samme drænoplans afgrænsninger. Mængden af drænvand afhænger af to model parametre, drændybde [m] og drænkønstant [s^{-1}], samt af dybden til det frie vandspejl, således at dræn kun er aktive, såfremt det frie vandspejl stiger over drænniveauet. Det er i modelopsætningen valgt at have konstant drændybde (på 1 meter under terræn) og drænkønstant overalt i modellen, dels fordi der ikke er eksisterende data med dræn information fra området og dels ud fra antagelsen om, at hvis der var områder med vandstand tæt på terræn, så ville man have udført en eller anden form for afledning af vandet for at kunne udnytte dem til landbrug eller bebyggelse. En gennemgang af de historiske kort (Figur 4) antyder da også at der må have været gennemført en dræning af området



Figur 16 Oplands afgrænsning for dræn og spildevand

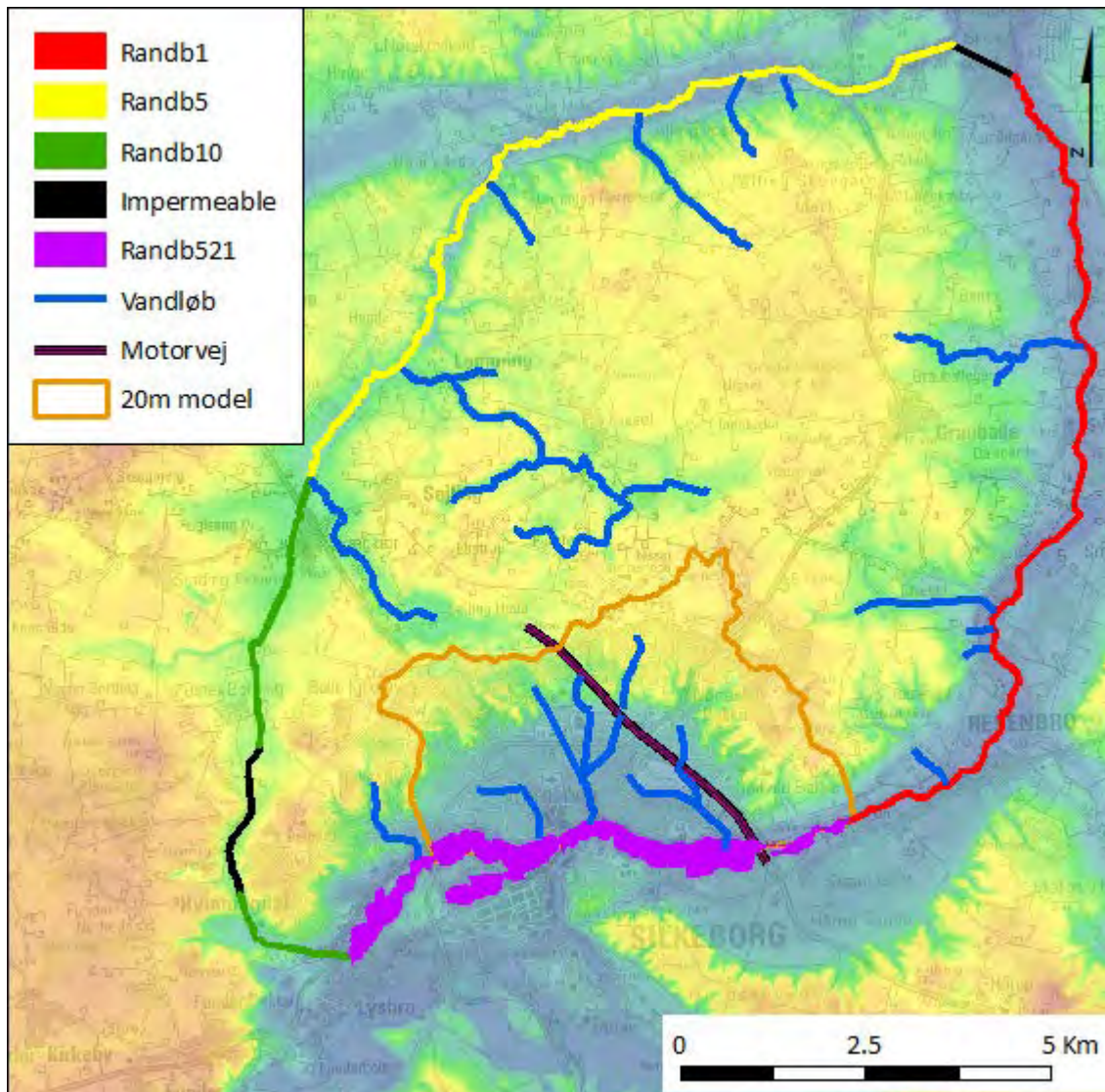
Den manglende information om dræn / kloak lækage i de bebyggede områder vil i nogen grad hæmme analysen af simuleringer af fremtidige vandstands niveauer ligesom den simplificerede vandløbsopsætning vil hæmme analysen af ekstreme nedbørs hændelser. Begge dele forven-

tes at kunne forbedres betydeligt ved sammensmeltning af den eksisterende Mike Urban opsætning og den hydrologiske model opsat i nærværende projekt. Der er gennemført enkelte analyser af befæstningsgradens og drænybdens betydning for den hydrologiske models gengivelse af dynamikken i pejledata, men resultaterne uden entydig konklusion og har efterfølgende ikke givet anledning til ændringer i modelopsætningen.

Grundvandsmodul

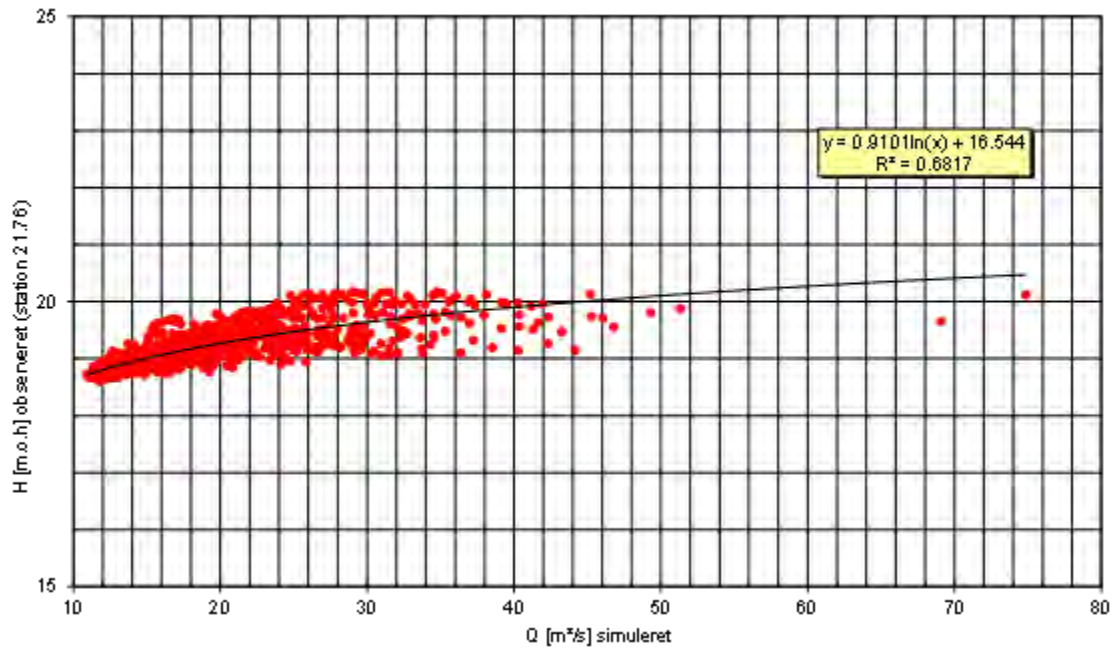
Grundvandsmodulet arbejder med hydrauliske parametre fra de geologiske lag og med beregningslag, der er sammenfaldende med de overordnede geologiske strukturer. I 500 m modellen anvendes fire beregningslag, mens der anvendes fem lag i 100 m og 20 m modellen. Forskellen i antallet af beregningslag dækker over, at der i 500 m modellen er en ekstra prækvartær enhed, som indenfor lokalmodelområdet ikke umiddelbart bidrager med ekstra information, til gengæld er der i lokalområdet sket en opdeling af det ene af disse prækvartære lag til tre separate enheder.

Udvekslingen mellem de enkelte modeller foregår via randbetingelser. Fra 500 m modellen hentes trykniveau randbetingelser for de prækvartære sandenheder i den vestlige side af 100 m modellen, mens der i den østlige side langs Gudenåen i 500 m modellen ikke iagttages vandstrømning på tværs af Gudenådalen, hvorfor der anvendes impermeabel rand langs denne i 100 m modellen. I de kvartære (øvre) dele af 100 m modellen antages det, at vandudvekslingen sker via ådalene til vandløb og søer, hvorfor der ikke hentes randbetingelser fra 500 m modellen, men i stedet anvendes fastholdt tryk i det øverste beregningslag svarende til topografi langs ådalene og varierende trykniveau svarende til vandstands niveauet for Silkeborg Langsø langs denne (Figur 17).

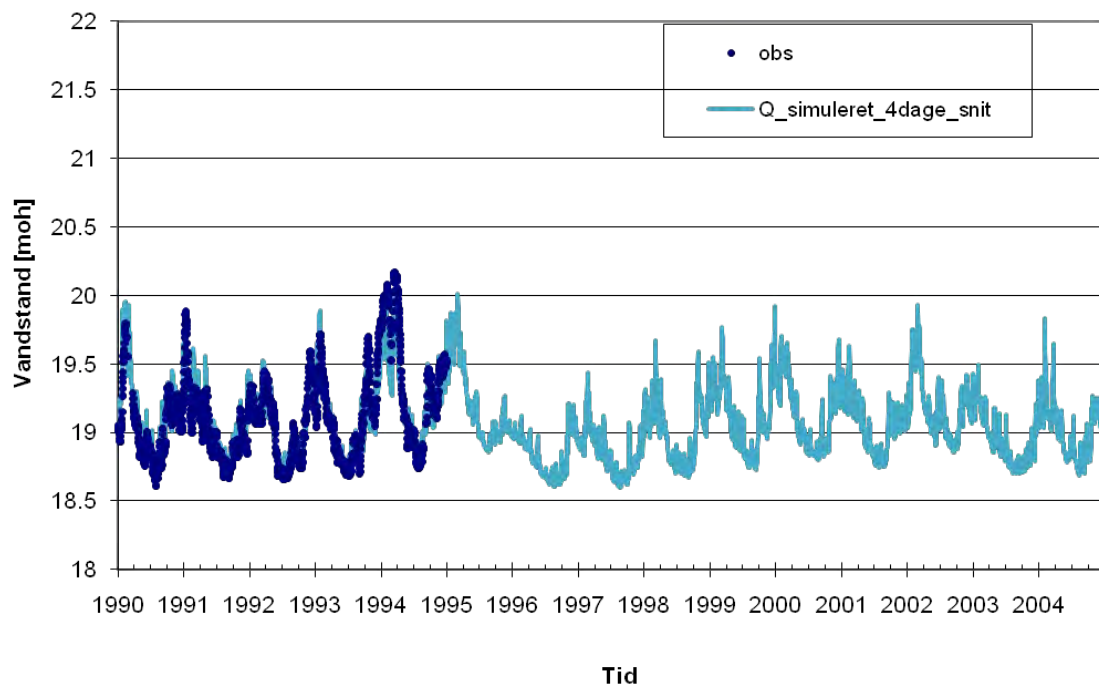


Figur 17 Områder med fastholdt tryk svarende til topografi langs ådale (kode 1, 5 og 10), områder med impermeable rand langs topografisk vandskel og områder med tidsvarierende tryk ved Silkeborg Langsø (lilla kode 521). Rand med tidsvarierende tryk i 20 m modellen er angivet med orange

Der er for det øverste beregningslag ikke tale om en 100% trykniveau styret randbetingelse, men om en såkaldt Type 3 trykniveau randbetingelse, hvor modeeffekten af påtrykt tryk langs randen dæmpes af en lækage koefficient. Der er etableret en Q/h relation for perioden 1990-1994 (Figur 18) af simuleret vandføring (4-dages gennemsnit) fra 500 m modellen gennem udløbet ved Silkeborg Langsø (Q) og observeret vandstand for Silkeborg Langsø (h). Denne Q/h relation bruges til simuleringer af vandstande i Silkeborg Langsø med 500 m modellen for de resterende perioder. Vandstanden i Silkeborg Langsø bruges som randbetingelsen for øvre beregningslag i 100 m hhv 20 m modellen langs Silkeborg Langsø (Figur 19). Langs den resterende del af modelranden er der til 20 m modellen hentet trykniveau randbetingelser fra 100 m modellen.



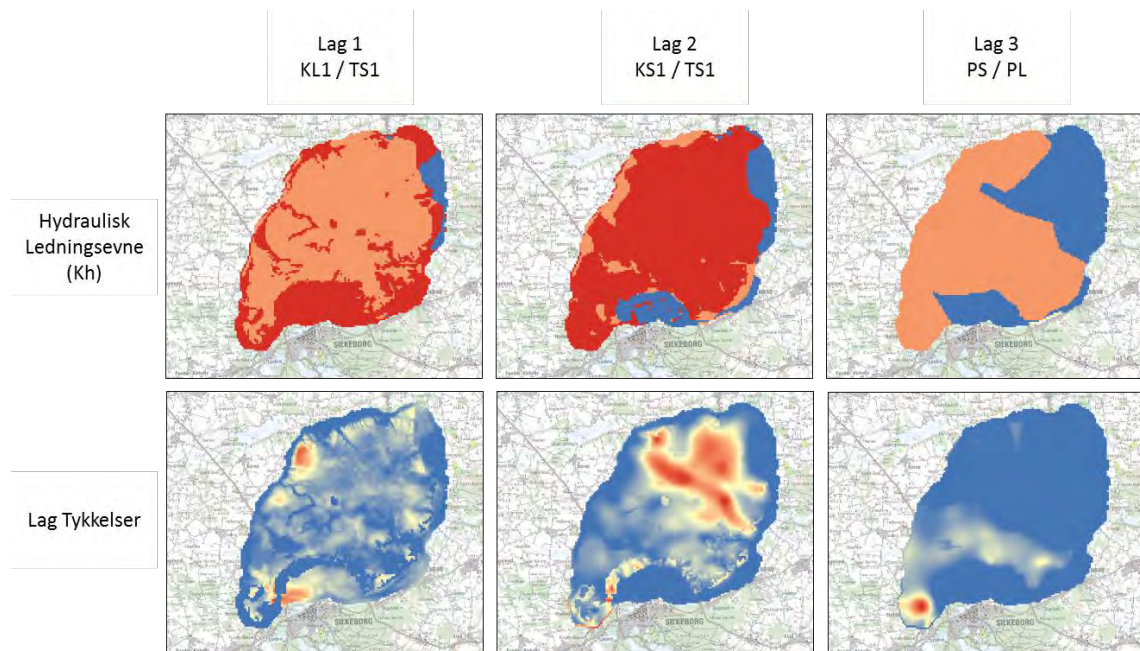
Figur 18 Fit af Q/h relationen på baggrund af vandstandsmålinger (h) fra Silkeborg Langsø og simulerede gennemstrømningsdata (Q) fra DKmodellen. Q/h relation bruges til at danne randbetingelser for klimascenarierne og for perioder med manglende vandstandsdata



Figur 19 Simuleret vandstand via den etablerede Q/h relation og observeret vandstand for Silkeborg Langsø

De tre beregningslag i 100m og 20m modellerne dækker over flere geologiske enheder. Figur 20 viser lagtykkelser af de enkelte beregningslag og fordelingen af hydrauliske ledningsevner

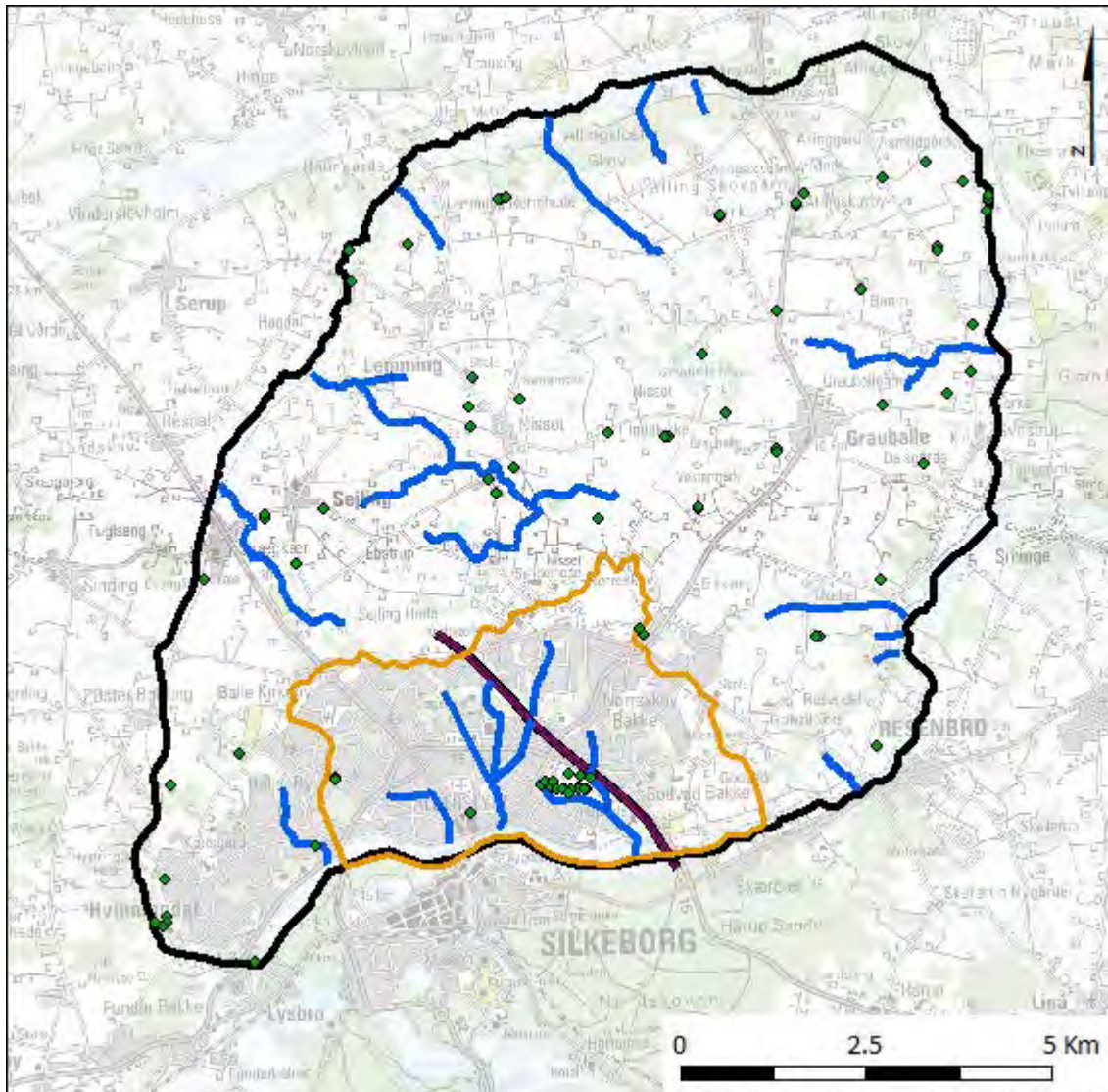
indenfor de enkelte lag. Fordelingen af de hydrauliske ledningsevner er styret af den geologiske model, hvor alle enheder er repræsenteret med unikke hydrauliske ledningsevner på nær Søholt-terrassemagasinet (TS1). I dette er der indarbejdet zoner med hydrauliske ledningsevner hentet fra analysen af prøvepumpingerne.



Figur 20 Tykkelse af beregningslag (rød=tyk, blå=tynd) og fordeling af hydraulisk ledningsevne (rød=høj, blå=lav) for beregningslag i modellen

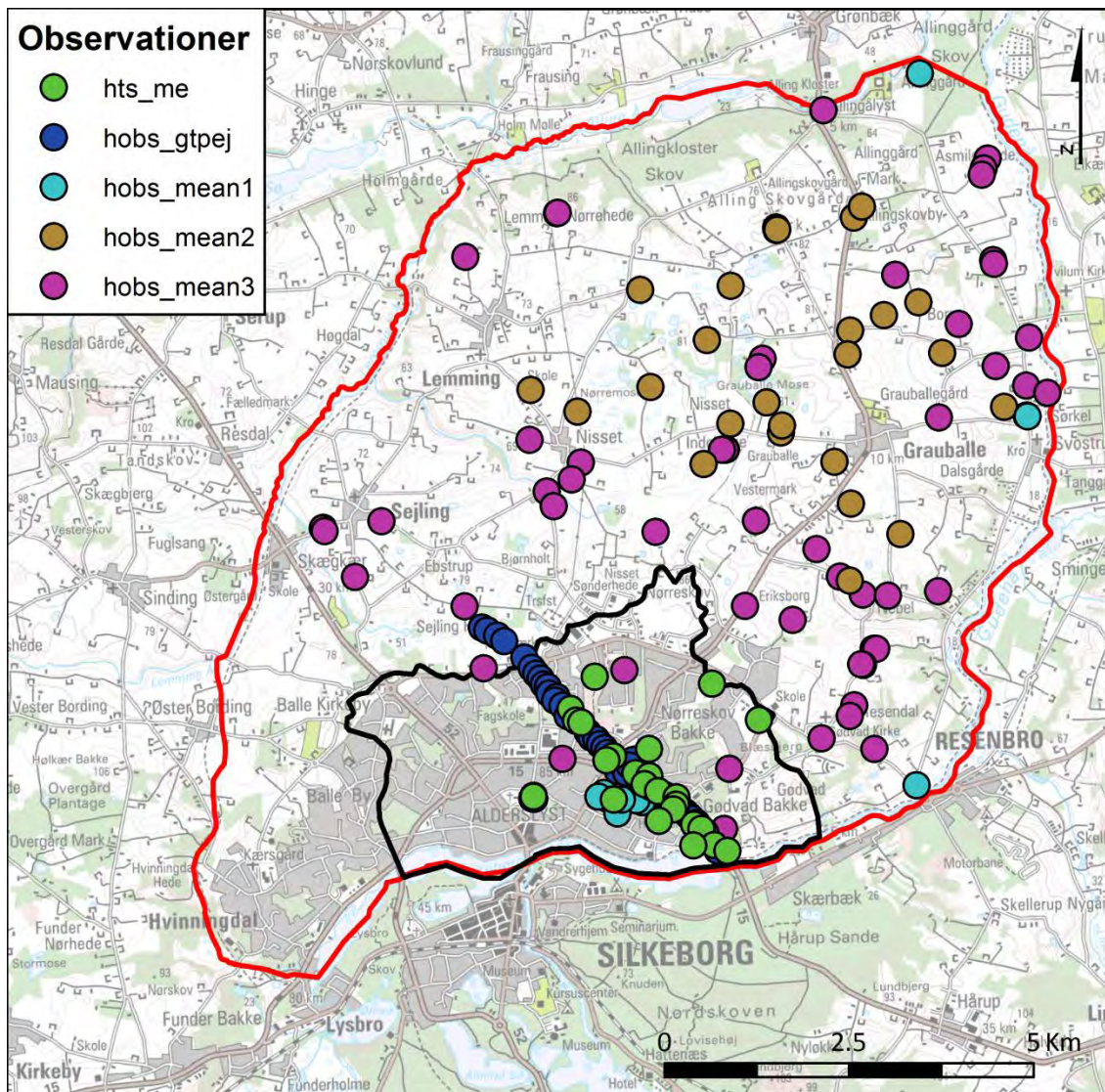
Indvindinger og pejlinger

Indvindingsdata er hentet direkte fra Jupiter databasen, hvor der er etableret kobling mellem indtag og anlæg. Data i Jupiter databasen ligger lagret med årlige variationer. Indvindingen er i modellen fordelt ud på indtag, hvor indtagene er vertikalt tilpasset, således at de altid ligger i et vandførende beregningslag. Placeringen af indtag er vist på Figur 21, hvor det fremgår, at en stor del er placeret i selve Søholt-terrassemagasinet. Indvindingen fra dette magasin udgør i perioden 1990-1998 størstedelen af den samlede indvinding på 1,5 – 2,0 mill m³/å. Den samlede indvinding falder efter lukningen af Søholt borerne og de sidste afværge borer i 1998 til 2-300.000 m³/år for den resterende del af simulerings periode 1998 – 2011.



Figur 21 Placering af indvindinger indenfor modelområdet

Pejlinger anvendt til kalibrering af modellen er tilsvarende hentet direkte fra Jupiter databasen på nær de pejlinger fra geotekniske borer, som er indsamlet i forbindelse med dette projekt (angivet med grøn på Figur 22). Herudover er der indsamlet peyledata fra de borer, som specifikt er etableret som pejleboringer i forbindelse med dette projekt. Peyledata herfra indsamles og kvalitetssikres løbende af Cowi. Den første gruppe af pejlinger bruges til sammenligning med middelvandstand for kalibreringsperioden, mens de sidste gruppe sammenlignes direkte med dynamiske model simuleringer for den periode data er målte.



Figur 22 Placering af pejle-tidsserier anvendt i optimeringen med minimum ét pejlepunkt indenfor perioden 1990-2010. Farvene angiver dels hvilket lag pejlingerne er tilknyttet og dels om pejlingerne er indsamlet i forbindelse med dette projekt

Det vurderes at området langs transektet er godt dækket ind med pejlinger, men at skræntzonen mellem Søholt-terrassemagasinet er mindre godt dækket ind. Der er ganske få pejlinger, der kan bruges til at vurdere gradienten mellem det kvartære magasin og de dybere liggende prækvartære magasiner, hvoraf der i projektet er etableret tre pejle borerings filtersat i disse magasiner (bilag 2).

Model kalibrering

Der er undervejs i projektet opstillet og kalibreret en række hydrologiske modeller for området i takt med at den geologiske model blev udviklet og revurderet. Fælles for modellerne er kalibreringsstrategien om, at der indenfor hver af de geologiske enheder kun skal være et sæt

hydrauliske ledningsevner. Der er ikke foretaget kalibrering af spændte og frie magasintal, da det er vurderet at tilgængelige data materiale ikke kan bære en sådan øvelse. Det forventes at kvantiteten og kvaliteten af tilgængelige tidsserier med pejledata og afstrømningsdata indsamlet af projektet gradvist bliver udvidet, så det bliver meningsfyldt at foretage kalibrering af magasintal. Den parametergruppe der indgår i beskrivelse af overflade, rodzone og umættetzone er hentet fra DKmodel2009 Midtjylland. Parametrene i denne gruppe er typisk følsomme overfor vandbalance data og vandføringsdata, som ikke har været tilgængelige for lokalområdet, hvilket også er grunden til at disse ikke er medtaget i kalibreringen.

Den sidste gruppe af parametre, der har indgået i kalibreringen på et tidligt stadie, men ikke er medtaget i den seneste udgave, er lækagen mellem vandløb og grundvandsdel og lækage mellem Silkeborg Langsø og grundvandsdel. Denne gruppe må forventes at være særligt følsomme overfor data, som ikke har været tilgængelige, der kan beskrive vandbalancer eller sammenhængen mellem randvariationer og magasin variationer f.eks. trykfluktuationer i Søholt-terrassemagasin sammenholdt med vandstandsvariationer i Silkeborg Langsø. Lækagekoefficienter til vandløb og randbetingelser har derfor været ekstremt usikre bestemt i de tidligere stadier af parameter optimering, men det var forventelig at de kunne bidrage til beskrivelsen af dynamikken i området (specielt vandsstandsvariationer i Silkeborg Langsø og variationer i grundvandsstanden i Søholt-terrassemagasin). Efterfølgende test af lækage parametrene har dog indtil videre ikke kunne bekræfte dette.

Cowi har gennemgået tre prøvepumpninger udført af GEO i 2010 i Søholt-terrassemagasin langs transektet. Prøvepumpningerne fra boring 3368, 3399 og 3456 gav transmissiviteter, som blev vurderet på niveau med tidligere prøvepumpninger udført af Rambøll og GEO i borerne 3461 og 3456 i forbindelse med forundersøgelserne. Samlet set vurderede Cowi at "en realistisk K-værdi ligger her på ca. $1,15 \cdot 10^{-3}$ m/s. Længere mod vest er der indikationer på, at K-værdien er højere". Under alle omstændigheder er der ikke modeltekniske argumenter for at denne divergens er problematisk, og samlet set vurderes det ikke at kunne forbedre den totale model performance (hvor godt modellen simulerer observerede trykniveauer). Det i samråd med Cowi blevet aftalt, at indlægge zoner omkring de borer, der er blevet prøvepumpet, K-værdi fundet ved tolkning af prøvepumpningerne på $1,15 \cdot 10^{-3}$ m/s. Hovedargumentet for at indarbejde zonen er at opnå konvergens mellem forventede og modelberegninger af sænkningstrakter/indvindingsmængder hvilket forventes at være direkte afhængig af lokal transmissivitet. Da lokal evidens i forhold til transmissiviteter er tilgængelig via prøvepumpningsresultaterne er dette indlagt i den endelige model som zoner med fast hydraulisk ledningsevne, zoner som ikke indgår i kalibreringen.

Alle kalibreringer er sket i 100m modellen, hvorefter parametre er overført til 20m modellen. 100 m modellen er kalibreret inverst ved anvendelse af det modeluafhængige optimeringsprogram PEST ver. 11.8 (PEST). Modellen er kalibreret for perioden 2005 – 2011, men da erfaringer har vist, at der kan gå lang tid før effekten af en ændring i en parametre er slået fuldt igennem, er det valgt at anvende perioden 1990-2005 som opvarmningsperiode for modellen. Valg af kalibreringsperiode er dels sket under hensyn til, at der skulle være tilgængelige klimadata

til at drive 500 m modellen, og at der skulle være nogenlunde ensartede indvindingsforhold under kalibreringsperioden.

For hver kalibreringskørsel er der udtrukket middel af trykniveauer for perioden 2005-2011, hvilket dels er sammenlignet med pejledata hentet fra Jupiter databasen omregnet til middel for perioden 1990-2010 og dels pejledata indsamlet i forbindelse med de geotekniske undersøgelser omregnet til middel for indsamlingsperioden. Herudover er der for 33 filtre sammenlignet (daglige middelværdier) pejledata fra de af Cowi vedligeholdte filtre (Cowi-pejl) mod simulerede dynamiske trykniveauer. Afvigelserne mellem observerede pejledata og simulerede trykniveauer vægtes og opsummeres via en objektiv funktion, som den inverse rutine (PEST) forsøger at minimere gennem successiv justering af kalibreringsparametrene og gentagne modelberegninger af afledte trykniveau variationer.

$$Obj = \sum_i (w_i \times HTS_ME_i)^2 + \sum_i (w_i \times HTS_MaxHDiff_i)^2 + \sum_j (w_j \times hobs_mean1_j)^2 + \sum_k (w_k \times hobs_mean2_k)^2 + \sum_l (w_l \times hobs_mean3_l)^2 + \sum_m (w_m \times hobs_gtpejl_m)^2$$

HTS_ME er middelfejlen i forhold til de enkelte Cowi_pejl)

HTS_MaxHDiff er afvigelsen i forhold til den maksimale amplitude af de enkelte Cowi_pejl

hobs_mean1 er afvigelsen middel af pejl i beregningslag1 (ML og TS) i perioden 1990-2010 ift middel simulering 2005-2011

hobs_mean2 er afvigelsen middel af pejl i beregningslag2 (primært DS) i perioden 1990-2010 ift middel simulering 2005-2011

hobs_mean3 er afvigelsen middel af pejl i beregningslag3 (GS1 og GS2) i perioden 1990-2010 ift middel simulering 2005-2011

hobs_gtpejl er afvigelsen middel af pejlinger fra de geotekniske borer i perioden 2010-2011 ift middel simulering 2005-2011

w er vægtningen af de enkelte observationer

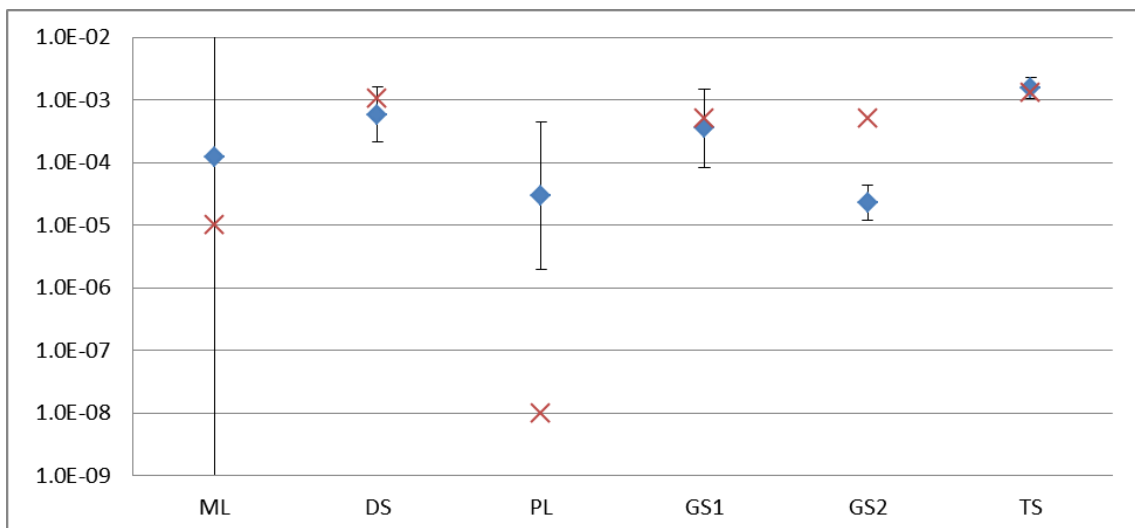
Vægtene er udregnet således at samlede vægt for de enkelte delkomponent grupper er 10 gange så høj for HTS_ME gruppen ift hobs_mean1, 5 gange så høj for HTS_maxhdiff ift hobs_mean1, mens hobs_mean1, hobs_mean2 og hobs_mean3 har samme vægt. Vægten for hobs_gtpejl er sat til nul, således at disse ikke indgår direkte i kalibreringen, men deres værdi kan bruges som ekstra tjek af modellen. Indenfor de enkelte grupper er der valgt at bruge ens vægtning.

Under antagelse af linearitet omkring optimale kalibreringsparametre kan der udregnes 95% konfidensintervaller for disse. Optimerede kalibreringsparametre og deres afledte 95% konfidensintervaller kan ses af Tabel 1. Tabellen viser at alle parametrene er estimerede med realistiske parameterverdier, hvor DS og TS er forholdsvis sikker bestemt er GS1 og GS2 lidt mere

usikre bestemt om end stadig med rimlige konfidensintervaller. ML er estimeret med stor usikkerhed, men dette skyldes formodentligt, at der er ganske få trykniveau observationer indenfor denne enhed. PL er estimeret med forholdsvis høj hydraulisk ledningsevne i forhold til initial (forventet) værdi, mens specielt GS2 har lavere hydraulisk ledningsevne end GS1. Begge dele bekræfter revisionen af den konceptuelle model, hvor det blev sandsynliggjort at GS2 og PL ville være ganske heterogent sammensat, dvs. flere indslag af sand i det prækvartære ler (PL) og flere indslag af ler i det prækvartære sand (specielt GS2).

Tabel 1 Optimerede parametre angivet i m/s. Hydrauliske ledningsevner for ml, ds, gs og ts er optimeret med fast forhold mellem horisontal og vertikal ledningsevne på 1/10.

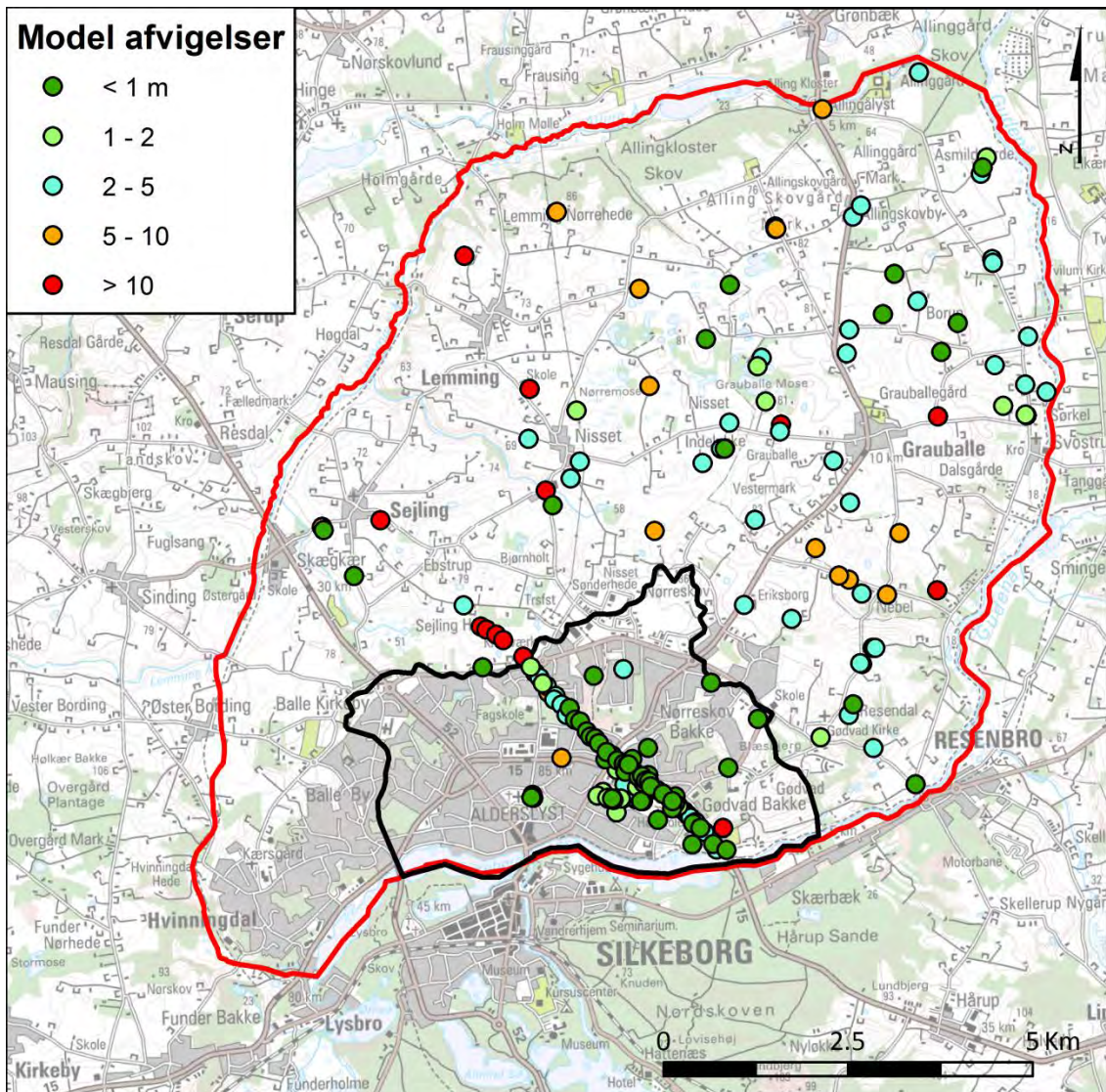
Parameter	ID	Estimeret værdi	øvre 95%	nedre 95%
Kvartært ler	ML	$1,240 \cdot 10^{-4}$	$1,24 \cdot 10^{-4}$	$1,18 \cdot 10^{-2}$
Kvartært sand	DS	$5,814 \cdot 10^{-4}$	$3,72 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-3}$
Prækvartært ler	PL	$2,995 \cdot 10^{-5}$	$2,80 \cdot 10^{-5}$	$4,21 \cdot 10^{-4}$
Øvre prækvartære sand	GS1	$3,521 \cdot 10^{-4}$	$2,69 \cdot 10^{-4}$	$1,13 \cdot 10^{-3}$
Nedre prækvartære sand	GS2	$2,274 \cdot 10^{-5}$	$1,09 \cdot 10^{-5}$	$2,08 \cdot 10^{-5}$
Terrassesand	TS	$1,570 \cdot 10^{-3}$	$5,03 \cdot 10^{-3}$	$7,39 \cdot 10^{-3}$



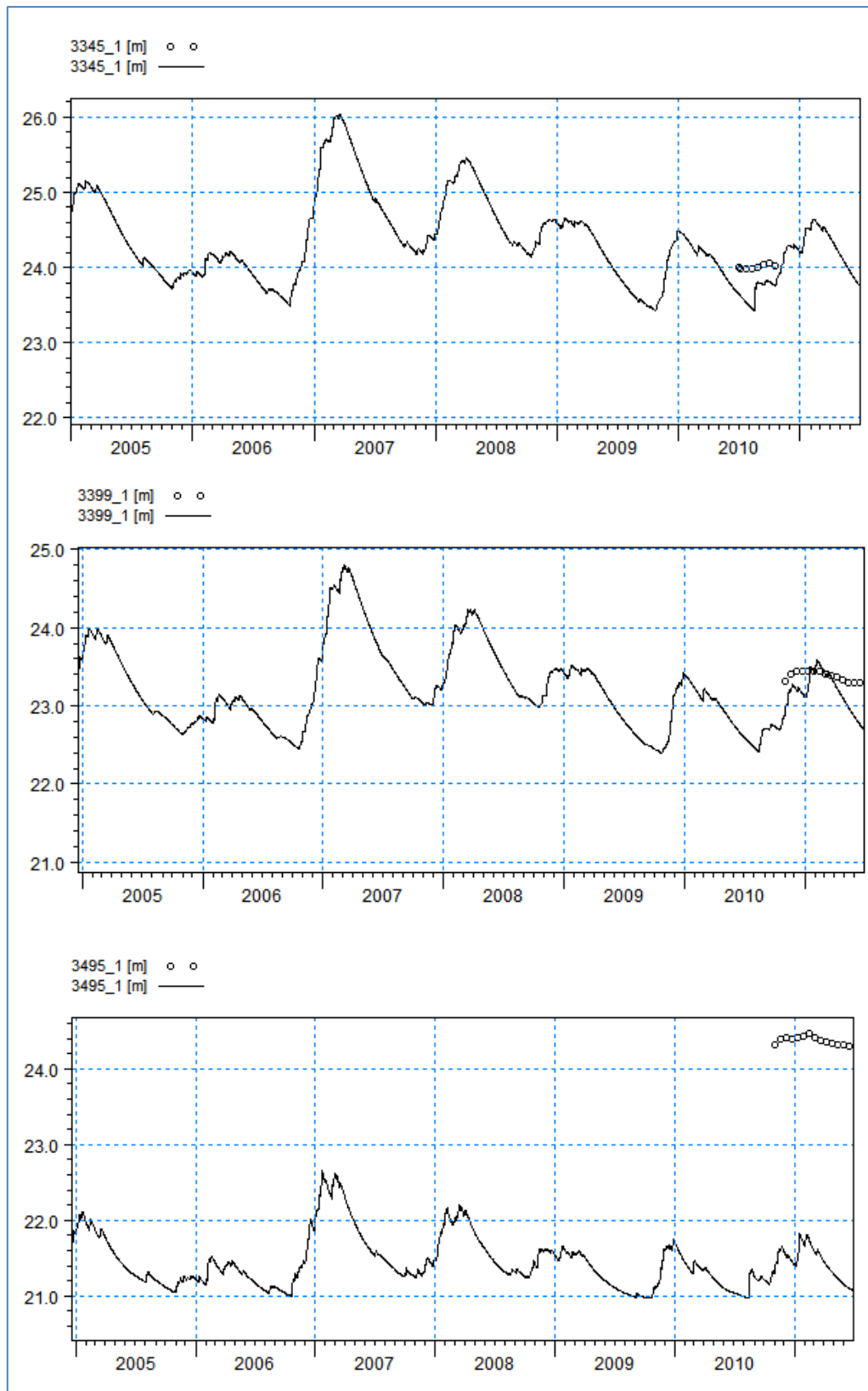
Figur 23 Optimerede horisontale hydrauliske ledningsevner (blå), 95% konfidens intervaller (lodret barre) og initale værdier (rødt kryds)

Det optimerede parametersæt giver afvigelser på trykniveauer, der varierer noget på tværs af området. Generelt ses det af Figur 24 at de mindste 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 24 Modellernes evne til at simulere målte grundvands potentialer

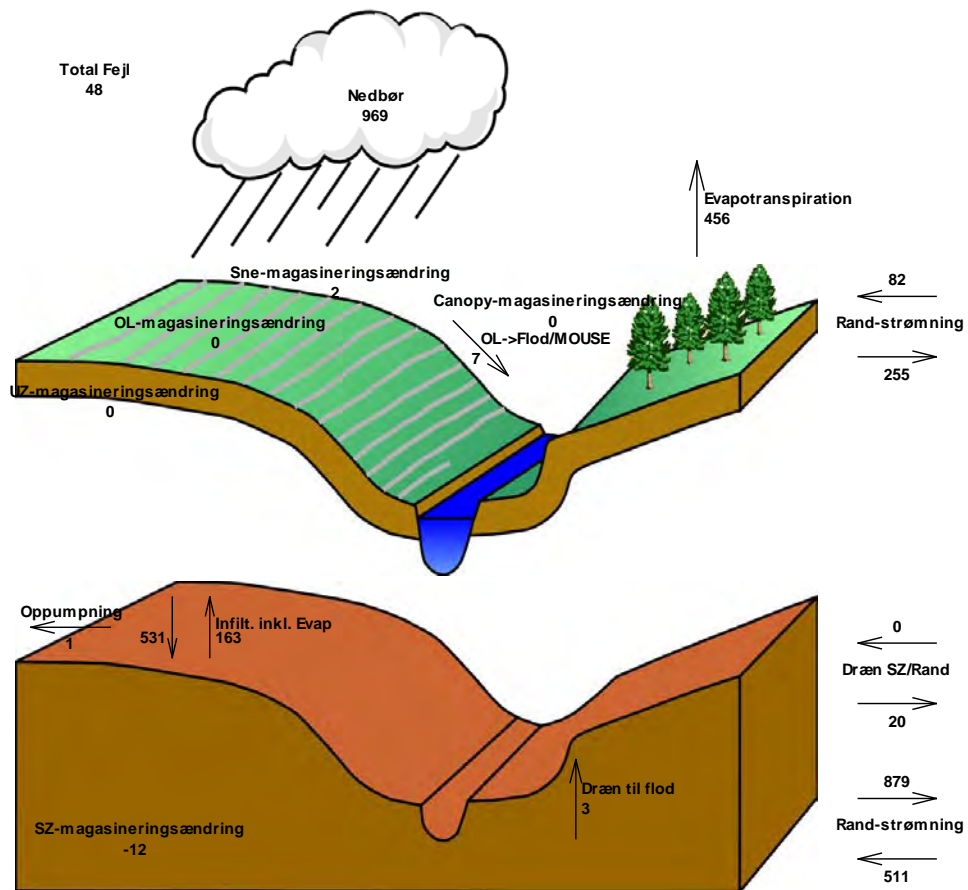


Figur 25 Modelldynamik (-) og observationsdata (..) for boring 3345, 3399 og 3495

Den dynamiske beskrivelse af systemet, som det fremgår af Figur 25, er ikke imponerende for så vidt angår; modellen udviser for stor amplitude i forhold til Cowi pejlinger. Dette har givet anledning til en lang række hypoteser for udvikling af den konceptuelle model og test af dræn/vandløbsudveksling, som dog indtil videre ikke har forbedret modellens dynamik væsentligt.

Vandbalance

Den modelberegnete vandbalance for det topografiske opland til Søholt terrassemagasin (fokusområdet, 20 m modellen) ses af Figur 26. Vandbalancen viser, at en forholdsvis lille del af tilstrømningen til området sker via vandløb. Den viser også en tilstrømning til området i samme størrelsesorden som nettonedbøren, og at næsten alt udstrømningen fra området sker via randen (udstrømning til Silkeborg Langsø).



Akkumuleret vandbalance fra 10-01-2000 12:00:00 til 12-01-2011 12:00:00. Datatype : Storage depth [millimeter].
 Flow-resultatfil : F:\DH\data\silkeborg\result\Moto20m_inv24optim.she - Result Files\Moto20m_inv24optim
 Titel : Motorvej fase2 koersel 20m model Tekst : Baseret paa opdateret geologi version 3 baseret på optimering inv24

Figur 26 Vandbalance 2000-2010 for fokusområdet

Det er ikke muligt på nærværende grundlag at vurdere, i hvilket omfang vandbalancen i Figur 27 er realistisk, idet der kun er ganske få vandføringsmålinger for området som helhed og ingen for Søholt området. Men det er sandsynligt, at viden om afstrømningen fra vandløbene vil medføre en betydelig revurdering af vandbalancen og dermed modeltilpasning. Den indledende analyse påpegede, at der med fordel kunne etableres 2-3 nye vandføringsstationer for to mindre vandløb i Søholt området, og at disse især kunne bruges til at lukke vandbalancen i modellen (Bilag 4). Disse stationer er blevet etableret i efteråret 2011 og det er forventningen, at vandføringsdata fra disse i alt fire stationer også vil kunne bruges til at støtte op omkring test af alternative geologiske modeller i forbindelse med vurderingen af kontakten til Silkeborg Langsø. Der blev gennemført en synkronmålerunde på samme fire lokaliteter ifm. et feltbesøg i efteråret 2010, som viste vandføringer på denne dag i størrelsesordenen 15-30 l/s. Målinger fra de ny etablerede vandføringsstationer viser vandføringer i vandløbene på mellem 5-15 l/s i snit over de sidste 2 to måneder af 2011, hvilket svarer nogenlunde til det modellerede, om end vandføringsdata indtil nu har været så sparsomme at de ikke har indgået direkte i modeleringen.

Data eksport til detailmodellering

Den hydrologiske model med beregningslag og optimerede hydrauliske parametre, simuleret infiltration til grundvandsspejlet for perioden 2005-2011 og simuleret gennemsnitlige tryk niveauer for perioden 2005-2011 for alle beregningslag udtrækkes af modellen og leveres videre til detailmodelleringen, som Cowi står for. Nye udtræk er foretaget, hver gang modellen har været revideret undervejs i processen, og der har været løbende dialog mellem Cowi og GEUS desangående.

Der har været gennemført test af 20 m modellen med spuns indlagt, men det er indtil videre er vurderet at test af alternative konstruktioner bedst kan varetages af Cowi i detailmodellen. Dels har Cowi ekspertisen inden dette område og dels sikres den direkte kontakt til konstruktørerne. Herudover er det vurderet at 20 m celler, som anvendt i fokusmodellen, generelt er for groft et grid til at kunne vurdere de konstruktionsmæssige konsekvenser og optimering af indvindinger osv. Testsimuleringer med spuns konstruktioner i 20 m modeller viser ikke uoverensstemmelser i forhold til detailmodellerings (Cowi) resultaterne, men at beliggenheden af det prækvartære ler kan have stor betydning for modelresultaterne.

Samlet model vurdering

Generel vurdering af fit og data tæthed

Fokus området er karakteriseret af områder med lille og områder med stor topografisk variation i umiddelbar nærhed. Pejlinger af grundvandsstand viser samme mønster med samlet set stor gradient fra toppen af oplandet ned til Silkeborg Langsø. Modellering af et sådant område må generelt forventes at give relativt store afvigelser mellem observeret og simuleret grundvandsstand. Set i denne sammenhæng er specielt området omkring transektet modelleret med små afvigelser. Afvigelse i det øvrige opland udviser en mere forventelig karakter og er generelt noget større end for fokusområdet.

Indenfor fokusområdet er der ganske stor datatæthed for så vidt angår geologisk information (primært geotekniske borer). Der er generelt lille geologisk variation af de borer, der ses indenfor fokusområdet, hvilket stammer godt overens med den geologiske model, men der er tilsyneladende problemer i den geologiske model med moseområder og i skræntzonen indenfor fokusområdet. Udenfor fokusområdet er der generelt færre data til rådighed for beskrivelsen af den geologiske model, og boreringsdata udviser større geologisk variation fra boring til boring. I den geologiske model udenfor fokusområdet er de fleste borer medtaget i analysen, men modellen indeholder ikke samme mængde af geologisk variation, som genfindes i boreringsoplysningerne.

Vurdering af vandspejls variationer i forhold til model variationer

Modellen er kalibreret mod tidsseriedata af vandstandspeglinger, men det primære datamaterialet har hidtil været sparsomt. Modellens simulering af vandstand udviser betydelig variation med en faktor 2-10 mere end vandspejlsvariationerne i peglingerne etableret under dette projekt (Bilag 3). Der har i projektet været testet forskellige hypoteser angående geologisk opbygning af skræntzonerne, prækvartær overfladens overgang mod Silkeborg Langsø, forskellige typer af dræn intensitet/dybde, befæstningsgrad og modellens kobling til vandsstandsvariationerne i Silkeborg Langsø samt vandløb, men ingen af disse hypoteser har haft en markant dæmpning af modellens dynamik. En grundigere analyse vil kræve modelkobling til Mike Urban for at få bedre beskrivelse af vandløbskoter/kloakering samt befæstelsesgrad, samt en recalibrering under anvendelse af pejledata, vandspejlsdata fra Langsøen og vandføringsmålinger fra de stationer Orbicon har etableret i området. Herudover er der fortsat rum for yderligere test af alternative geologiske modeller for skræntzonen mellem Søholt – terrassemagasin og oplandet. Det er på det forhåndenværende grundlag ikke muligt kvantitativt at vurdere effekten af denne divergens mellem observerede og simulerede vandstandsvariationer på simuleringer langs motorvejs transektet.

Sammenhæng ift geologisk model

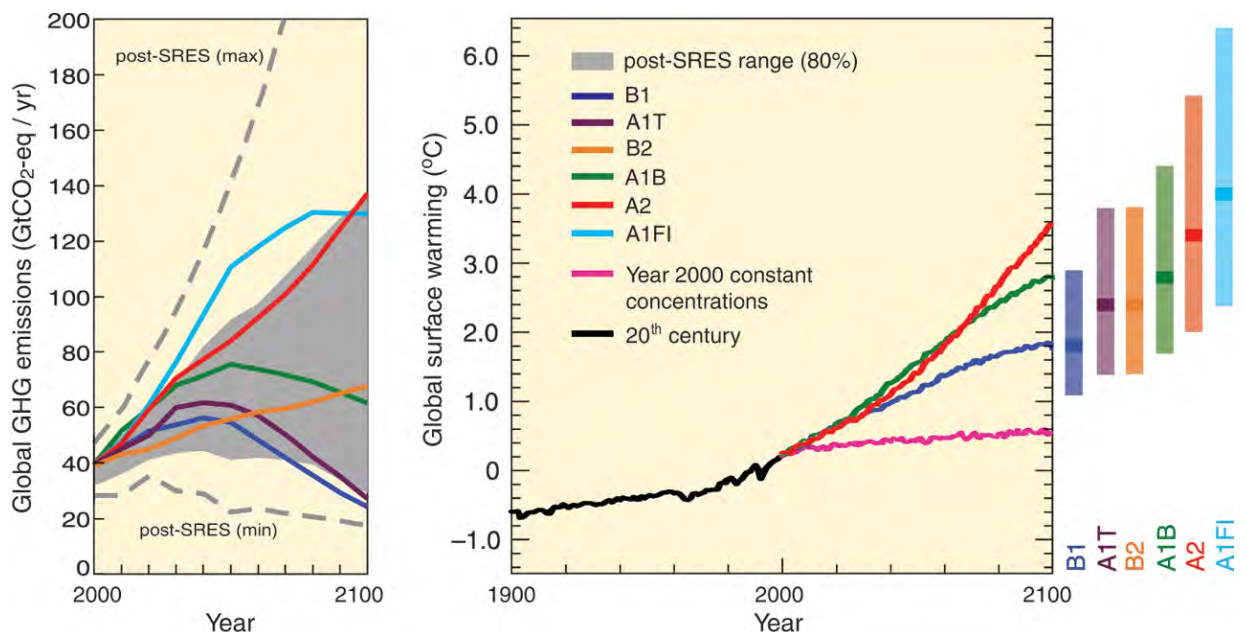
Geologien under Søholt- terrassemagasinet er indtil nu tolket som vandstandsende, men igangværende undersøgelser såvel som seneste modelkalibrering antyder at prækvartæroverfladen ved Søholt et betydelig mere heterogen end oprindeligt antaget. En mere heterogen prækvartæroverflade vil betyde mindre følsomhed overfor dybden under spuns ift opstuvning foran denne. Samtidigt er netop dybden til prækvartæroverfladen forholdsvis usikker. Usikkerheden er relateret til antallet af boringer der når helt ned til prækvartæret og netop langs transektet er der mange geotekniske boringer hvor flere af dem når prækvartæroverfladen. Usikkerheden ift. beliggenheden af prækvartæroverfladen og dennes heterogenitet er ikke undersøgt nærmere i dette projekt.

Tilsvarende er skræntzonen med overgangen fra de højere liggende kvartære aflejringer til Søholt- terrassemagasinet stadig forholdsvis usikker. Det forventes ikke at eventuelle ændringer i den geologiske model i skræntzonerne vil påvirke simuleringsresultaterne langs centrale dele af motorvejs transektet nævneværdigt for så vidt angår gennemsnits betragtninger. Men det kan tænkes føre til bedre beskrivelse af trykniveau variationer indenfor eller tæt på disse områder.

Effekter af klimaændringer

Det fremtidige klima

Mange forskellige typer data fortæller os, at Jordens klima altid har varieret. Men der er ingen tvivl om, at vores klima netop nu er i færd med at ændre sig med en hastighed, der ikke er set tidligere. Hvordan ser fremtidens klima så ud? Det kan vi ikke vide præcist endnu. Det afhænger bl.a. af de fremtidige udledninger af drivhusgasser. Figur 27 illustrerer den beregnede fremtidige udvikling af Jordens middeltemperatur for seks forskellige scenarier for udledning af drivhusgasser. Beregningerne af jordens klima foretages ved hjælp af globale klimamodeller (Global Climate Model – GCM). Forskellige GCM'ere giver forskellige klimafremskrivninger, hvilket er illustreret af søjlerne til højre på Figur 27, som viser de beregnede usikkerheder af jordens fremtidige middeltemperatur.



Figur 27 Seks scenarier (B1, A1T, B2, A1B, A2, A1FI) for udledningen af drivhusgasser (figur til venstre) og tilhørende globale temperaturstigning (figur til højre). Højden af søjlerne yderst til højre er den usikkerhed der er tilknyttet klimamodellernes beregninger for hvert enkelt udledningsscenario. Figur fra IPCC(2007).

Til beregninger af klimaændringer over Danmark benyttes først GCM, som foretager beregninger med horisontale beregningsceller på 200-300 km. Beregningsnettet, hvor Danmark repræsenteres af ganske få celler, er for grov til at sige noget meningsfuldt om andet end middeltemperaturer. Derfor benyttes der som regel regionale klimamodeller (Regional Climate Models – RCM), som benytter randbetingelser fra en GCM og laver mere detaljerede beregninger for en region, typisk med en opløsning på 12 eller 25 km. Et eksempel på en RCM er DMI's

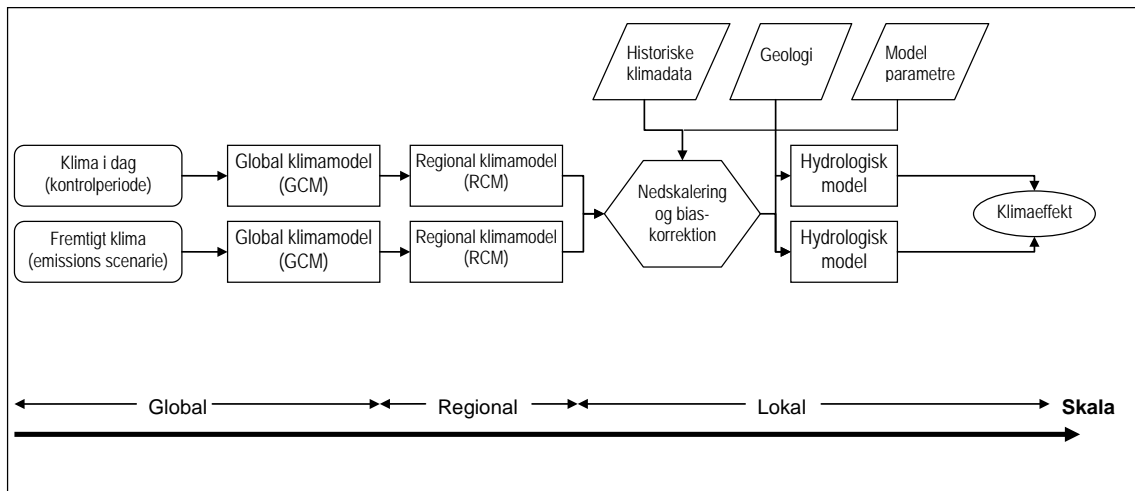
HIRHAM model, der til beregninger af det danske klima opstilles, så den dækker det meste af Europa og Nordatlanten.

De emissionsscenerier for hvilke, der er foretaget mest detaljerede klimafremskrivninger for Danmark, er A2 og B2 (Christensen et al., 2007) samt A1B (van der Linden and Mitchell, 2009; Boberg, 2010). Af Figur 27 fremgår, at forskellen mellem den globale middeltemperatur for de tre scenarier er meget lille indtil 2050, hvorefter forskellen gradvist øges frem mod år 2100. Men selv i år 2100 er usikkerheden på de enkelte scenarier væsentlig større end forskellen mellem middelværdierne af scenarierne (søjlerne til højre). Klimafremskrivninger af nedbør er væsentlig mere usikre end af temperatur og usikkerhederne øges generelt jo finere opløsning, der ønskes i tid og sted, dvs. der vil være større usikkerhed på ændringerne i max nedbørsintensitet på timebasis i Silkeborg, end der er på ændringer i årsnedbøren i Danmark.

Resultaterne af klimafremskrivningerne for Danmark i 21. århundrede viser betydelig usikkerhed. Nogle klimamodeller viser, at det fremtidige klima bliver mere tørt, mens andre viser et vådere klima. Hovedparten af modellerne viser dog visse fælles tendenser. I slutningen af det 21. århundrede kan vi således forvente en øget middeltemperatur på 2-3 °C samt en årlig øgning af nedbøren af størrelsesorden 10%. Resultaterne viser også, at nedbøren øges væsentlig i vinterhalvåret, mens den i sommermånederne vil falde lidt. Samtidig vil fordampningen stige med ca. 10% om året, så alt i alt bliver vintermånederne mere våde, mens sommermånederne bliver mere tørre.

Hvordan beregnes klimaeffekter?

Metodikken i beregninger af klimaændringers effekt på vandkredsløbet er illustreret i Figur 28. Den baserer sig på en sammenligning mellem det nuværende klima og et muligt fremtidigt klima, hvor der tages udgangspunkt i et af IPCC's (International Panel of Climate Change) scenarier for udviklingen i udledningen af drivhusgasser. Efter valg af det klimascenarie, der ønskes undersøgt, benyttes klimamodeller til at beregne såvel klimaet i dag (kontrolperioden) som det fremtidige klima svarende til det pågældende emissionsscenario.



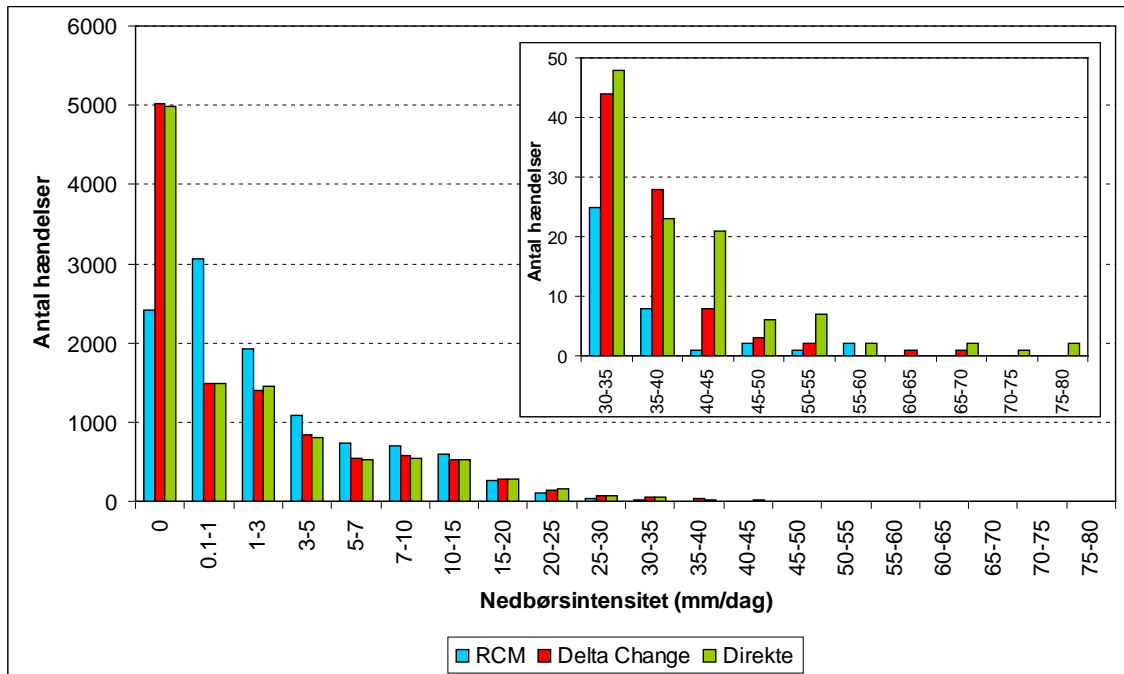
Figur 28 Elementer og skalaer i beregning af klimaændrings effekter på det hydrologiske kredsløb (Refsgaard et al., 2010)

Klimamodellens resultater for det nuværende klima (kontrolperioden) sammenlignes herefter med historiske klimadata. Her viser det sig, at klimamodellen på nogle områder ikke giver en særlig nøjagtig beskrivelse af det nuværende klima (Sonnenborg et al., 2009). Klimamodeller er som regel gode til at simulere temperatur, knap så gode til årlig nedbør, lidt dårligere til den sæsonmæssige fordeling af nedbør og endnu dårligere til ekstreme nedbørsforhold. Vi kan derfor ikke benytte de rå data fra klimamodellerne direkte som input til en hydrologisk model, men er nødt til at foretage en statistisk nedskalering, der inkluderer en bias-korrektion. Den grundlæggende antagelse, vi gør her, er at selv om de absolutte tal fra en klimamodel er fejlbehæftet, så har den trods alt en vis evne til at forudsige, hvordan klimaet ændrer sig som følge af ændrede udledninger af drivhusgasser. Der er flere principielt forskellige nedskaleringmetoder, hvoraf to af de mest anvendte er:

- *Delta Change*. Det er den simpleste og mest anvendte metode. Princippet i den er, at det fremtidige klima beskrives ved de historiske klimadata korrigeret med de ændringer, som klimamodellen fortæller, der vil ske fra det nuværende til det fremtidige klima, typisk i form af månedlige korrektionsfaktorer. Dvs. at strukturen i nedbørsmønstret (antal nedbørsdage, den relative forskel mellem små og store nedbørshændelser, mv.) bevares som de er observeret i dag, men den fremtidige nedbør bliver blot multipliceret med en faktor. Klimamodellens data benyttes altså ikke direkte – kun ændring i middelnedbøren fra kontrolperioden til den fremtidige periode i form af månedlige multiplikationsfaktorer.
- *Direkte metode*. Her tages der direkte udgangspunkt i klimamodellens simulerede nedbør, som så til gengæld korrigeres, så den statistiske fordeling i kontrolperioden svarer til observationsdata for samme periode. Den metode vi benytter benævnes Histogram Equalisation Metoden og er nærmere beskrevet i van Roosmalen et al. (2011).

Til illustration af forskellen mellem de to metoder er i Figur 29 vist nedbørsdata fra en 30 års kørsel med en klimamodel (RCM) sammenlignet med data, som er korrigeret med henholdsvis Delta Change og den Direkte metode. Figuren illustrerer behovet for bias-korrektion af de rå

data fra klimamodellen, idet klimamodellen kun har halvt så mange dage uden nedbør men dobbelt så mange dage med støvregn (0,1 – 1 mm/dag) sammenlignet med Delta Change og Direkte, som begge er korrigerede så de svarer til observationsdata på dette punkt. Det lille vindue i øvre højre hjørne af Figur 29 viser, hvorledes de to metoder giver meget forskellige forudsigelser med hensyn til ekstrem nedbør i det fremtidige klima.



Figur 29 Hyppighed af nedbør for klimascenariet A1B for perioden 2070-2100 simuleret med en klimamodel (RCM) og efterfølgende korrigeret med to forskellige metoder (Delta Change og Direkte). Den benyttede klimamodel er i dette eksempel den regionale klima model

Herefter køres en hydrologisk model, både for det nuværende klima med brug af historiske klimadata og for det fremtidige klima med brug af korrigerede klimadata, som beskrevet ovenfor. Forskellen mellem de to kørsler giver den estimerede klimaeffekt på vandkredsløbet.

Usikkerhed på klimaeffekter

Der er mange usikkerheder i kæden fra ændret klima til effekt på vandressourcer (Figur 28). Hvis vi fx vil vide, hvad usikkerheden er på en forudsigelse om grundvandsstanden ved Silkeborg motorvejen i år 2100, bør vi inddrage følgende usikkerhedskilder i overvejelserne:

- *Den naturlige klimausikkerhed.* Klimaet indeholder stor naturlig variabilitet fra år til år og fra årti til årti.
- *Emissionsscenario.* Hvad er koncentrationen af drivhusgasser i atmosfæren i år 2100. Vi kan ikke vide hvad verdenssamfundet gør med hensyn til drivhusgasudledninger i de kommende årtier. IPCC har beskrevet nogle mulige emissionsscenarioer, hvoraf de hyppigst anvendte er A2, A1B og B2.

- *Klimamodeller.* Forskellige GCM-RCM kombinationer giver forskellige klimaprojektioner. De er alle simplifikationer af virkeligheden med betydelige potentielle fejkilder. Vi kan ikke vide hvilken, der er mest nøjagtig.
- *Nedskaleringmetoder.* Forskellige nedskaleringmetoder giver forskellige resultater, og vi ved ikke hvilke, der giver de bedste korrektioner til klimamodellerne.
- *Hydrologiske modeller.* Her har vi de velkendte usikkerhedskilder i form af usikkerhed på først og fremmest den geologisk tolkning og de hydrauliske parametre.

Internationale forskningsresultater (Hawkins and Sutton, 2010) viser at den naturlige klimausikkerhed vil være dominerende på kort sigt (de første par årtier), hvorefter usikkerhederne på klimamodellerne vil være de væsentligste, mens usikkerheden på emissionen af drivhusgasser først får betydning efterhånden, som vi nærmer os år 2100.

Den naturlige klimausikkerhed kan analyseres ved statistisk at analysere variationerne i observationsdata i det nuværende klima eller ved at analysere data fra klimamodellernes projektioner af det fremtidige klima. Det kan fx ske i form af ekstremværdianalyser. Usikkerhederne på klimamodellerne kan vurderes ved at analysere afvigelse mellem outputs på flere forskellige, lige plausible, GCMere og GCM-RCM kombinationer. International forskning viser, at GCMerne er den væsentligste usikkerhedskilde her (Déqué et al., 2007). Som illustreret i Figur 29 er nedskalering/bias-korrektion nødvendig, før klimamodellernes output anvendes i hydrologiske modeller. Usikkerheden som følge af denne korrektion er begrænset for gennemsnitsforhold, såsom grundvandsstand og årlig vandføring, men den kan være meget betydelig for fx ekstreme afstrømningshændelser.

Beregningsmetodik for Silkeborg motorvejen

Den overordnede beregningsmetodik er som vist i Figur 28.

Det vil blive uhyre tids- og omkostningskrævende beregningsmæssigt at tage højde for alle usikkerhedskilder på en gang. Derfor vil der i praksis oftest kun blive foretaget direkte beregninger for de usikkerhedskilder, der vurderes at være de væsentligste i en konkret sammenhæng. I forbindelse med analysen af klimaeffekterne for motorvejsanlægget i Silkeborg foretages der beregninger af følgende forhold:

- *Den naturlige klimausikkerhed.* Der gennemføres ekstremværdianalyser.
- *Emissionsscenarioe.* Det vurderes, at usikkerheden på emissionsscenarioe er væsentlig mindre end på klimamodeller, hvorfor der kun gennemføres beregninger med scenariet A1B, som ligger mellem A2 og B2. Den væsentligste årsag til at vælge netop A1B er, at der foreligger et omfattende datasæt fra EU projektet ENSEMBLES (<http://www.ensembles-eu.org/>) med klimaprojektioner fra mange forskellige klimamodeller. GEUS benytter også A1B til nationale beregninger af den forventede klimaeffekt på grundvandsforhold i perioden 2021-2050 for Klima- og Energiministeriet.
- *Klimamodeller.* Klimaprojektioner fra 11 forskellige GCM-RCM kombinationer fra ENSEMBLES projektet er analyseret. Disse analyser er gennemført af Lauren P. Seaby,

PhD studerende, GEUS, inden for rammerne af HYACINTS (www.hyacints.dk) projektet, som er finansieret af Det Strategiske Forskningsråd.

- *Nedskaleringsmetoder.* Der gennemføres beregninger med Delta Change og en Direkte (Histogram Equalisation) metode.
- *Hydrologiske modeller.* Det er, indtil videre, ikke påtænkt at gennemføre beregninger for Silkeborg motorvejen af usikkerheder forårsaget af den geologiske tolkning og de hydrauliske parametre. GEUS har tidligere analyseret disse usikkerhedskilder (Højberg and Refsgaard, 2005; Troldborg et al., 2007). Herudover er Dorte Seifert, postdoc ALECTIA, sammen med GEUS i øjeblikket, indenfor rammerne af HYACINTS projektet, ved at analysere betydningen af geologisk usikkerhed i forbindelse med beregninger af klimaeffekter på grundvandsforhold. Resultaterne herfra vil blive benyttet til at vurdere beregningsresultaterne fra Silkeborg motorvejen.

Beregninger af klimaændringer for Silkeborg motorvejen

Grundlaget for klimaberegningerne ENSEMBLES projektet, hvorfra der er udtrukket resultater fra de 11 klimamodeller, der er vist i Tabel 2.

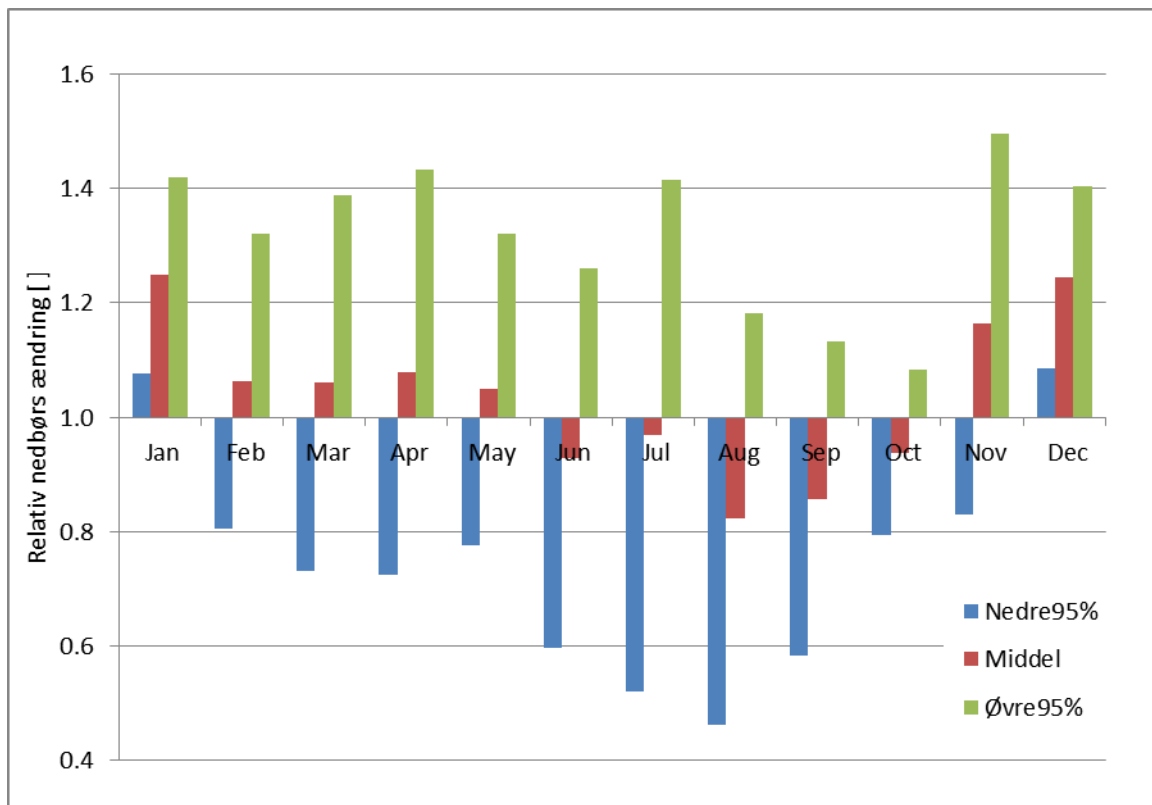
Tabel 2 Klimamodeller fra ENSEMBLES, hvorfra resultater er benyttet til beregninger af HE-scenarierne for klima-effekter ved Silkeborg motorvejen

Model navn	Global klimamodel (GCM) Modelnavn – institution	Regional Klimamodel (RCM) Modelnavn- institution
ARPEGE-CNRM	ARPEGE – Centre National de Recherche Météorologiques, Frankrig	RM5.1 - Centre National de Recherche Météorologiques, Frankrig
ARPEGE-DMI	ARPEGE – Centre National de Recherche Météorologiques, Frankrig	HIRHAM5 – Dansk Meteorologisk Institut
BCM-DMI	BCM – Bjerknes Centre for Climate Research and Nansen Center, Norge	HIRHAM5 – Dansk Meteorologisk Institut
BCM-SMHI	BCM – Bjerknes Centre for Climate Research and Nansen Center, Norge	RCA3 – Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Sverige
ECHAM-DMI	ECHAM – Max Planck Institut for Meteorology, Tyskland	HIRHAM5 – Dansk Meteorologisk Institut
ECHAM-ICTP	ECHAM – Max Planck Institut for Meteorology, Tyskland	REGCM3 - International Centre for Theoretical Physics, Italien
ECHAM-KNMI	ECHAM – Max Planck Institut for Meteorology, Tyskland	RACHMO2 - Royal Netherlands Meteorological Institute, Holland
ECHAM-MPI	ECHAM – Max Planck Institut for Meteorology, Tyskland	REMO - Max Planck Institute for Meteorology, Tyskland
ECHAM-SMHI	ECHAM – Max Planck Institut for Meteorology, Tyskland	RCA3 – Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Sverige
HADQ0-ETHZ	HADQ0 - Hadley Center for Climate Prediction and Research, Storbritanien	CLM - Swiss Federal Institute of Technology, Schweiz
HADQ0-HC	HADQ0 - Hadley Center for Climate Prediction and Research, Storbritanien	HADRM3Q0 - Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Storbritanien

For Delta Change metoden er der beregnet månedlige faktorer for nedbør, referencefordampning og temperatur for perioden 2081-2100. Faktorerne for nedbør er vist i Tabel 3. Tallene viser fx at nedbøren i januar ifølge ECHAM-DMI modellen forventes at blive forøget med en faktor 1,28 fra kontrolperioden (1991-2010) til fremtidsperioden (2081-2100). Det fremgår tydeligt af tabellen og af Figur 30, at der er betydelige forskelle på de 11 modellers klimafremskrivninger.

Tabel 3 Delta Change faktorer (relative ændringer) af nedbørsforskelle mellem perioden 1991-2010 og perioden 2081-2100

	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
ARPEGE-CNRM	1,10	1,18	0,88	0,84	0,96	0,88	0,68	0,50	0,53	0,82	0,86	1,32
ARPEGE-DMI	1,17	1,12	0,78	0,85	0,83	0,58	0,53	0,54	0,61	0,86	0,80	1,27
BCM-DMI	1,28	0,90	1,39	1,14	0,99	1,26	1,39	1,07	0,95	0,94	1,15	1,08
BCM-SMHI	1,34	0,88	1,31	1,20	0,95	1,01	1,11	0,91	1,02	0,90	1,06	1,12
ECHAM-DMI	1,28	1,03	1,06	1,27	1,29	0,98	1,28	1,22	1,07	1,08	1,32	1,20
ECHAM-ICTP	1,33	1,05	1,00	0,96	1,00	1,00	1,04	0,89	0,84	0,95	1,32	1,24
ECHAM-KNMI	1,34	1,12	1,07	0,92	1,28	0,85	1,00	0,82	0,84	0,93	1,20	1,24
ECHAM-MPI	1,33	0,89	1,12	0,97	1,12	0,81	0,89	0,81	0,71	0,95	1,33	1,26
ECHAM-SMHI	1,31	1,03	1,15	1,01	1,14	0,88	0,94	0,86	0,86	1,08	1,33	1,26
HADQ0-ETHZ	1,20	1,29	0,92	1,46	1,02	1,05	1,00	0,78	0,99	0,95	1,37	1,33
HADQ0-HC	1,06	1,22	0,98	1,24	0,97	0,92	0,80	0,64	1,02	0,86	1,08	1,36



Figur 30 Relativ ændring i nedbør for området omkring Silkeborg (DKmodel område5)

Der var gennemført foreløbige klimaberegninger for Silkeborg motorvejen, som fremgår af Bilag 5. Disse beregninger er opdateret med resultaterne nedenfor, på følgende områder:

- I bilag 5 er der kun gennemført beregninger med den ene nedskaleringsmetode, Delta Change (DC), fordi tallene for den Histogram Equalisation metoden (HE) ikke var parate til anvendelse, da beregningerne blev lavet. Det er de nu og der er gennemført beregninger med både HE metode og DC metoden, begge på baggrund af den senest opdaterede grundvandsmodel.
- Grundvandsmodellen som var anvendt til klimaberegningerne i bilag 5 er siden da, og som beskrevet i nærværende rapport, blevet opdateret og re-kalibreret mod nye data.
- De i bilag 5 gennemførte ekstremværdianalyser var meget simple på basis af fraktil-analyser. De er i det nedenstående erstattet med mere formaliserede Gumbel ekstremværdi analyser

Ekstremværdi analyse metodik

Der er gennemført en ekstremværdi analyse af vandstandsændringer. I ekstremværdi analysen for HE scenarier er der udtrukket årlige maksværdier for trykniveau for zone 33200 til 35000 langs motorvejstransekten for de enkelte HE-klimamodeller dels for kontrol perioden 1991-2010 og dels for fremtidsperioden 2081-2100. Ændringer er dannet ved at sortere disse årlige maksimal værdier (alle 2x11 klimamodeller) fra maks til min og derefter udregne ændringen

(f.eks. HE_Echam-dmi_2081-2100 - HE_Echam-dmi_1991-2010). Ændringsresultatet er herefter sorteret igen fra maks til min og danner derved grundlaget for ekstremværdi analysen af HE-modelkørsler. Tilsvarende er der udtrukket årlige maksværdier for trykniveau for zone 33200 til 35000 langs motorvejstransekten for de enkelte DC-modelkørsel, men her kun for fremtidsperioden 2081-2100 og for en simulering af den nuværende situation med observerede klimadata (1991-2010). Ændringer er dannet ved at sortere disse årlige maksimal værdier (11 DC-modeller for fremtiden og en nutids modelkørsel) fra maks til min og derefter udregne ændringen (f.eks. DC_Echam-dmi_2081-2100 - Nu_1991-2010). Ændringsresultatet er herefter sorteret igen fra maks til min og danner derved grundlaget for ekstremværdi analysen af DC-modeller.

I ekstremværdi analysen er de sorterede årlige ændringer i grundvandsstand fået en Weibull plotte position:

$$p_m = \frac{m}{n+1} \quad \text{og} \quad T_m = \frac{(n+1)}{m}$$

, hvor P_m angiver plotte positionen, T_m angiver gentagelses perioden, m angiver sorterings positionen og n angiver antallet af data i plottet.

Plottes data på denne måde ses en ret linie i et $-\log(-\log)$ plot som kan beskrives ved en Gumbel distribution med følgende udtryk:

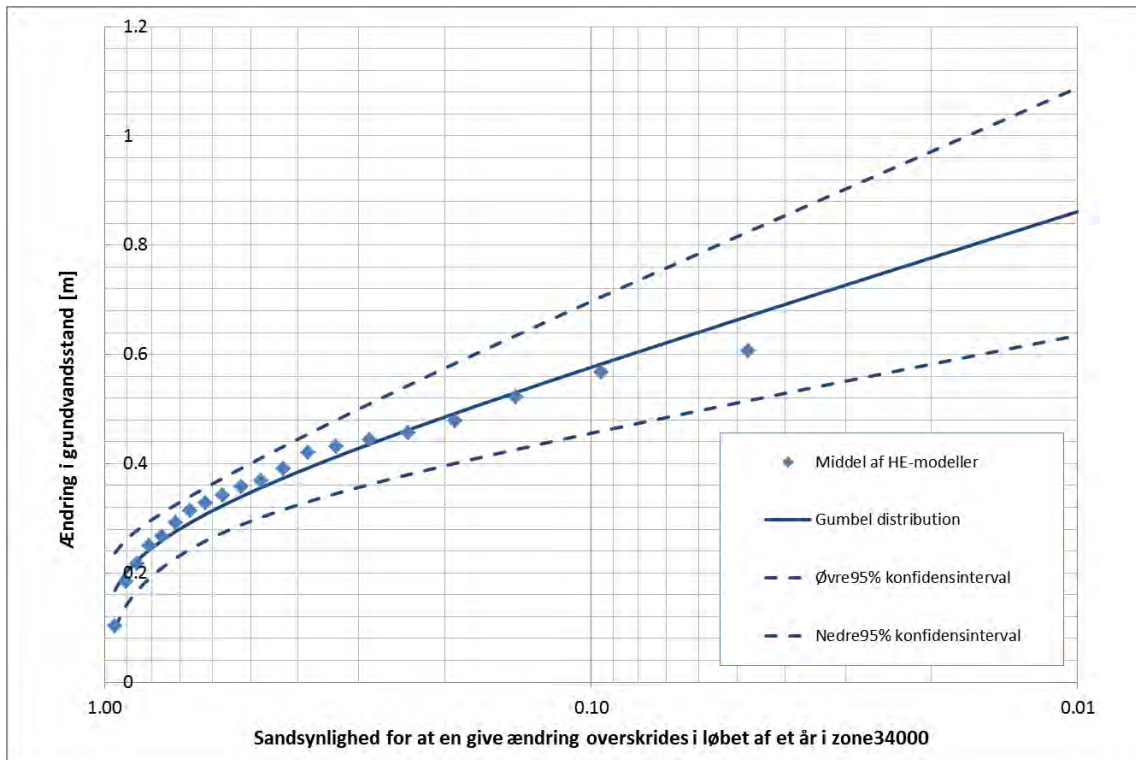
$$F_X(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad -\infty < x < \infty$$

Det tilhørende 95% konfidens interval kan udregnes via følgende formel:

$$x_T = \bar{x} + K_T s_x \quad \text{eller} \quad K_T = \frac{y_T}{1,28} - 0,45$$

$$s_T = \frac{s_x}{\sqrt{n}} * [1 + 1,14 * K_T + 1,1 * K_T^2]^{1/2}$$

Vi har udregnet Gumbel ekstrapolering til 100 års hændelser for middel ændringerne for HE og DC modellerne og for øvre 95% konfidens interval for HE og DC modellerne, eksemplificeret ved middel af HE-modeller og Gumbel fit på Figur 31 for zone 34000. Fremskrivninger for middel af HE og DC modeller er opsummeret for de enkelte zoner i Tabel 4 og Tabel 5 og for fremskrivninger af øvre 95% konfidensinterval for HE og DC scenarier i Tabel 6 og Tabel 7. I tabellerne er centrale estimater for udvalgte hændelser (10, 20, 50 og 100 års) samt øvre 95% konfidens interval for denne fremskrivning.



Figur 31 Zone 340000 Plot af middel af ændringer i årlige ekstremværdier for grundvandsstand beregnet med HE modeller. Plottet viser fit til Gumbel fordeling (centralt estimat). Øvre 95% og nedre 95% konfidens interval henviser udelukkende til ekstrapoleringen ift Gumbel distribution fit til middel af klimamodel ændringer

Af Figur 31 ses en stigende usikkerhed (større spænd mellem det centrale fit og øvre og nedre 95% konfidensinterval), jo mindre sandsynlighed. Samtidigt ses de faktiske data punkter til rådighed for denne analyse (20 punkter, dvs 20 års simuleringer af ændringer). Usikkerheden på fittet er dels bestemt af antallet af datapunkter (jo flere år til rådighed des mindre usikkerhed) og dels bestemt af hvor godt disse data fitter den teoretiske fremskrivning (i dette tilfælde en Gumbel distribution). Ved at tage den reciprokke værdi af sandsynligheden på x-aksen kan perioden for hvor ofte en given hændelse optræder udregnes. 100 års perioden (eller 1 procent sandsynligheden) har et spænd fra det centrale bud til øvre95% konfidensinterval svarende til en fjerdedel af den ændring det centrale bud angiver. Tilsvarende mønster ses for for den øvrige zoner for så vidt angår HE-modellerne, mens DC-modellerne generelt har lidt større relativt spænd (øvre95% / centralt estimat).

Tabel 4 Centrale og øvre 95% konfidensinterval Gumbel ekstrapoleringer for middel af HE scenarier for grundvandsstands ændringer

Recurrence interval Zone	Central estimate				UPPER 95 estimate			
	10.5	21	50	100	10.5	21	50	100
33000	0.43	0.49	0.57	0.63	0.51	0.60	0.71	0.79
33100	0.64	0.73	0.85	0.94	0.77	0.90	1.05	1.18
33200	0.64	0.74	0.85	0.95	0.78	0.91	1.07	1.19
33300	0.65	0.74	0.86	0.95	0.78	0.91	1.07	1.20
33400	0.65	0.75	0.87	0.96	0.79	0.92	1.08	1.21
33500	0.65	0.75	0.87	0.97	0.79	0.92	1.09	1.22
33600	0.65	0.75	0.87	0.96	0.79	0.92	1.09	1.22
33700	0.64	0.74	0.86	0.95	0.78	0.91	1.07	1.20
33800	0.63	0.72	0.84	0.93	0.76	0.89	1.05	1.17
33900	0.61	0.70	0.81	0.90	0.73	0.86	1.01	1.13
34000	0.58	0.67	0.78	0.86	0.71	0.82	0.97	1.09
34100	0.56	0.64	0.74	0.83	0.68	0.79	0.93	1.04
34200	0.53	0.61	0.71	0.79	0.65	0.76	0.89	1.00
34300	0.52	0.60	0.69	0.77	0.63	0.73	0.86	0.97
34400	0.50	0.58	0.67	0.74	0.61	0.71	0.84	0.94
34500	0.48	0.55	0.64	0.71	0.58	0.68	0.80	0.90
34600	0.46	0.53	0.61	0.68	0.55	0.65	0.76	0.85
34700	0.42	0.48	0.55	0.61	0.51	0.59	0.69	0.77
34800	0.39	0.44	0.51	0.57	0.47	0.55	0.64	0.72
34900	0.34	0.39	0.45	0.50	0.41	0.48	0.57	0.64
35000	0.29	0.33	0.39	0.43	0.35	0.41	0.49	0.55

Tabel 5 Centrale og øvre 95% konfidensinterval Gumbel ekstrapoleringer for middel af DC scenarier for grundvandsstands ændringer

Recurrence interval Zone	Central estimate				UPPER 95 estimate			
	10.5	21	50	100	10.5	21	50	100
33000	0.22	0.26	0.31	0.35	0.27	0.33	0.40	0.45
33100	0.30	0.35	0.41	0.46	0.37	0.44	0.52	0.59
33200	0.29	0.33	0.39	0.44	0.35	0.42	0.50	0.56
33300	0.29	0.33	0.39	0.44	0.35	0.42	0.50	0.57
33400	0.29	0.34	0.40	0.45	0.36	0.43	0.51	0.58
33500	0.29	0.34	0.40	0.45	0.36	0.43	0.52	0.58
33600	0.29	0.34	0.40	0.45	0.36	0.43	0.52	0.59
33700	0.29	0.34	0.40	0.45	0.36	0.43	0.51	0.58
33800	0.28	0.33	0.39	0.44	0.35	0.42	0.51	0.57
33900	0.28	0.33	0.39	0.44	0.35	0.42	0.50	0.56
34000	0.27	0.32	0.38	0.43	0.34	0.41	0.49	0.55
34100	0.27	0.32	0.37	0.42	0.33	0.40	0.48	0.54
34200	0.26	0.31	0.37	0.41	0.33	0.39	0.47	0.54
34300	0.26	0.30	0.36	0.41	0.32	0.39	0.47	0.53
34400	0.25	0.30	0.36	0.41	0.32	0.39	0.46	0.53
34500	0.25	0.29	0.35	0.39	0.31	0.37	0.45	0.51
34600	0.24	0.29	0.34	0.38	0.30	0.36	0.44	0.50
34700	0.24	0.28	0.34	0.38	0.30	0.36	0.44	0.50
34800	0.23	0.27	0.33	0.37	0.29	0.35	0.42	0.48
34900	0.20	0.24	0.29	0.33	0.26	0.31	0.38	0.44
35000	0.18	0.22	0.26	0.29	0.23	0.28	0.33	0.38

Tabel 6 Centrale og øvre 95% konfidensinterval Gumbel ekstrapoleringer af øvre 95% af HE scenarier grundvandsstands ændringer

Recurrence interval Zone	Central estimate				UPPER 95 estimate			
	10.5	21	50	100	10.5	21	50	100
33000	0.68	0.75	0.84	0.91	0.78	0.88	1.00	1.10
33100	1.03	1.12	1.25	1.34	1.16	1.30	1.47	1.60
33200	1.03	1.12	1.25	1.34	1.17	1.30	1.47	1.60
33300	1.03	1.12	1.25	1.34	1.16	1.30	1.47	1.60
33400	1.03	1.13	1.25	1.34	1.17	1.30	1.47	1.60
33500	1.03	1.13	1.25	1.34	1.17	1.30	1.47	1.60
33600	1.02	1.12	1.24	1.34	1.16	1.30	1.46	1.59
33700	1.01	1.11	1.22	1.32	1.14	1.28	1.44	1.57
33800	0.98	1.08	1.19	1.28	1.11	1.24	1.40	1.52
33900	0.95	1.04	1.15	1.23	1.07	1.20	1.35	1.47
34000	0.91	0.99	1.10	1.18	1.03	1.15	1.29	1.41
34100	0.87	0.95	1.05	1.13	0.98	1.09	1.23	1.34
34200	0.83	0.91	1.00	1.08	0.94	1.05	1.18	1.28
34300	0.80	0.87	0.97	1.04	0.91	1.01	1.14	1.24
34400	0.77	0.85	0.94	1.01	0.88	0.98	1.10	1.20
34500	0.74	0.81	0.90	0.97	0.84	0.94	1.06	1.15
34600	0.70	0.77	0.85	0.92	0.80	0.89	1.01	1.10
34700	0.65	0.71	0.79	0.85	0.74	0.83	0.94	1.02
34800	0.59	0.65	0.72	0.78	0.67	0.75	0.86	0.94
34900	0.50	0.56	0.62	0.67	0.58	0.65	0.74	0.81
35000	0.43	0.47	0.53	0.58	0.49	0.56	0.64	0.70

Tabel 7 Centrale og øvre 95% konfidensinterval Gumbel ekstrapoleringer af øvre 95% af DC scenarier grundvandsstands ændringer

Recurrence interval Zone	Central estimate				UPPER 95 estimate			
	10.5	21	50	100	10.5	21	50	100
33000	0.38	0.42	0.47	0.51	0.44	0.50	0.56	0.62
33100	0.58	0.64	0.70	0.76	0.66	0.73	0.82	0.90
33200	0.58	0.63	0.69	0.74	0.65	0.72	0.81	0.88
33300	0.58	0.63	0.70	0.75	0.65	0.73	0.82	0.89
33400	0.58	0.64	0.70	0.76	0.66	0.73	0.83	0.90
33500	0.58	0.64	0.71	0.76	0.66	0.74	0.83	0.90
33600	0.58	0.64	0.70	0.76	0.66	0.73	0.83	0.90
33700	0.58	0.63	0.70	0.75	0.65	0.73	0.82	0.89
33800	0.56	0.62	0.68	0.73	0.64	0.71	0.80	0.87
33900	0.55	0.60	0.67	0.72	0.62	0.69	0.78	0.85
34000	0.53	0.58	0.65	0.70	0.60	0.67	0.76	0.83
34100	0.52	0.57	0.63	0.68	0.59	0.66	0.74	0.81
34200	0.50	0.55	0.61	0.66	0.57	0.64	0.72	0.79
34300	0.49	0.54	0.60	0.65	0.56	0.63	0.71	0.78
34400	0.48	0.53	0.59	0.64	0.55	0.62	0.71	0.78
34500	0.46	0.51	0.57	0.61	0.53	0.59	0.67	0.74
34600	0.44	0.49	0.55	0.59	0.51	0.57	0.65	0.72
34700	0.42	0.47	0.53	0.58	0.49	0.56	0.65	0.72
34800	0.39	0.44	0.49	0.54	0.45	0.52	0.59	0.65
34900	0.34	0.38	0.44	0.48	0.40	0.46	0.53	0.59
35000	0.29	0.33	0.37	0.41	0.34	0.39	0.45	0.50

Af Figur 31 og Tabel 4 til Tabel 7 fremgår det eksempelvis for Zone 340000 for HE nedskaleringsmetoden, at en 100 års hændelse for et middelniveau af klimamodeller vil have et centralt estimat på en stigning på 0,86 m, mens den øvre 95% konfidensgrænse for dette skøn vil være 1,09 m. Hvis der i stedet for et middelniveau af klimamodeller vælges et øvre 95% konfidensinterval, vil de to tal være 32 cm højere. Tilsvarende for DC nedskaleringsmetoden vil en 100 års hændelse med et middel klimamodelniveau have et centralt estimat på 0,43 cm med

en øvre 95% konfidensgrænse på 0,55 cm, mens de to tal vil være 27-28 cm større for et øvre 95% klimamodel konfidensgrænse.

Vurdering af klimaeffektberegninger

Beregningerne af klimaeffekter er baseret på metoder, der internationalt set repræsenterer state-of-the-art. Eftersom usikkerheden fra klimamodellerne er væsentligt større end usikkerhederne forårsaget af valg af scenarium for drivhusgasudledninger, er valget af ét mellemstærkt scenarium (A1B) sammen med anvendelsen af resultater fra mange klimamodeller og fra to forskellige nedskaleringsmetoder en fornuftig operationel måde at fokusere på de væsentligste usikkerhedskilder. A1B er formentlig det mest anvendte scenarium ved europæiske studier af klimaeffekter på vandområdet i dag. Klimamodellerne udvikles til stadighed, og der vil om nogle få år foreligge nye beregninger med nye forbedrede klimamodeller. Men de bedste foreliggende klimamodelresultater fra Europa i dag er dem der med en række GCM/RCM kombinationer er produceret for A1B scenariet i ENSEMBLES projektet.

Histogram Equalisation nedskaleringsmetoden (HE) resulterer i stigninger i ændringer i maksimal grundvandstand, som er 10-30cm højere for en 10-års hændelse og 15-40 cm højere for en 100 års hændelse, sammenlignet med Delta Change nedskaleringsmetoden (DC). Det er forventelig, eftersom DC blot udnytter information fra klimamodellerne om ændringer i middelnedbør, mens HE yderligere er i stand til at benytte information fra klimamodellerne om ændringer i ekstremnedbør. De højere HE værdier afspejler således blot, at klimamodellerne forudsiger, at ekstremnedbøren i perioden 2081-2100 sammenlignet med 1991-2010 stiger mere end ændringen i middelnedbøren.

Der kan argumenteres for, at HE metoden er mere nøjagtigt end DC metoden, og at HE tallene derfor skal benyttes. Omvendt har HE den svaghed, at den ikke giver fuldstændig de samme resultater for grundvandsstand i kontrolperioden 1991-2010, hvor dens klimadata netop fittes til at reproducere den statistiske fordeling for det observerede klima. Forskellen på grundvandsstand for kontrolperioden simuleret med henholdsvis klimamodeller plus HE og med observerede klimadata er af størrelsesorden 5 cm. Yderligere er der ganske få internationale erfaringer med brug af den avancerede HE metode, hvilket bør give anledning til forsigtighed med udelukkende at benytte HE metoden. Derfor har vi vist resultater fra begge metoderne.

Usikkerhederne på ændringer i maksimal grundvandsstand som følge af usikkerhed på klimamodeller og nedskaleringsmetoder er væsentlig større end usikkerheden, på at ekstrapolere fra en 20-års serie til en 100 års hændelse. Det indebærer at den valgte analysemetodik er fornuftig. Hvis usikkerhederne fra Gumbel ekstrapolationerne i stedet havde været større end usikkerhederne fra klimamodellerne og nedskaleringsmetoderne, ville det have været nødvendigt at overveje at lave ekstremværdianalyser på længere serier, fx 50 år, hvilket ville kræve

ve, at dataene skulle de-trendes, fordi forudsætningen om klima-stationaritet i analyseperioden er meget mere problematisk for en 50 års serie end for en 20 års serie.

Usikkerhederne på klimafremskrivningerne og usikkerhederne på Gumbel ekstrapolationerne kan forventes at være indbyrdes uafhængige. Det indebærer, at såfremt der vælges at benytte kombinationen af (i) 95% øvre fraktil for klimamodellerne; (ii) HE nedskalering; og (iii) 95% øvre fraktil i Gumbel usikkerhedsinterval, opnås en samlet fraktil af usikkerhedsinterval på højere end 99%.

Den naturlige trykniveauvariation er i modelresultaterne ganske udtalte, men ikke udpræget i overensstemmelse med målte data. Yderligere analyse af de indsamlede pejledata og model kobling til MikeUrban kan meget vel medføre ændringer for modelresultaterne. Dette er specielt interessant i forhold til beregningerne af de årlige maksimalværdier og tilsvarende konfidensintervaller. Det må forventes at den nuværende model, som markant overdriver trykniveaufluktuationerne, også vil overestimere ændringer i maksimal grundvandsstand, således at tallene i Tabel 4 til Tabel 7 må forventes at være for store. Med det nuværende vidensgrundlag er det ikke muligt at sige hvor stor den forventede overestimation er.

Det skal bemærkes at både fraktilværdierne og ekstremværdi analysen er baseret på model beregnede grundvandsstande på perioder af 5 dages varighed, samt at følsomheden overfor valg af periodelængden, f.eks. 1, 5 og 10 dages perioder, ikke er undersøgt.

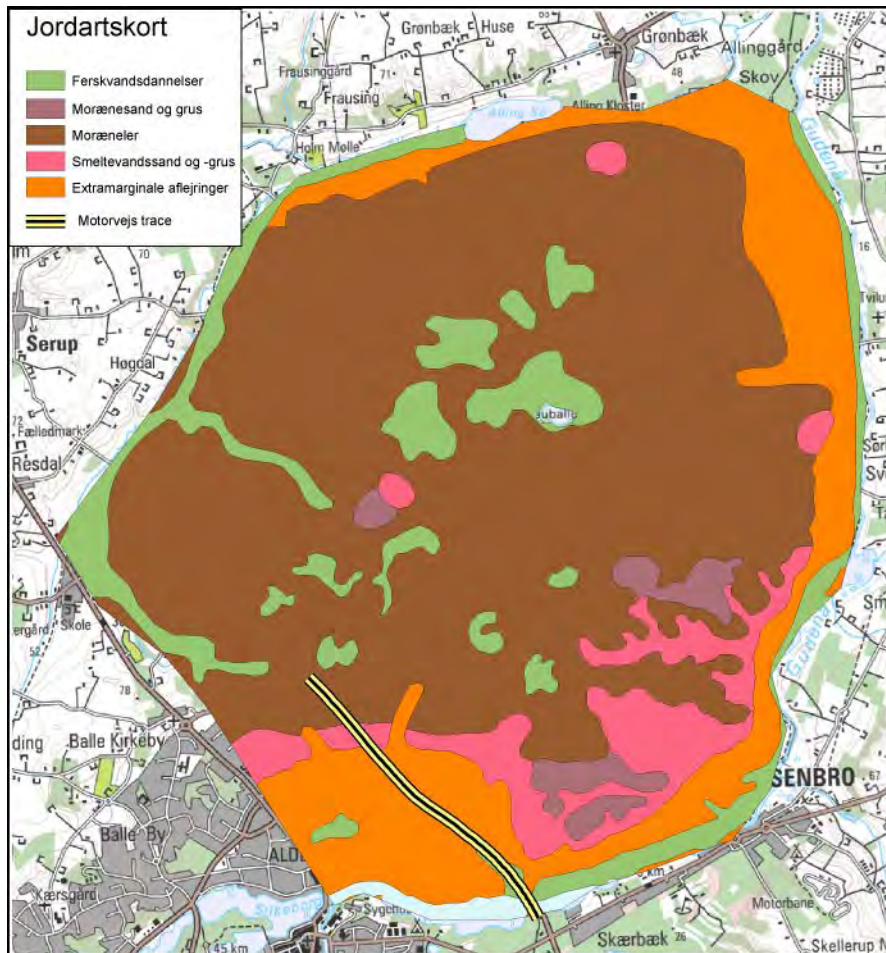
Referencer

- Binzer K, Stockmarr J (1994) Prækvartæroverfladens højdeforhold. Danmarks Geologiske Undersøgelse
- Boberg F (2010) Weighted scenario temperature and precipitation changes for Denmark using probability density functions for ENSEMBLES regional climate models. Danish Climate Centre Report, <http://www.dmi.dk/dmi/dkc10-03.pdf>
- Christensen JH, Carter TR, Rummukainen M, Amanatidis G (2007) Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project, *Climatic Change*, 81 Supl. 1, 1-6, doi:10.1007/s10584-006-9211-6
- Déqué M, Rowel DP, Lüthi D, Giorgi F, Christensen JH, Rockel B, Jacob D, Kjellström E, de Castro M, van den Hurk B (2007) An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Climate Change*, 81, 53-70.
- Hawkins E, Sutton R (2010) The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change, *Clim. Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-010-0810-6.
- Højberg AL, Nyegaard P, Stisen S, Troldborg L, Ondracek M, Christensen BSB (2010) DK-model2009 – Modelopstilling og kalibrering af Midtjylland, GEUS rapport 2010/78. GEUS.
- Højberg AL, Refsgaard JC (2005) Model Uncertainty - Parameter uncertainty versus conceptual models. *Water Science and Technology*, 52(6), 177-186.
- IPCC (2007) Rapporter fra FN's Internationale Klimapanel.
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html
- Jørgensen F, Sandersen P (2009) Kortlægning af begravede dale i Danmark – opdatering 2007-2009. GEUS særudgivelse ISBN: 978-87-7871-259-2 www.begravede-dale.dk
- Refsgaard JC, Sonnenborg TO, Henriksen HJ (2009) Klimaændringer I Danmark. Hydrologiske effekter og usikkerheder. *Vand & Jord*, 16(4), 124-127.
- Sonnenborg TO, Jensen KH, Sjøgaard H, Friberg T, Engesgaard P, Kidmose J (2009) Fremtidens vandressourcer i Danmark. *Geviden*, 2, 2009, 2-15. Geocenter Danmark.
- Troldborg L, Refsgaard JC, Jensen KH, Engesgaard P (2007) The importance of alternative conceptual models for simulation of concentrations in multi-aquifer system. *Hydrogeology Journal*, 15, 843-860.
- van der Linden P, Mitchell JFB (eds) (2009) ENSEMBLES: climate change and its impacts. Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter.

van Roosmalen L, Sonnenborg TO, Jensen KH, Christensen JH (2011) Comparison of hydrological simulations of climate change using perturbation of observations and distribution based scaling, *Vadose Zone Journal*, 10, 136-150

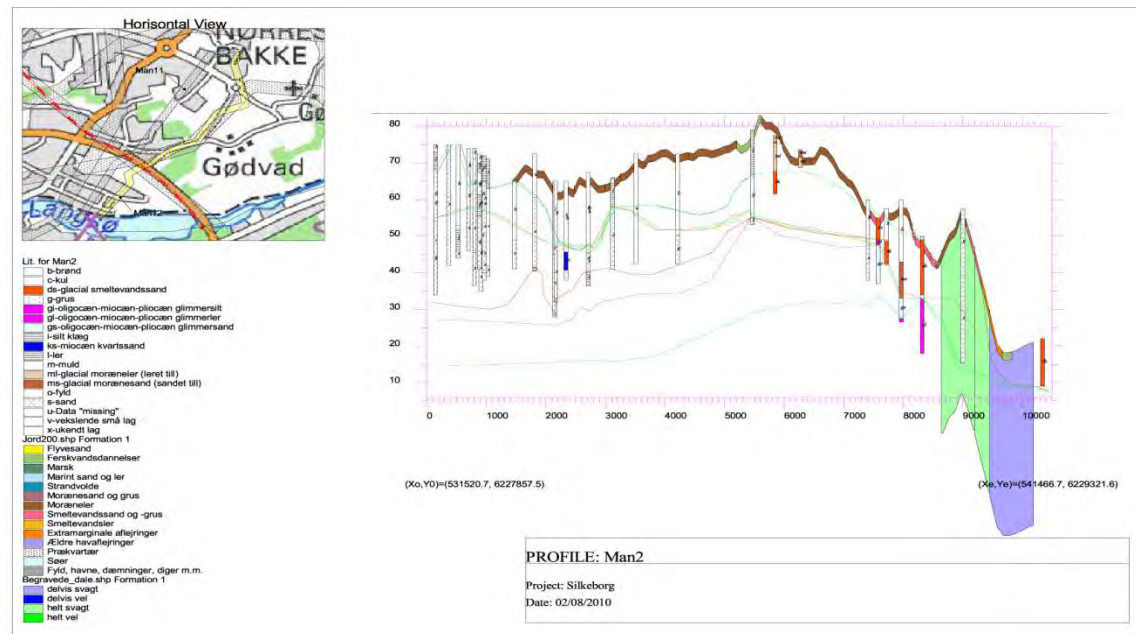
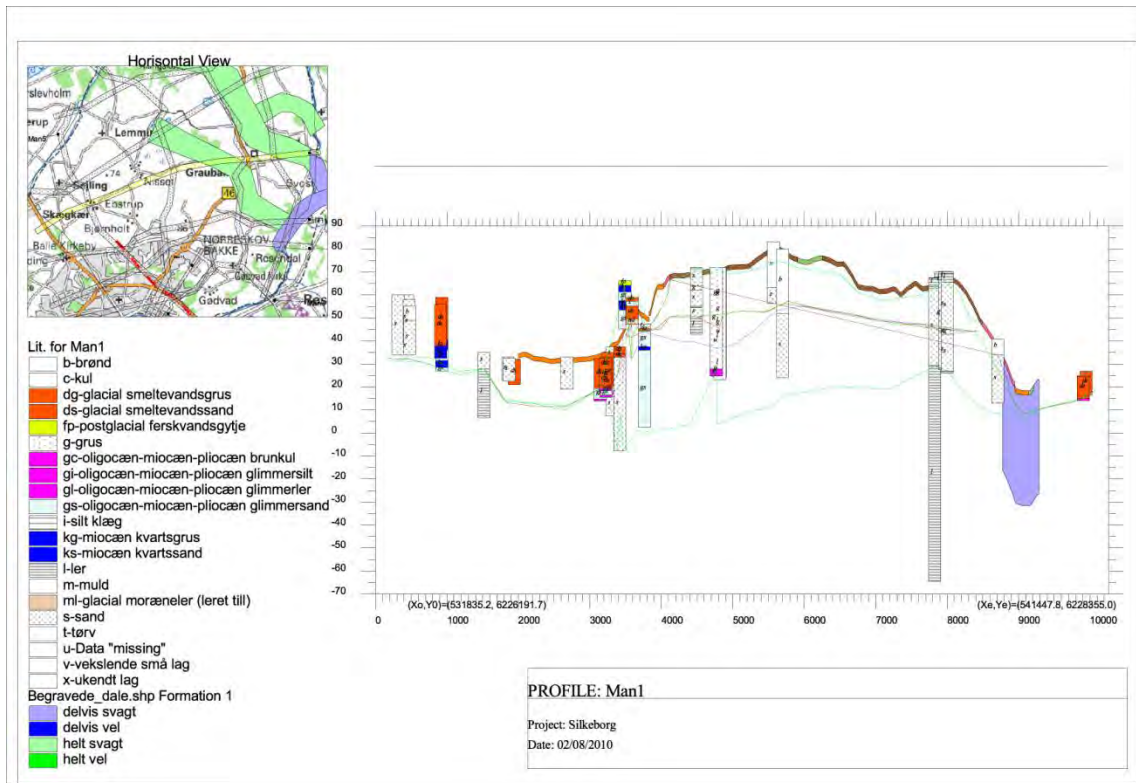
Bilag 1: Oprindelige profiler brugt til etablering af den geologiske model

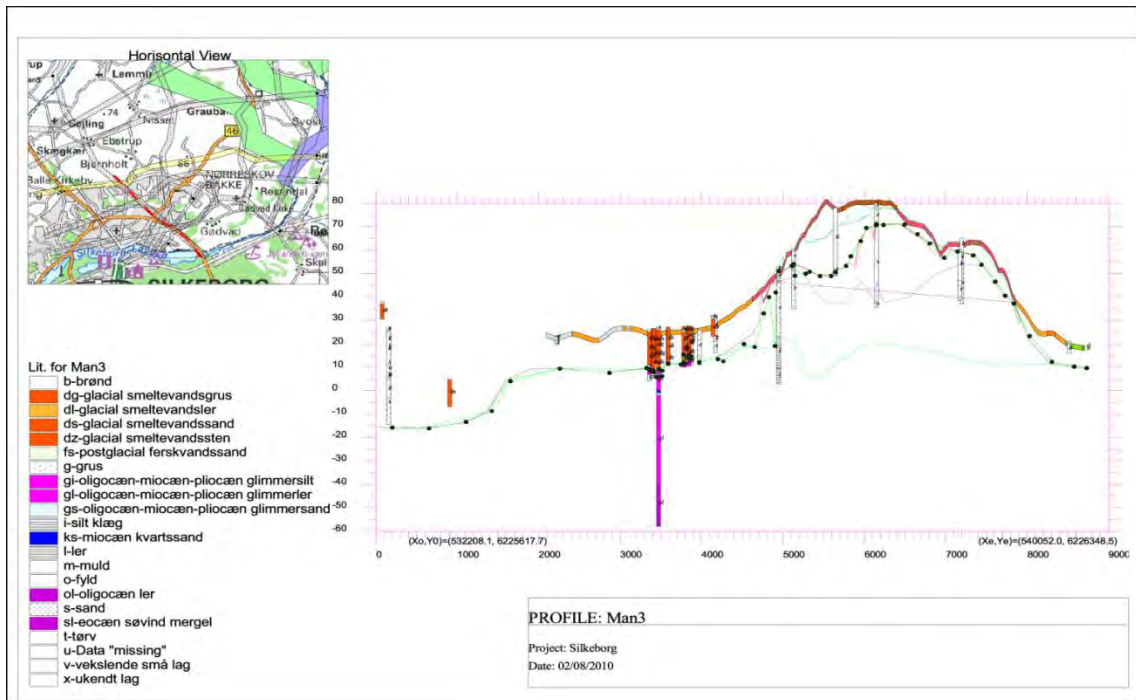
Per Nyegaard, GEUS August 2010

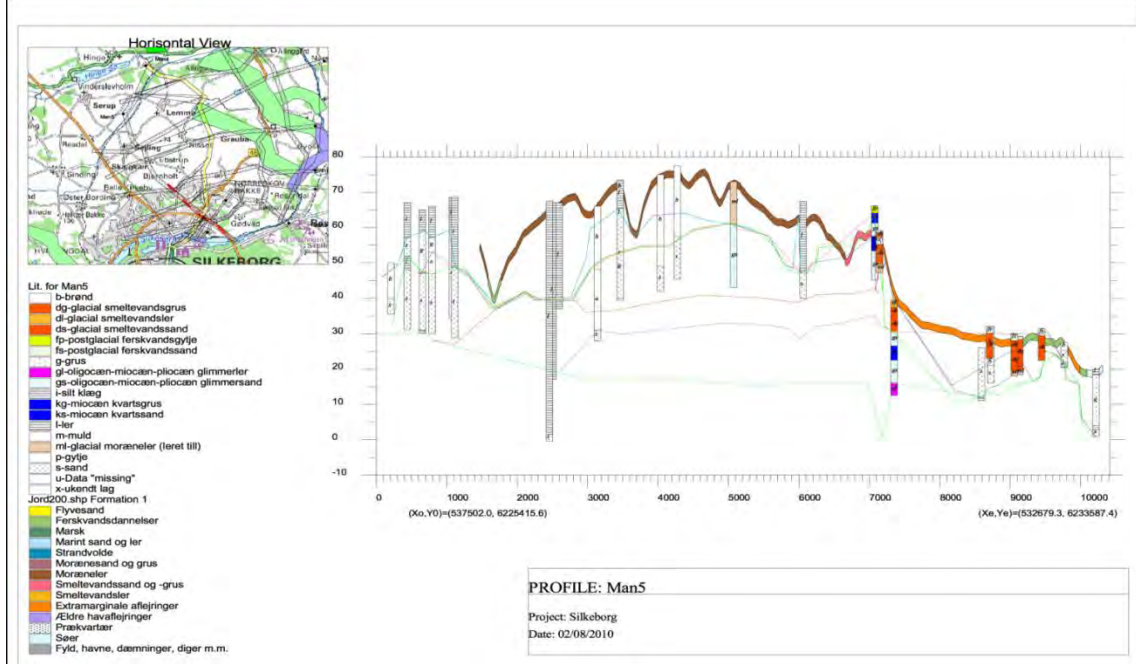
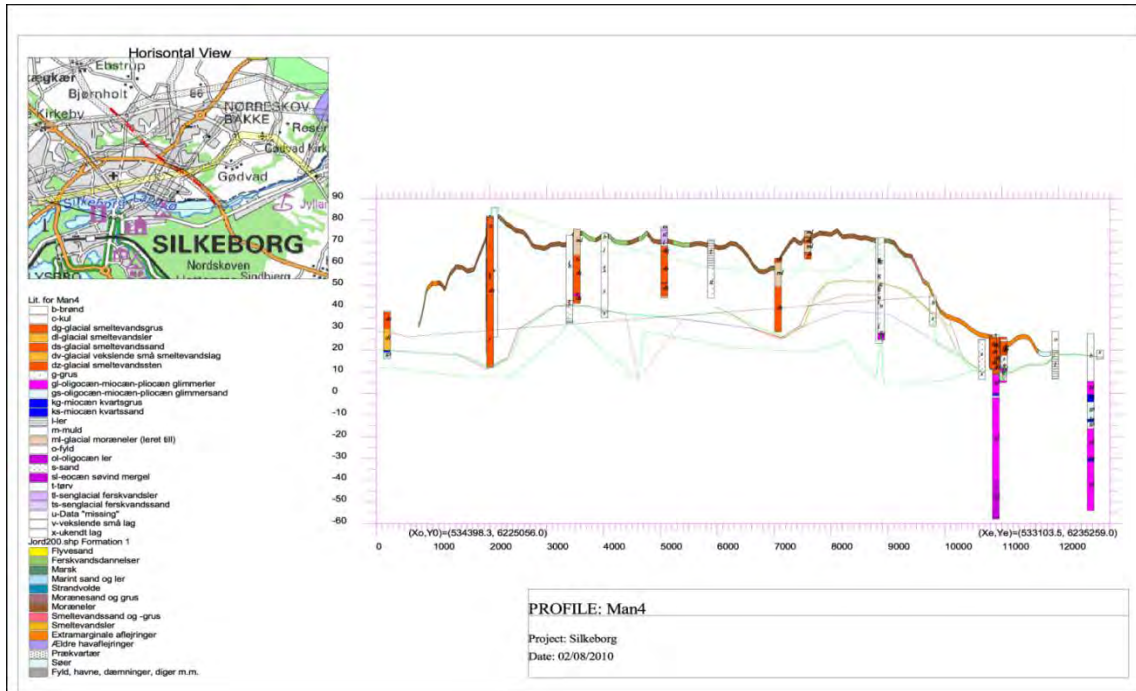


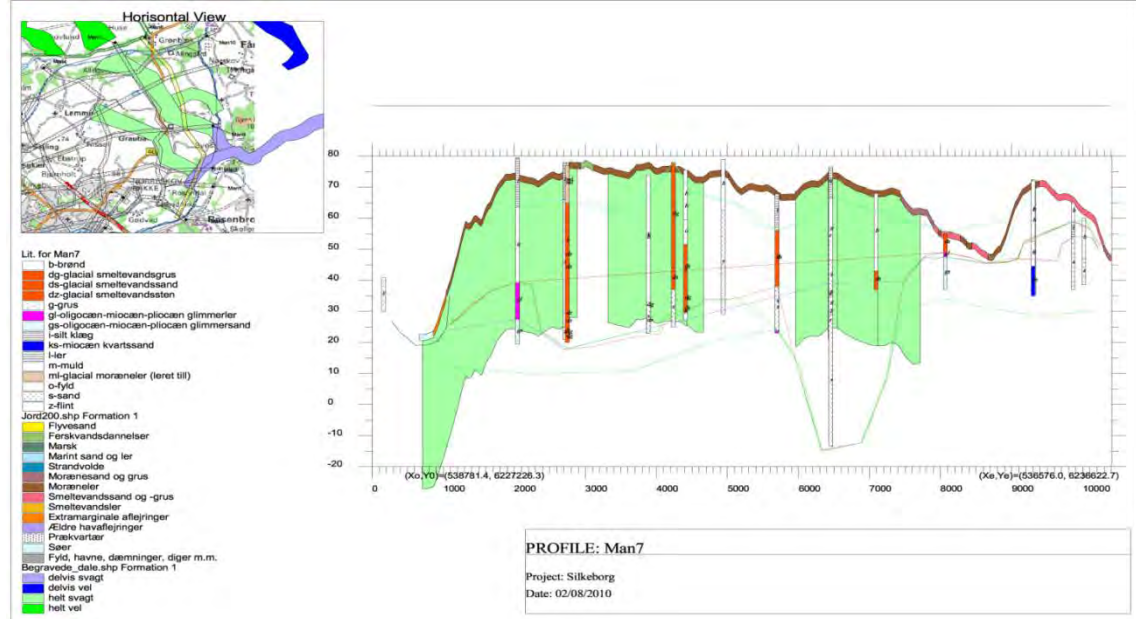
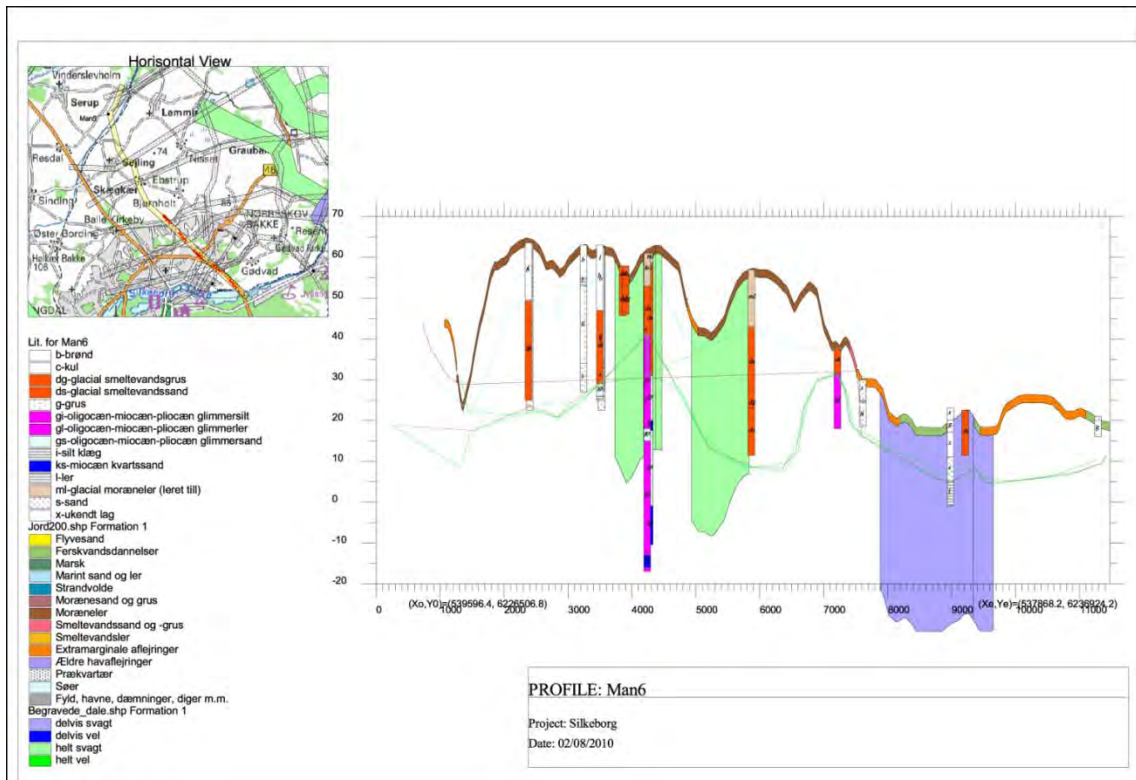
Figur B1-1 Uddrag af jordartskortet 1:200.000 for Silkeborg området

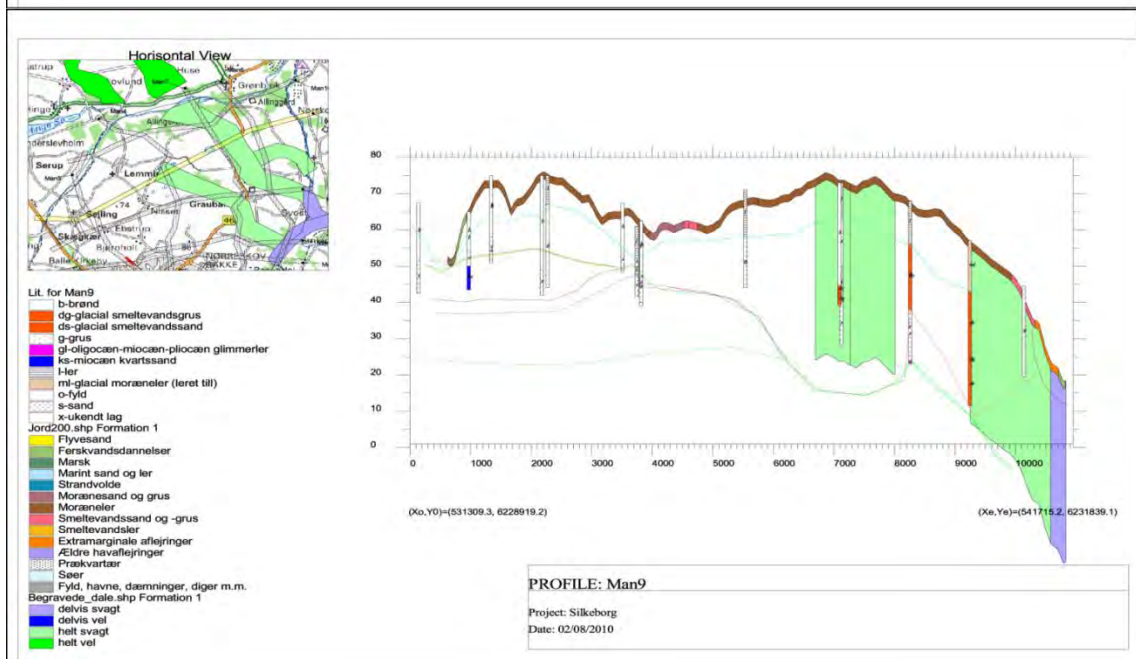
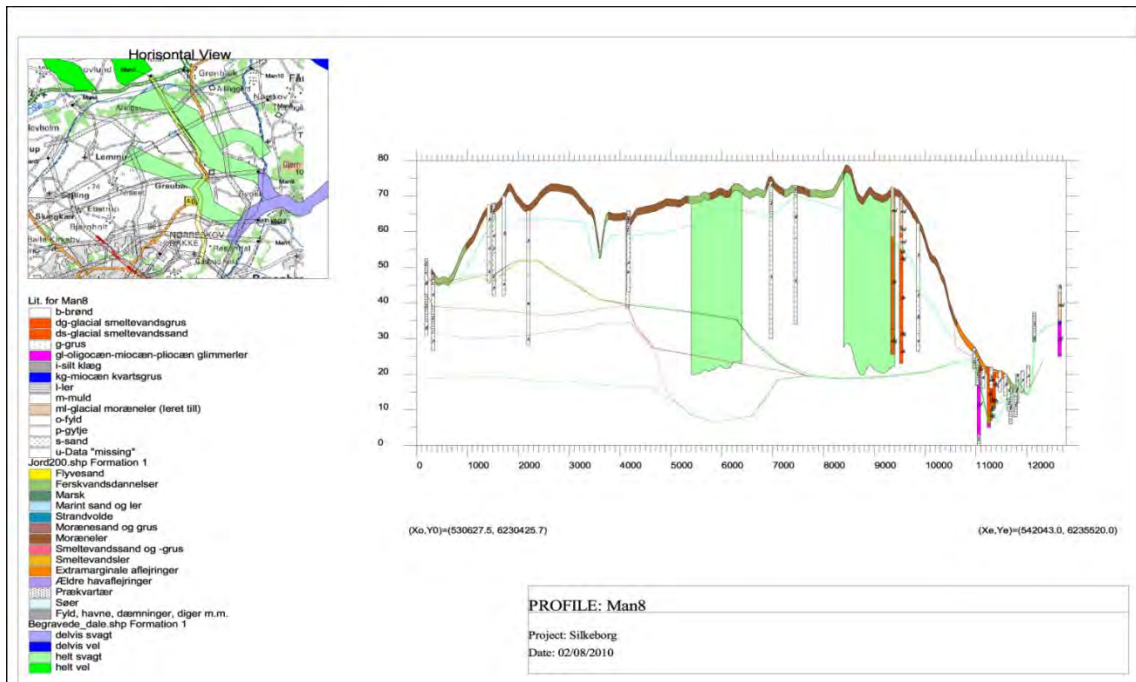
En meget stor del af borerne i området er kun brøndborer- eller geotekniskbeskrevet, hvilket kan vanskeliggøre tolkningen af miocæne sandlag kontra smeltevandslag. Under bunden af modellen – top af GL2 og det oligocæne ler findes i dybere borer indslag af glimmersand og kvartssand (Profil4). I modellagene GS1 og 2 er der i et mindre antal borer beskrevet kvartssand. (Profil10). Der er desuden beskrevet tæt liggende borer med en meget forskellig geologi primært i de miocæne aflejringer (Profil 6). I Profil1 og 5 ses en boring med miocæne bjergarter som ikke passer ind i den omkringliggende geologi, hvilket tyder på at der ligger en flage i området.

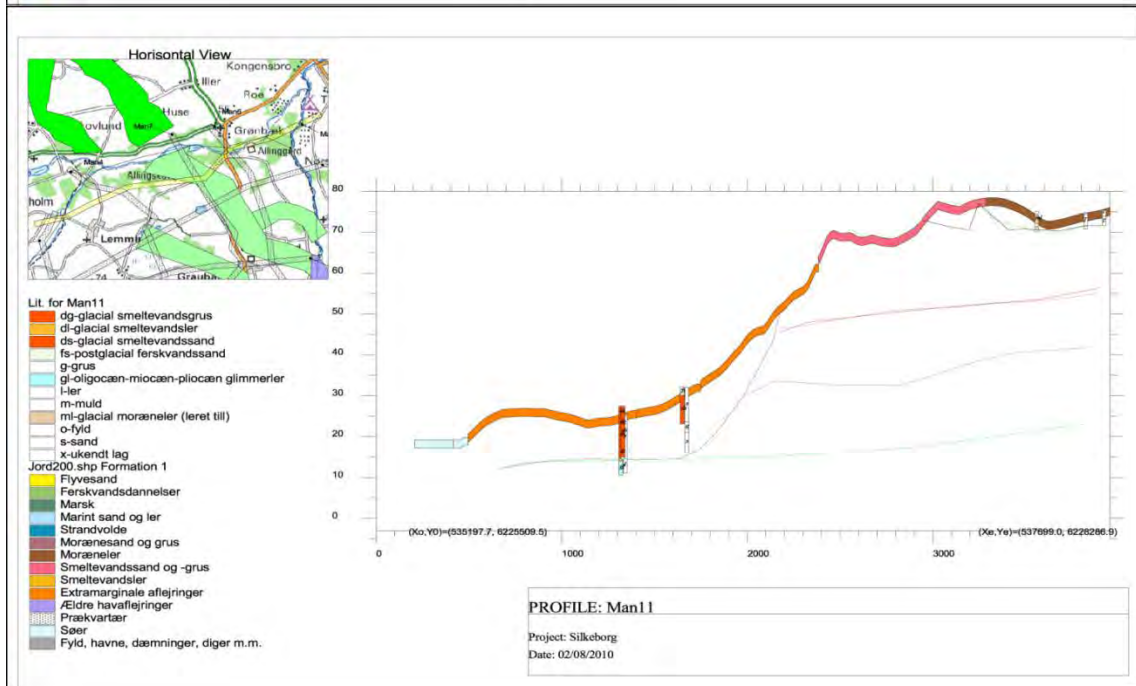
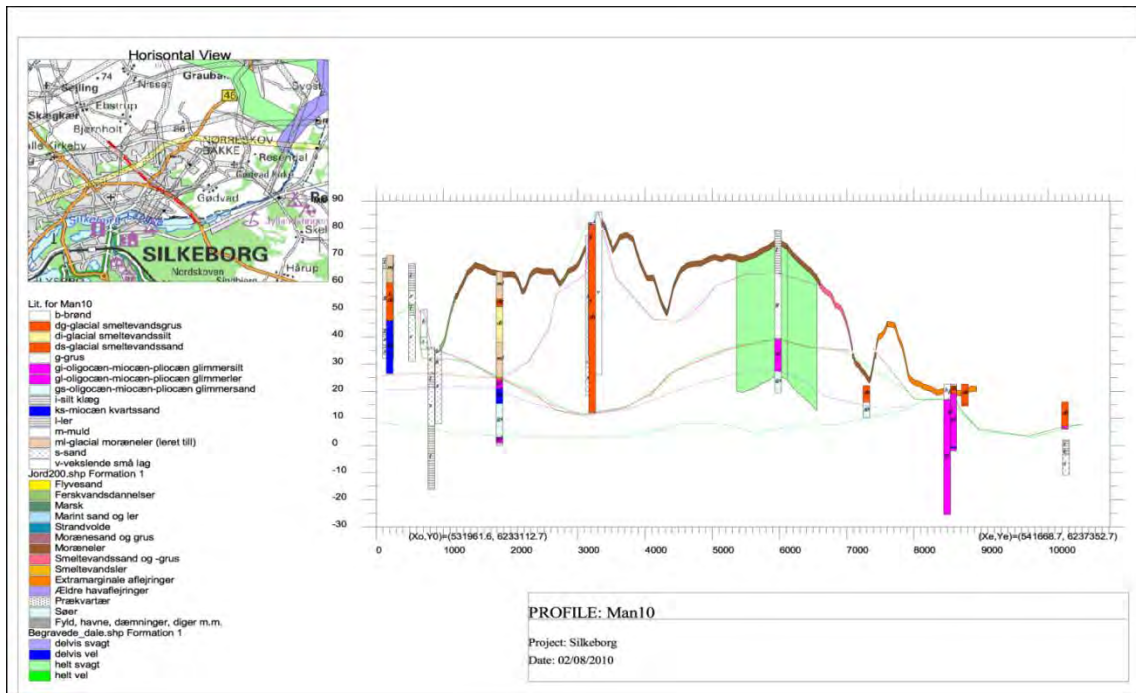


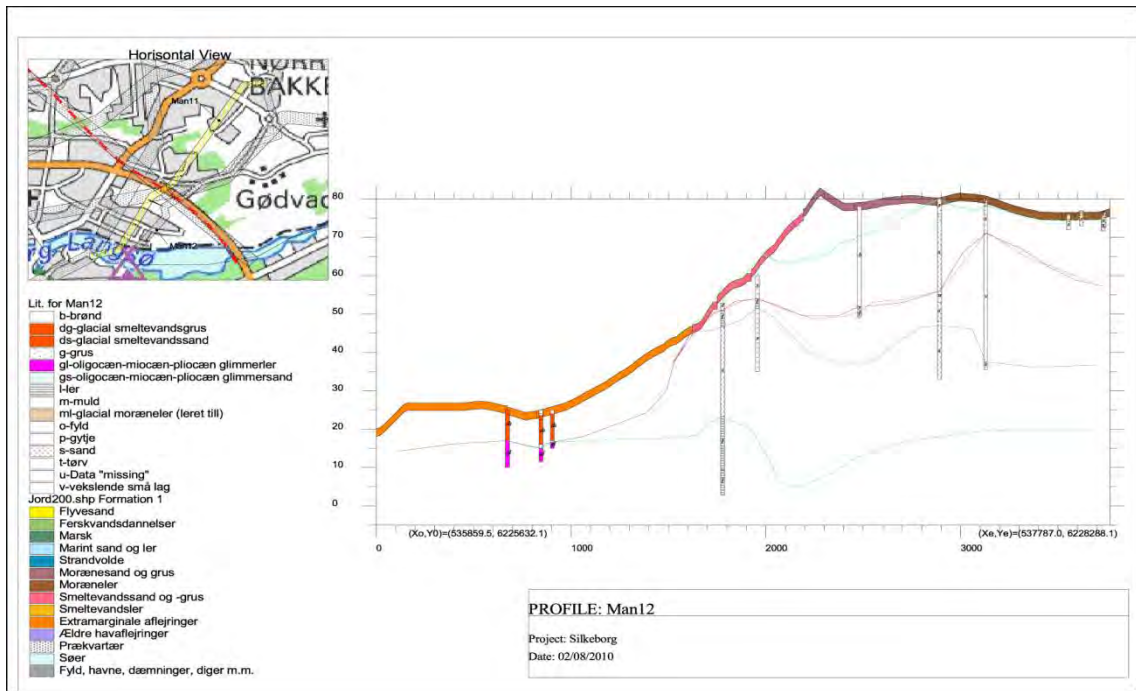












Bilag 2: Notat om forslag til nye boringer

Per Nyegaard og Lars Troldborg, GEUS 12 maj 2010

Problemstilling

I den indledende fase af modelleringen er det vigtigt at få styr på vandbalancen. I den forbindelse har vi gjort os et to observationer, som vil være værd at forfølge i en tidlig fase. Dels vil evt. vandfrigivelse til overflade elementer fra den øvre del af magasin systemet kan være afgørende for hvor stor effekten af klimatiske ændringer vil være i de nedre dele af magasin systemet hvor motorvejs føringen er planlagt. Dels er det usikkert hvordan magasin sammenhængen er mellem dybere liggende Miocæne sandlag og øvre liggende Kvartære sand magasiner. Prøvepumpninger fra Rambøll rapporten påviser hydrauliske konduktiviteter i størrelses ordenen $1e-5$ m/s for det Miocæne magasin og $1e-3$ m/s for det Kvartære magasin i området omkring Dyrehaven, dvs. afhængig af magasin tykkelse og hydraulisk kontakt kan der være tale om betydelige bidrag i vandbalancen.

På profil 3-5 ses at der er stor topografisk gradient (40-50 m på 1500 m) fra de kvartære smeltevands magasinet i den øvre del af oplandet mod de senglaciale aflejringer ved den planlagte motorvejs føring. Gradienter af sådan størrelse vil potentielt udløse vandafgivelse til overfladen våde områder / dræn / vandløb / kloak systemer. Disse evt. vandafgivelser vil det være af stor værdi at identificere og kvantificere. Forskellige typer data kan bruges til at komme med et bud på disse vandafgivelser og dermed bidrage til at mindske usikkerheden på vandbalancen. Der kan være vandføring i vandløb, frie, rørførte eller som kanaler, af forskellig størrelse gennem oplandet som vil være interessant at identificere og kvantificere. Formodentligt ligger kommunen inde med data desangående. Tilsvarende kan det tænkes at kommunen allerede har et kloak modellerings system, f.eks. i Mouse systemet. Gennemgang af gamle topografiske kort kan tænkes at bidrage til viden om mulige kilder/våde områders placering før udbygningen af bolig- industriområderne nord for den planlagte motorvejsføring.

Forslag til nye boringer og pejlinger

For at bidrage til afklaringen af magasin sammenhænge er mellem dybere liggende Miocæne sandlag og øvre liggende Kvartære sand magasiner, forslås det at der placeres 3-4 nye boringer NØ for den planlagte linjeføringen for motorvejen gennem Silkeborg med en dybde der rammer ned i den Miocæne geologi

Under optegningen af geologiske tværprofiler gennem det centrale område for linjeføringen af motorvejen, blev det klart, at der mangler boringsoplysninger om de dybere Miocæne aflejringer i området NØ for linjeføringen. Området ligger opstrøms med hensyn til grundvandstrømningen og de Miocæne glimmersandaflejringer har sandsynligvis hydraulisk kontakt til de overliggende smeltevandsaflejringer. Tykkelsen af de Miocæne glimmersandlag er fra 20 til over 45

meter, og sandet er både under- og overlejret af miocænt glimmerler/silt. Bunden af glimmer-sandet kendes ikke i f. eks Profil 3 og 4, og udbredelsen af det øvre miocæne glimmerlerlag er usikker, især i den nordlige del af Profil 2, hvor det også er uklart om der ligger miocænt glimmersand over det øverste glimmerlerlag.

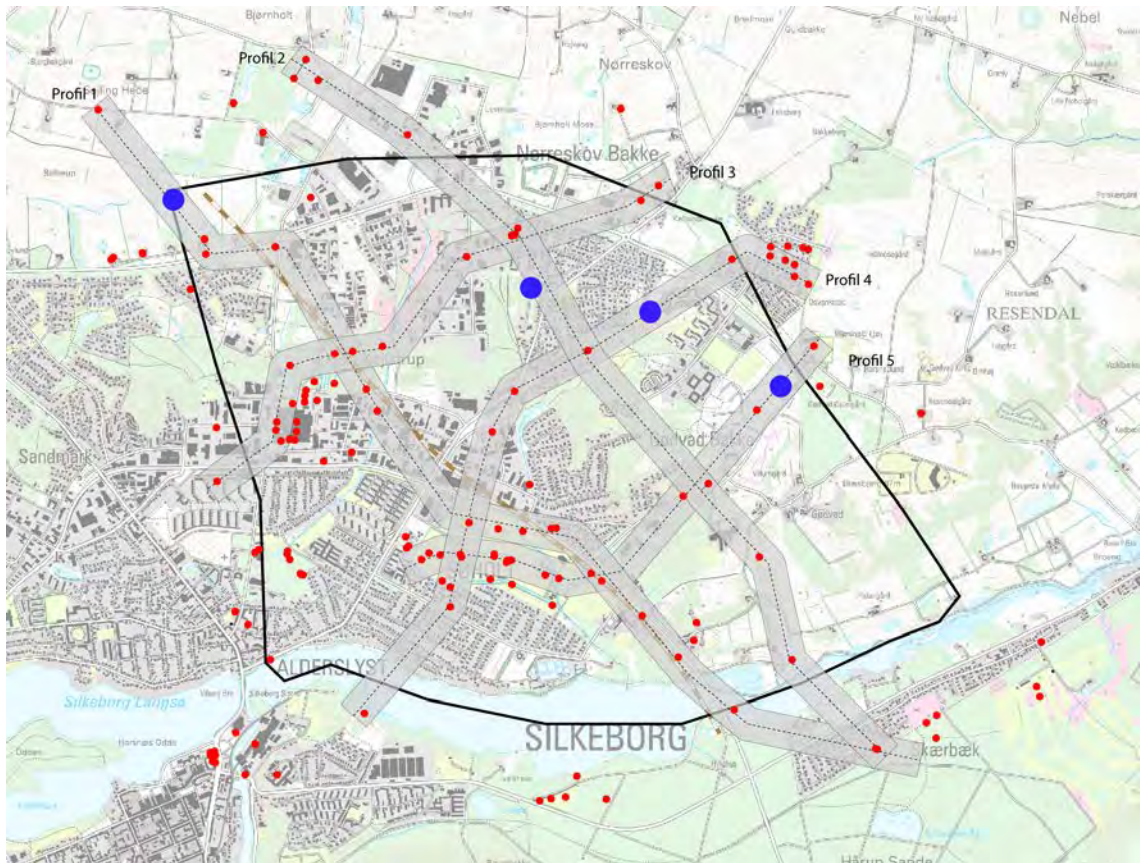
For at få afklaret udbredelsen af især de Miocæne lag, foreslås det at lave tre/fire undersøgelsesboringer langs Profilerne 2, 4 og 5 og evt. 1. Boringsforslag til Profil 1 har lave prioritet. Det dybe glimmerler/-silt lag gennembøres ikke, men der bores et par meter ned i laget. Hvis laget ikke er nået efter de max. angivende boreddybder stoppes boringen.

Profil 2		Profil 4		Profil 5		Profil 1 (evt.)	
Dybde:	60-65 m	Dybde	50-60 m	Dybde	65-70 m	Dybde	ca. 60 m
ML	ca. 5 m	DS	ca. 15 m	ML	ca. 10 m	ML	ca. 12 m
DS	ca. 25 m	GL/GI	ca. 10 m	DS	ca. 20 m	DS/GS	ca. 15 m
GL/GI	ca. 15 m	GS	ca. 25m	GL/GI	ca. 15 m	GL/GI	ca. 5 m
GS	ca 30 m	GL/GI		GS	ca. 25 m	GS	ca. 25m
GL/GI				GL/GI		GL/GI	

Den endelige placeringen af boringerne bør det nok vurderes i forhold til lokale muligheder, og UTM angivelserne i nedenstående tabel skal ses som approksimative, således forstået at en placeringen indenfor 500 m heraf vil være uproblematisk i forhold til modellerings opgaven.

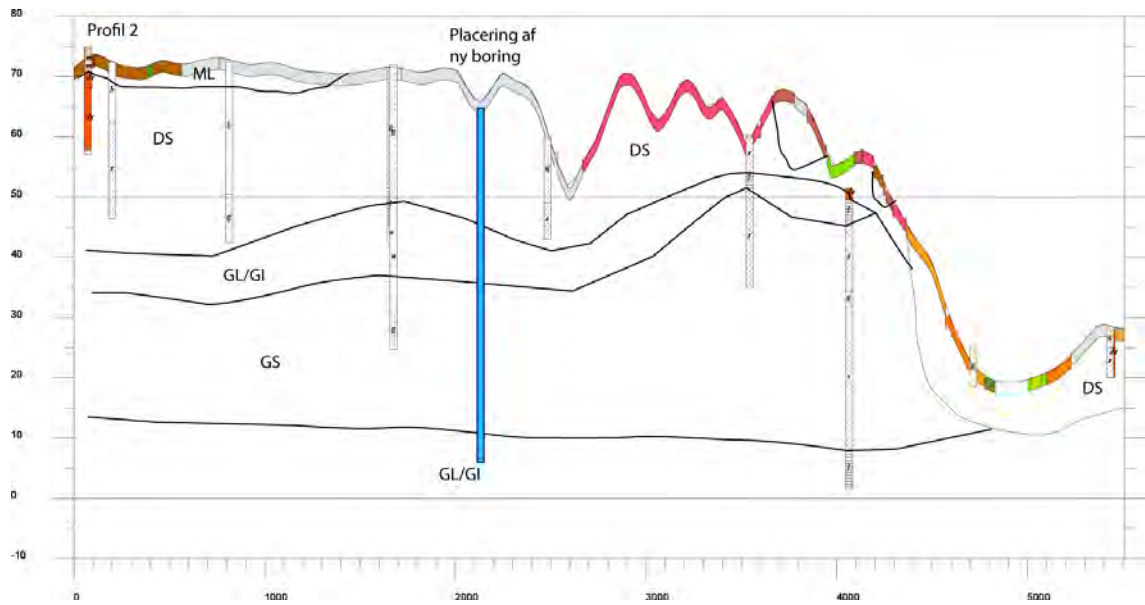
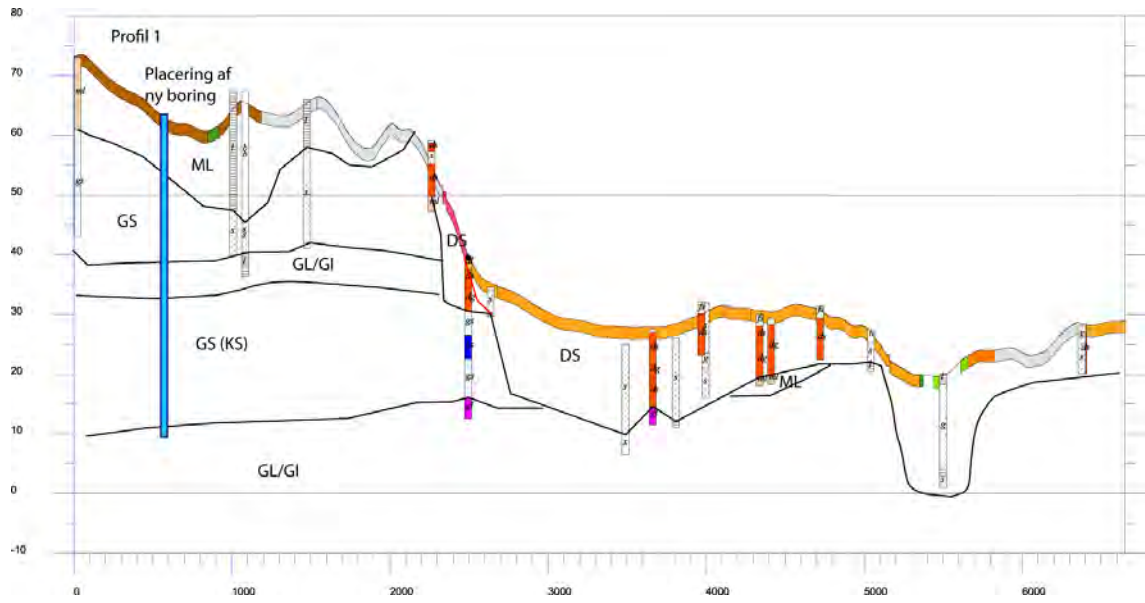
Koordinater EUREF89	Profil 2	Profil 4	Profil 5	Profil 1
xutm	536150	537625	537025	534100
yutm	6228100	6227450	6228000	6228460

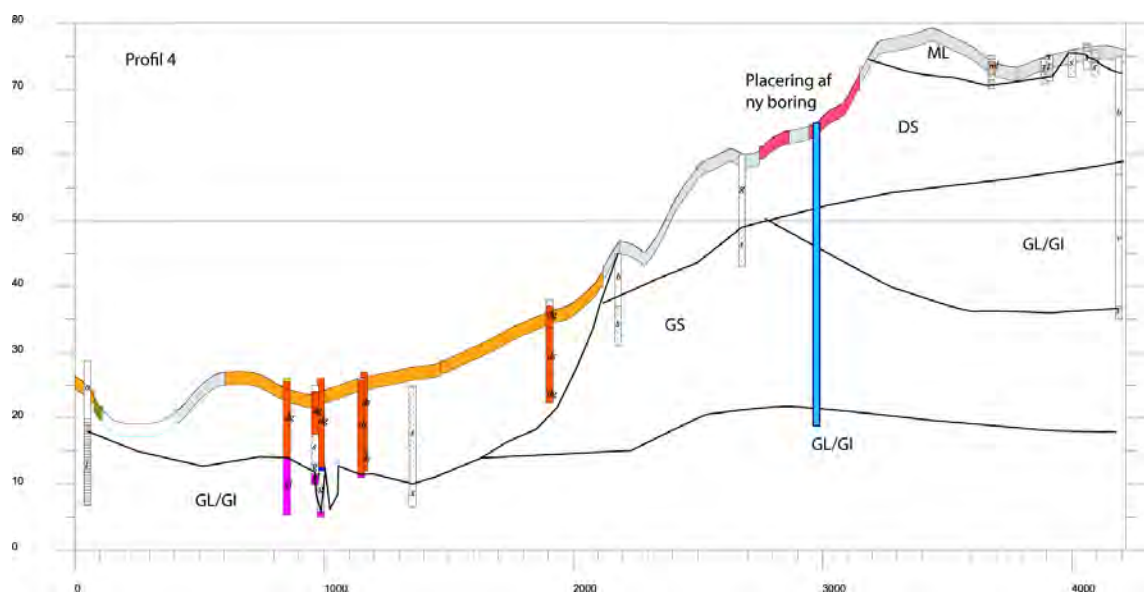
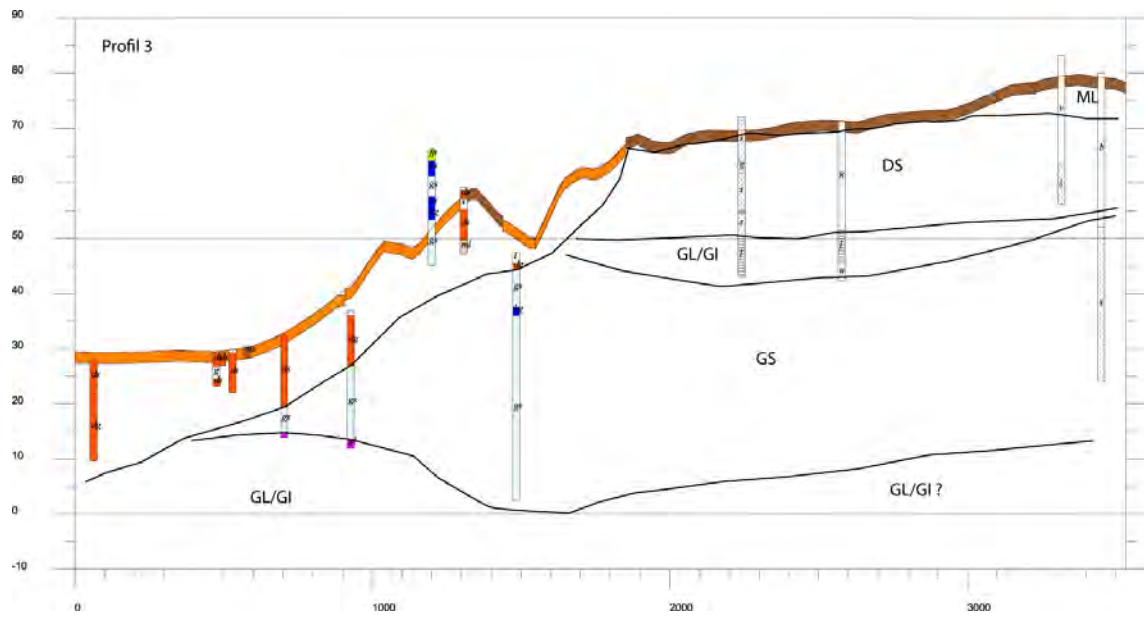
Vi anbefaler at boringerne, der vil gå gennem de to sandmagasiner, et kvartært og et miocænt, bliver udstyret med loggere i begge magasiner med separate filtre således at evt. påvirkninger af grundvandsstanden kan følges og der foretages tilbagepejlinger for begge magasiner for at estimere den hydrauliske ledningsevne.

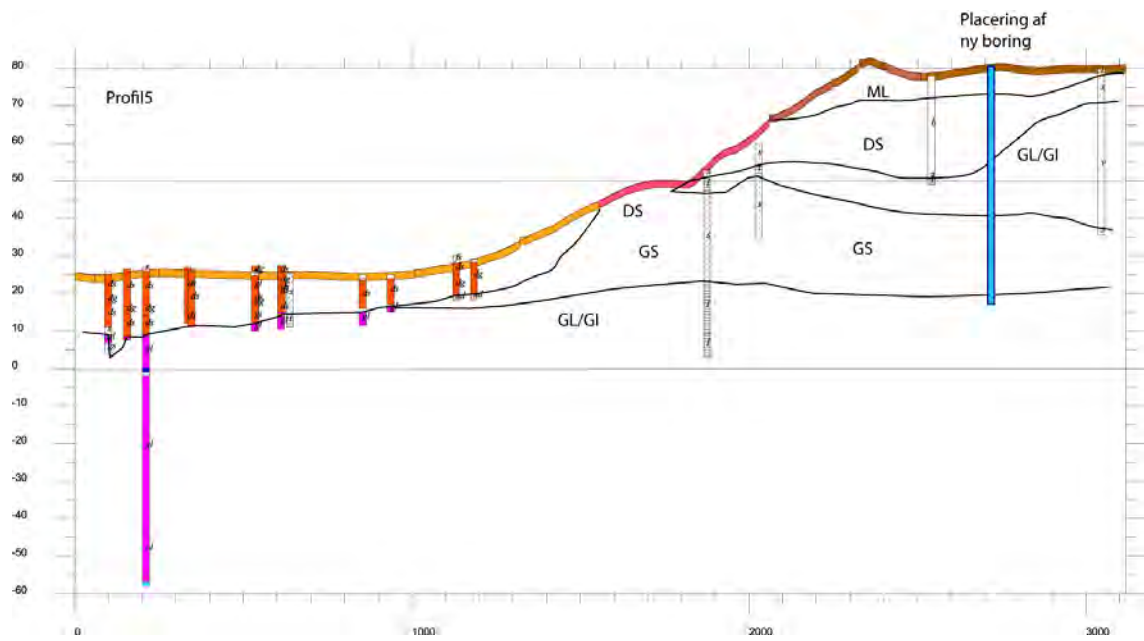


Blå: Forslag til placering af nye borer. Rød: Borer fra Jupiter-basen. Grå: Profiler.

Sort: Fokus område







Bilag 3: Analyse af vandstands variationer

Jacob Kidmose, GEUS Juni 2011

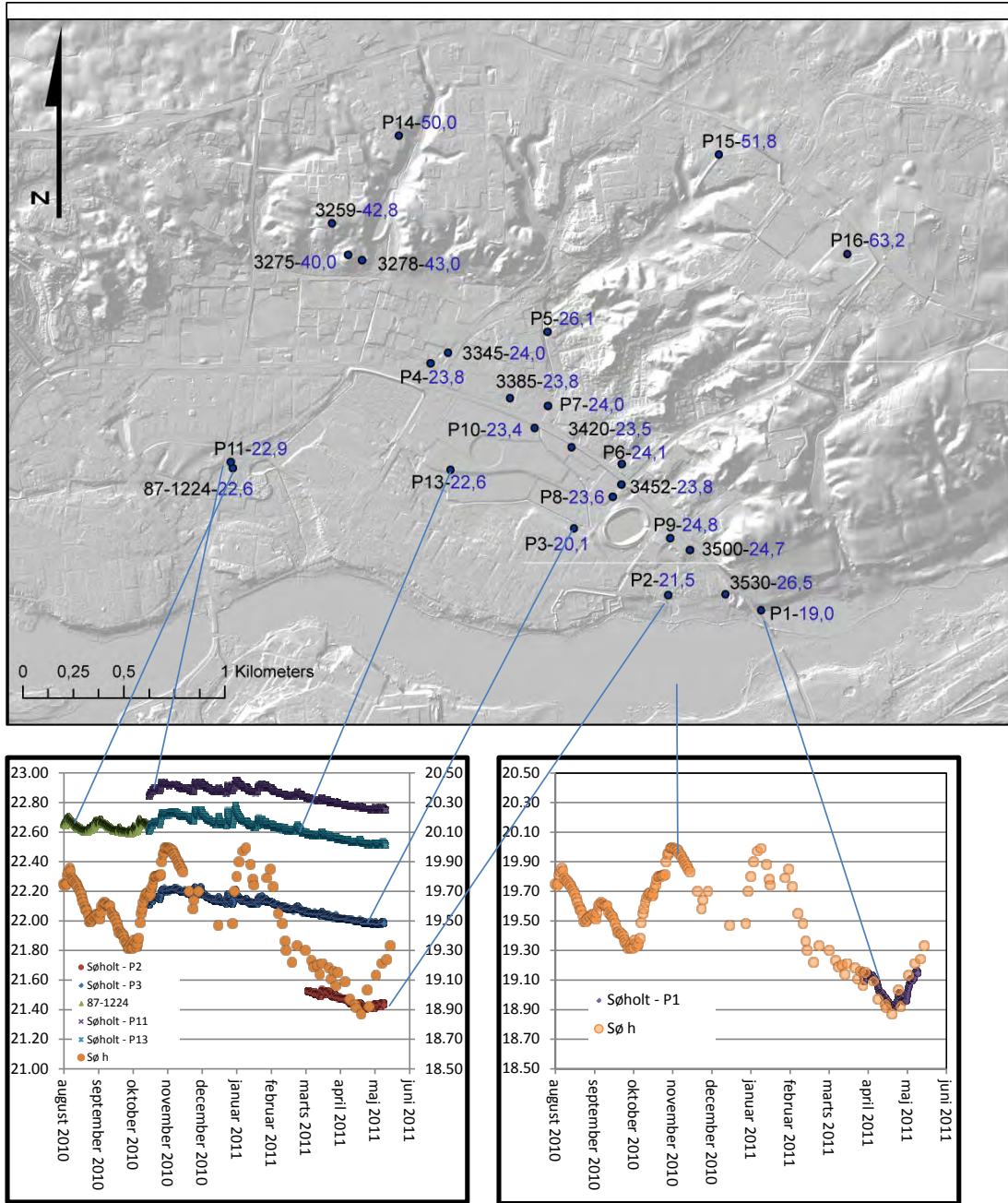
I forbindelse med motorvejsprojektet ved Silkeborg er der etableret og monitoreret et antal boringer i og omkring den planlagte vejføring. De fleste boringer er i filtersat i det geologisk beskrevne terrassesand, der fordeler sig i selve ådalen, hvor størstedelen af den nordlige del af Silkeborg by er beliggende. Laget terminerer mod ældre sedimenter mod nord på de stejle skrænter, der afgrænser ådalen. De lidt fjernere oplandsboringer set fra vejføringen, d.v.s. boring P14, P15, P16, 3259, 3275 og 3278 er filtersat i henholdsvis et øvre magasin og er prækvartært magasin. Det øvre og nedre magasin er hydraulisk adskilt af en leret prækvartær enhed, hvilket synliggøres ved trykforskelle mellem de to vandførende enheder på op til 20 m (se Tabel B3-1) over målte gennemsnits trykniveauer, minimum, maksimum og total variation). Forskellen i trykniveauer indikerer nedadrettet strømning med lavest trykniveau i nedre magasin i denne del af oplandet, Figur B3-1. Trykniveau forholdene i Søholt-terrassemagasin udviser små trykniveau fluktuation med generelt aftagende trykniveauer mod Silkeborg Langsø, Figur B3-1.

Sammenlignes de årlige fluktuationer med samtidige vandstandsændringer i Silkeborg Langsø indikeres dårlig kontakt mellem Søholt-terrassemagasinet og søen. Ved P1, der er placeret i et vådområde ved Langsøen ses god korrelation med søen. De øvrige boringer filtersat i terrasse sandet ser dog ikke ud til at have god kontakt til henholdsvis søen og det øvre filter i P1. Eksempelvis varierer trykniveauet i boringerne P2, -3, -11 og 13 sammenhængende, hvilket indikerer den høje hydrauliske ledningsevne og permeabilitet også påvist ved prøvepumpningerne beskrevet af COWI. Gradienten mod Silkeborg Langsø er relativ stor i terrassemagasinet set i henhold til den høje hydrauliske ledningsevne. Sammenholdt viser det en stor nord-sydgående grundvandsstrømning igennem terrassemagasinet, men da kontakten til Langsøen tilsyneladende er minimal må grundvandet enten; 1) strømme ud i udstrømningsområder tæt ved søen, 2) tilstrømme drænsystemer, eller 3) have kontakt og udveksle grundvand med dybere aquiferer. Ældre kort over området viser at der ved Langsøen tidligere har været moseområder ved Langsøen, der kan have fungeret som udstrømningsområder for terrassemagasinet. Under senere urbaniseringen af nærområdet ved den nordlige bred af Langsøen må dræning nødvendigvis være foretaget, hvilket dermed har drænet magasinet.

Et øget fokus på udvekslingen mellem de mere naturlige grundvandssystemer og afdrænings-systemerne vil kunne kaste lys over afstrømningen af terrassemagasinet som den planlagte motorvej vil påvirke.

Tabel B3-1 Trykniveauer i boringer

Boring	snit	min	maks	Variation
01_3530	26,49	26,40	26,58	0,18
P1	19,04	18,92	19,17	0,25
P2	21,47	21,40	21,54	0,14
P3	22,10	21,97	22,23	0,26
3345	24,02	23,92	31,24	7,32
P4	23,82	23,74	23,88	0,14
P5	26,07	25,98	26,19	0,21
P6	24,05	23,91	24,12	0,21
3385	23,77	23,70	23,83	0,13
P7	23,99	23,87	24,10	0,23
3452	23,76	23,54	23,84	0,29
P8	23,61	23,50	23,70	0,20
3500-2	24,71	24,66	24,77	0,11
3500-1	26,13	25,93	26,33	0,40
P9	24,38	23,99	24,51	0,52
P10	23,40	21,18	23,49	2,31
3420	23,50	23,42	23,58	0,16
87-1224	22,62	22,56	22,74	0,18
P11	22,85	22,75	22,95	0,20
P13	22,63	22,51	22,78	0,27
P14-2	49,95	49,89	50,02	0,13
P14-1	43,64	43,59	43,70	0,11
P15-2	51,81	51,81	51,81	0,00
P15-1	46,81	46,81	46,81	0,00
P16-2	63,20	62,87	63,82	0,95
P16-1	43,18	43,12	43,33	0,21
3259-1	37,31	37,30	37,33	0,03
3259-2	42,80	42,78	42,84	0,06
3275-1	35,18	35,14	35,30	0,16
3275-2	40,00			
3278-3	43,09	43,03	43,16	0,13
3278-2	40,40	40,40	40,40	0,00



Figur B3-1 Øverst, filtersatte boringer og gennemsnitlig trykniveau. Ved boringer med to filtersætninger er trykniveau i øverste filter vist. Nederst, tidlig variation i trykniveauer (y-akse, angivet i meter over havniveau)

Bilag 4: Anbefalinger til opstilling af vandføringsstationer ved Søholt

Lars Troldborg og Jens Christian Refsgaard, GEUS 30 september 2010

Problemstilling - motivation

Et afgørende element i grundvandmodelleringen er at få styr på den samlede vandbalance i oplandet opstrøms for den nye motorvej, dvs. at få kvantificeret hvor stor en del af nedbøren der afstrømmer overfladenært (via grøfter og rør) og hvor meget der perkolerer ned til grundvandsmagasinerne, hvor det vil påvirke grundvandsstanden ved den nye motorvej. Med måledata af grundvandets trykniveauer kan vi godt få en grundvandsmodel til at simulere de nuværende forhold via kalibrering af hydraulisk ledningsevne i de forskellige grundvandslag. Men sådan en grundvandsmodel vil være meget usikker, fordi mange forskellige kombinationer af parameterværdier vil kunne give næsten samme simulering af trykniveauer. Modellen kan således meget vel give de "rigtige svar af de forkerte grunde", hvilket vil betyde, at den vil give meget usikre resultater, når vi benytter den til at simulere situationer der er forskellige fra de nuværende, f.eks. effekter af store grundvandsoppumpninger (anlægsfasen) eller af ændrede nedbørsforhold i klimaet i år 2100. Den usikkerhed kan reduceres betydeligt ved at benytte data for den overfladenære afstrømning i en modelkalibrering.

Sådanne afstrømningsdata eksisterer imidlertid ikke i dag. Afstrømningsdata vil være meget værdifulde for grundvandsmodellen. Derudover vil de kunne være nyttige for den MIKE Urban model til simulering af regnvandsafstrømningen via kloaksystemet i oplandet, som Orbicon har opstillet for Silkeborg Forsyning.

Vi har derfor undersøgt, hvor det ville være bedst at lave vandføringsmålinger. Vi har fået adgang til Orbicon's Mike Urban model, som indeholder informationer om vandløb og kloakrør. Desuden har vi den 21. september lavet en rekognoscering i området for at lokalisere egnede steder til vandføringsmålinger. Felt rekognosceringen er illustreret via kort og fotos på de kommende sider.

Udover vandføringsmålinger i vandløb har vi også brug for vandstandsmålinger i Silkeborg Langsø, for at kunne bestemme den nedstrøms randbetingelse. Silkeborg kommune laver i øjeblikket manuelle målinger ved Søholt Renseanlæg.

Forslag til vandføringsmålinger i vandløb

Vi foreslår en strategi for vandføringsmålinger baseret på en kombination af:

- Kontinuert registrering af vandstand på et lille antal målestationer, hvor der laves nogle vandføringsmålinger, så de kontinuerede vandstandsmålinger kan konverteres til kontinuerede vandføringsdata via en såkaldt rating kurve.
- Synkronmålinger, dvs. målinger af vandføringer på mange lokaliteter foretaget på den samme dag.

Vi foreslår etablering af tre målestationer til kontinuert registrering af vandstand. Placeringen af de tre stationer fremgår af Figur 1. De to nedstrøms målestationer i Søholt Bæk og Kejlstrup Grøft afdræner tilsammen hovedparten af det topografiske opland for motorvejsføringen gennem Søholt og Dyrehaven. Den tredje station, som ligger nord for motorvejslinien i Kejlstrup Grøft har vi foreslået for at få information om, hvor på strækningen ned ad bakkerne at tilskuddet fra grundvandsmagasinerne til bækken kommer. Der er faste tværsnit (flisebelagte i Kejlstrup Grøft) og gode måleforhold ved alle tre lokaliteter.

Vi foreslår, at de tre stationer etableres hurtigst muligt, så vi kan få nogle måneders data til kalibreringen af den detaljerede grundvandsmodel der skal etableres i perioden oktober 2010 til marts 2011. Vi vil givet vis have nytte af data også i anlægsfasen, og det er meget sandsynligt, at en eller flere af de tre stationer bør fortsætte målingerne i en årrække efter marts 2011.

I tillæg til de tre stationer er vi i gang med at undersøge, om de instrumenter der kan ses ved Søholt Bæk i Dyrehaven er en vandstandsstation.

Forslag til vandstandsmålinger i Silkeborg Langsø

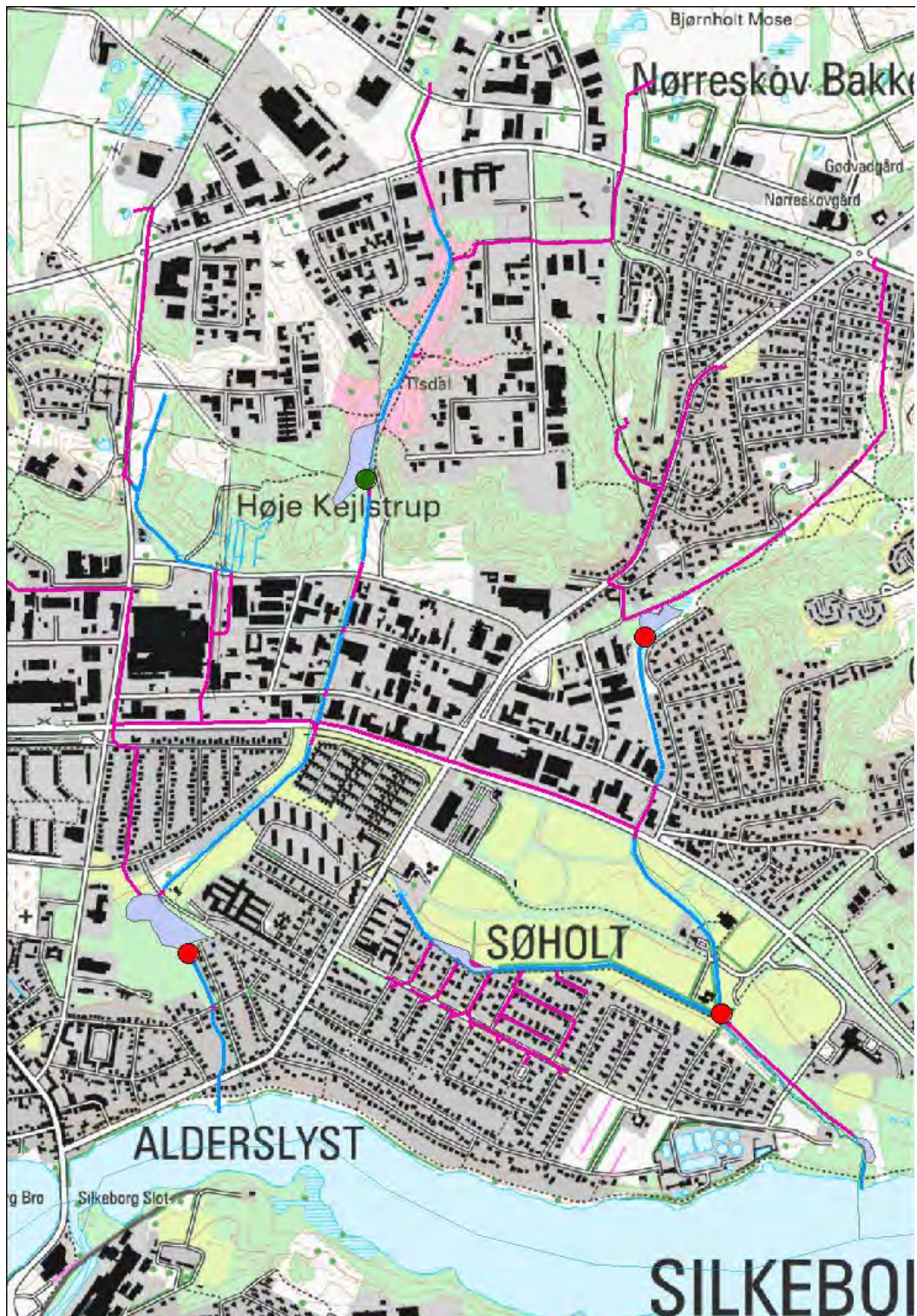
For at sikre kontinuerede vandstandsdata for Silkeborg Langsø foreslår vi at der etableres en automatisk målestation til registrering af vandstandsdata. Den kan formentlig med fordel placeres ved Søholt Renseanlæg.

For at sikre, at ansvaret for feltmålinger samles foreslår vi at Cowi tager sig af etableringen og driften af de tre målestationer, gerne med støtte fra Orbicon, som er den organisation der fagligt har størst ekspertise på området.

Synkronmålinger

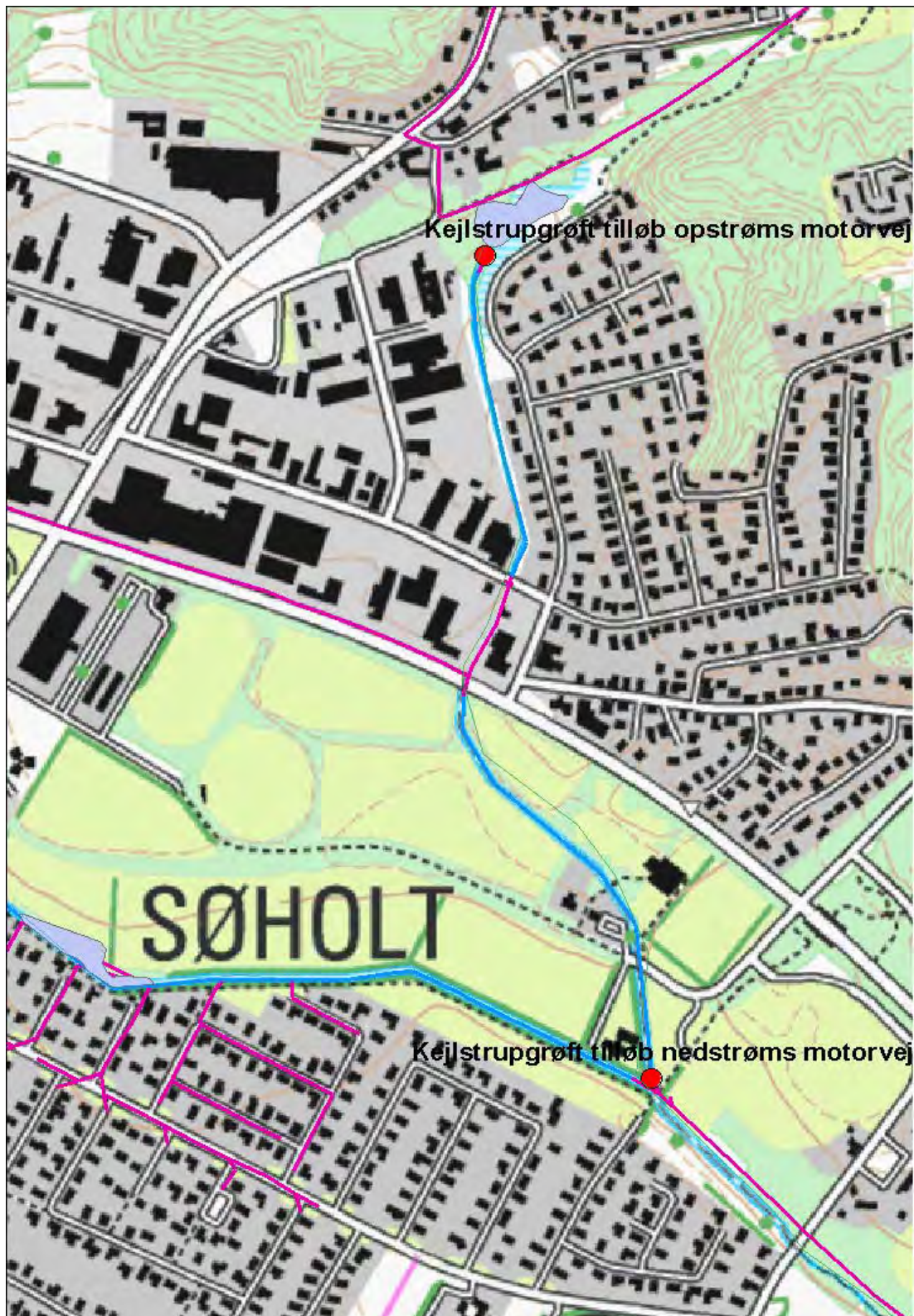
GEUS vil foretage synkronmålinger i løbet af efteråret.

Oversigtskort



Figur B4-1 Oversigtskort med åbne – og rørførte vandløb

Kejlstrupgrøft tilløb oversigtskort og foto



Figur B4-2 oversigtskort over Kejlstrupgrøft tilløb



Figur B4-3 Konstruktion ved Kejlstrupgrøft tilløb nedstrøms motorvej



Figur B4-4 Konstruktion ved Kejlstrupgrøft tilløb nedstrøms motorvej set nord fra



Figur B4-5 Kejlstrupgrøft tilløb nedstrøms motorvej før konstruktion



Figur B4-6 Sø ovenfor Kejlstrupgrøft tilløb opstrøms motorvej



Figur B4-7 Konstruktion ved Sø ovenfor Kejlstrupgrøft tilløb opstrøms motorvej

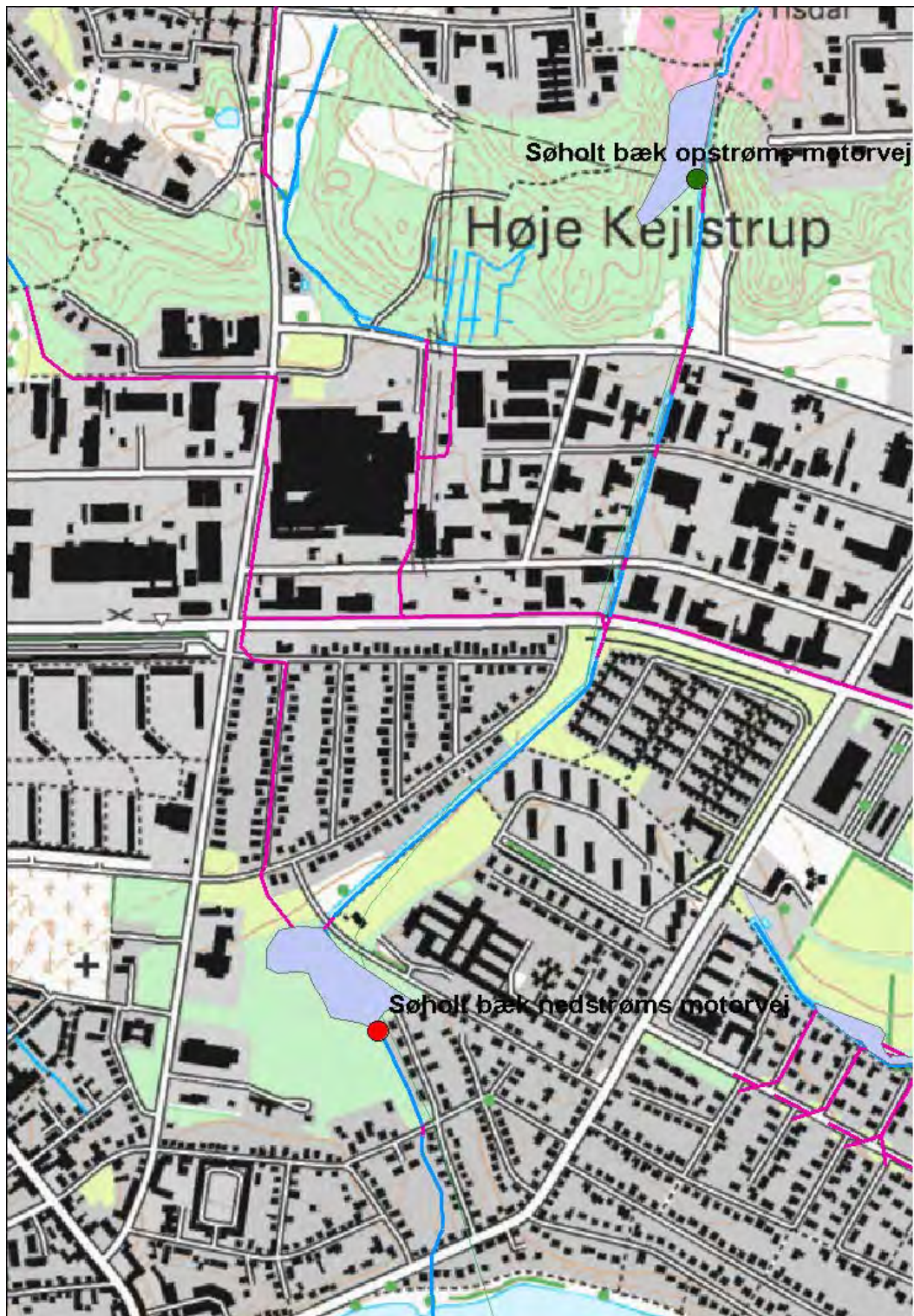


Figur B4-8 Konstruktion Kejlstrupgrøft tilløb opstrøms motorvej



Figur B4-9 Kejlstrupgrøft tilløb opstrøms motorvej umiddelbart efter konstruktion

Søholt Bæk oversigtskort og foto



Figur B4-10 Søholt Bæk oversigtskort og stationsplacering



Figur B4-11 Sø i Dyrehaven ved Søholt Bæk



Figur B4-12 Søholt Bæk umiddelbart nedstrøms sø i Dyrehaven



Figur B4-13 Målestation? mellem sø i Dyrehaven og Søholt Bæk



Figur B4-14 Konstruktion (overløb) ved Søholt Bæk nedstrøms motorvej



Figur B4-15 Sø nord for konstruktion ved Søholt Bæk nedstrøms motorvej



Figur B4-16 Søholt Bæk nedstrøms motorvej efter konstruktion

Bilag 5: Notat om GEUS modellering af klimaeffekter for motorvejsstrækning gennem Silkeborg

Lars Trolborg, Jacob B. Kidmose og Jens Christian Refsgaard, GEUS 8 juni 2011

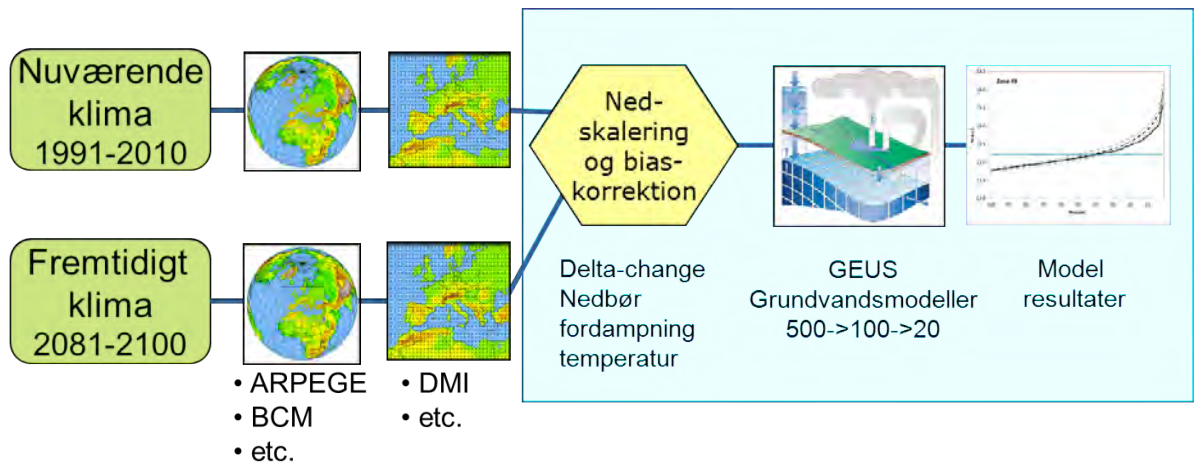
Baggrund

GEUS gennemført en række simuleringer af udvikling i grundvandstand som følge af forventede klimaændringer for Silkeborg området. Modelleringen er gennemført dels for at støtte op omkring Cowi's detailmodellering af motorvejs transektet og dels for at kunne bidrage til beslutningsgrundlag i forbindelse med motorvejs projekteringen. Formålet med notatet er dels at opsummere simuleringerresultater præsenteret den 12/5-2011 på COWI og dels at give et bud på hvilke ændringer i grundvandstand som det vil være forventeligt at se i fremtiden ud fra modelresultaterne og derfor bør indgå i projekterings overvejelserne. På mødet blev en række emner vendt dels omkring usikkerhed vedrørende områdets hydrogeologi, i særdeleshed langs den sidste del af motorvejs transektet ned mod Silkeborg Langsø, dels omkring grundvandsmodellernes evne til at simulere nuværende grundvandstand og dels omkring usikkerhed omkring dynamik i grundvandsspejl og påvirkning af vandspejls ændringer fra Silkeborg Langsø. Den efterfølgende analyse af disse forhold er på nærværende tidspunkt ikke afsluttet, hvorfor notatets resultater må læses med forbehold. De præsenterede resultater i dette notat er alle beskrevet med et konfidensinterval, som udelukkende er udtryk for klimamodel forskelle og ikke skal ses som udtryk for grundvandsmodellens simuleringsevne.

Modellerings metodik

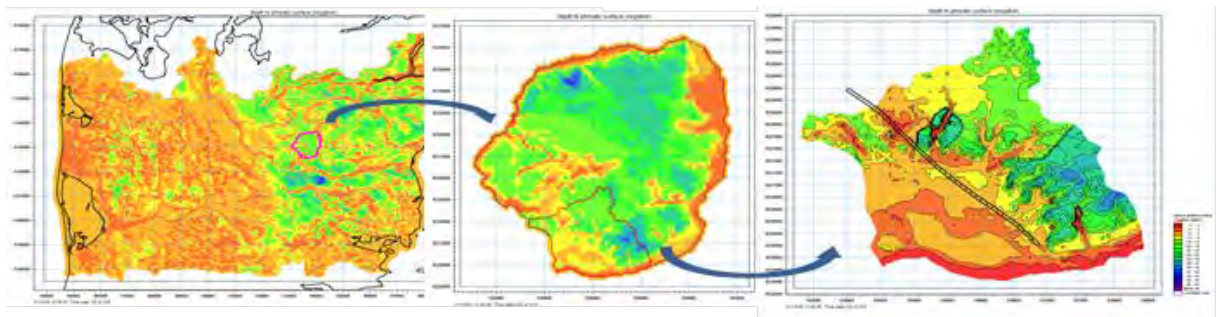
Modelopsætning

Grundvands påvirkninger i det øvre grundvandsspejl (modellag 2) er undersøgt ud fra ENSEMBLES model beregningerne af A1B emissions scenariet. hvor dette modelleres med 32 forskellige kombinationer af globale cirkulations modeller og regionale klimamodeller. Af de 32 kombinationer giver kun 11 et klimasignal der kan bruges i scenarie analysen. De 11 klimasignaler, dvs. 11 principielt set lige mulige fremtidige scenarier, bruges til at generere input til grundvandsmodellerne i form af korrektionsfaktorer for nedbør, fordampning (E_r), og temperatur i forhold til en reference situation. I grundvandsmodellen regnes der både på reference situationen, der udgøres af kontrol perioden 1991-2010, og de 11 bud på fremtidssituationen, perioden 2081-2100.



Figur B5-1 Nedskalering og modellering af fremtidigt klimatisk udvikling

GEUS har udviklet tre grundvandsmodeller dækkende Silkeborg området. En regional dækkende model i 500 meter celler udviklet ud fra skelettet af DK modellen og den geologiske model udviklet i dette projekt for Silkeborg, en lokal model dækkende et ca. 10 x 10 km opland med en numerisk opløsning i 100 meter celler og en sub model med fokus på motorvejs transektet gennem Silkeborg en opløsning i 20 meter celler. Det primære formål denne modelstruktur er at levere troværdige randbetingelser til sub modellen. Det er trykniveauer og hydrogeologiske data fra submodellen, som Cowi har videre bearbejdet i deres modelarbejde. Lokal model og sub model er ens for så vidt angår parametrisering og modelskelet, mens kalibrering af parameterværdierne er foretaget i 100 m modellen.



Figur B5-2 Model struktur: regional model -> lokal model -> sub model

De 11 klimascenarier er kørt i alle tre modeller, hvor resultater til nærværende notat er fra 20m modellen. Regional modellen simulerede vandføring igennem Silkeborg Langsø, der herefter benyttes til beregning af vandstandsvariation i Langsøen på baggrund af en opstillet Q/h relation. Vandstandsvariation i Silkeborg Langsø indgår som randbetingelse i såvel lokal- som sub model.

Initialt trykniveau for de tre successivt kørte modeller er genereret ved en hotstart model. Herved forstås, at modellerne indledningsvist er simuleret for en 20 års perioden, hvorefter simulerede trykniveauer fra sidste tidsskridt er brugt som startbetingelse for den endelige

produktions kørsel. Hver model er således kørt to gange for hvert scenarie, men kun data fra sidste kørsel er anvendt i analyse.

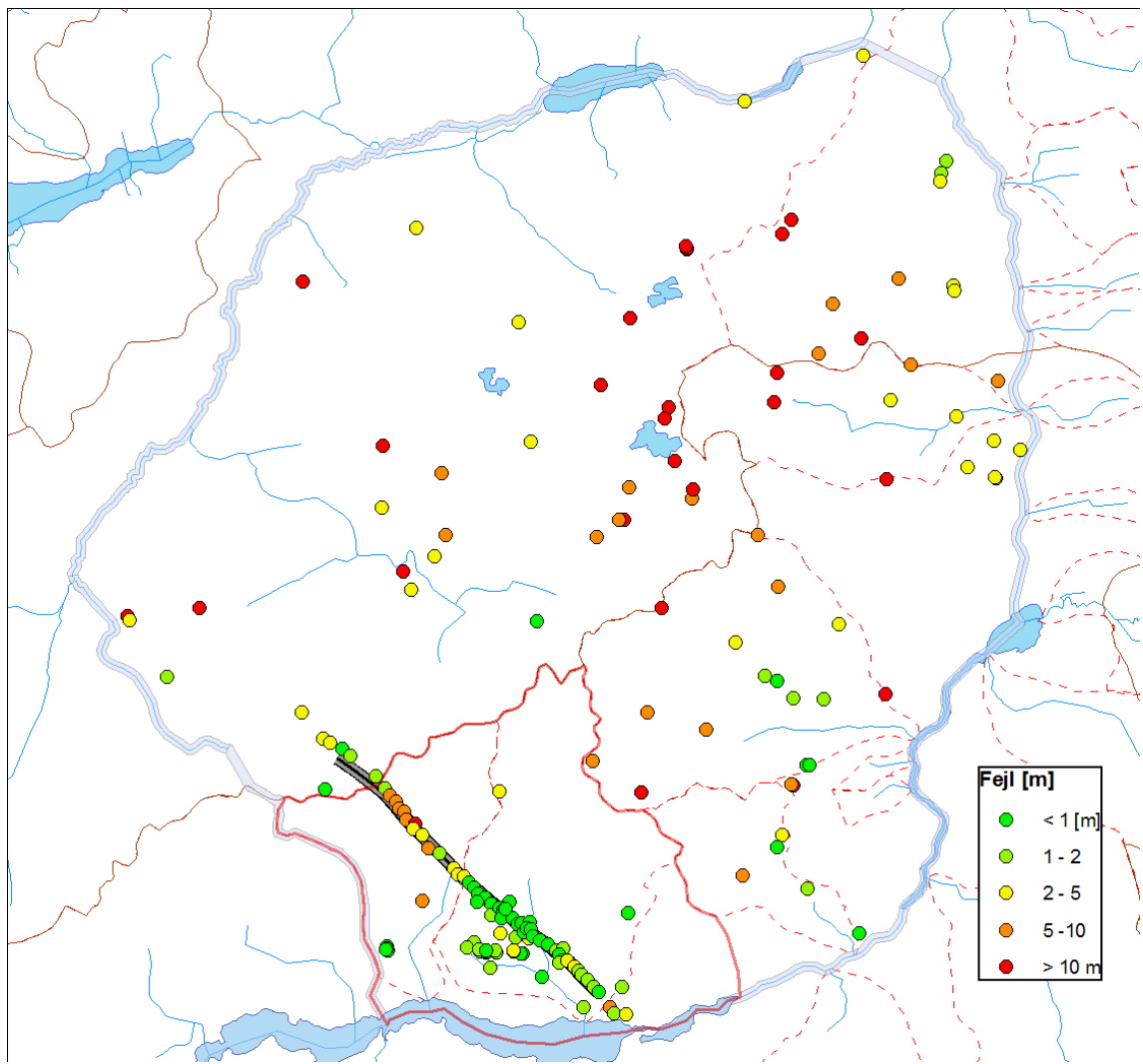
ENSEMBLES scenarier er det mest komplette sæt klimaberegninger der pt. findes for Europa. De er baseret på IPCC's klimascenarie A1B, og er gennemført ved at en række Europæiske institutioner har anvendt deres forskellige globale klimamodeller (GCM) og regionale klimamodeller (RCM) til at lave projektioner for klimaet for perioden 1951-2100. GEUS (HYA-CINTS/Lauren Seaby) har analyseret disse data og i første omgang beregnet korrektions faktorer, de såkaldte delta change koefficienter, som fortæller hvor meget klimamodellerne forudsiger at klimaet ændrer sig fra en kontrolperiode (1991 - 2010) til en fremtidig periode (2081-2100). Der er beregnet delta change faktorer for 11 kombinationer af GCM'er og RCM'er (en RCM er nested ind i en GCM). De 11 forskellige klimamodeller giver forskellige fremskrivninger af klimaændringer og spændvidden mellem modellerne kan derfor opfattes som et mål for usikkerheden på modellernes evne til at forudsige klimaændringer.

Det skal bemærkes at der ikke er lavet dybdegående analyser af kontrol perioden 1991-2010 i forhold til ekstremhændelser som påvirker grundvandsstand. Der har været lavet studier i Spildevandskomiteen med fokus på ekstrem nedbør med korte varighed, men disse kan ikke umiddelbart overføres til ekstrem nedbørshændelser af betydning for grundvandsstand (længere varende nedbørsperioder).

Databearbejdning / valg af simulerings metodik

Simuleringer af grundvandsstanden for reference situationen (1991-2010) viser at det med modellen er muligt at ramme målte grundvandsstande indenfor ± 1 meter i det meste af motorvejs transektet (Figur B5-3), men at der er variationer langs dette og en tendens til dårligere simulerings resultater ved transektet hvor det kommer tæt på Silkeborg Langsø/Gudenåen og hvor det krydser gennem Dyrehaven. I den øvre del af oplandet er både kvaliteten af pejlingerne og modelresultatet meget svingende og af mindre betydning for motorvejs projekteringen.

Grundet disse forhold er resultater præsenteret som ændringer relativt i forhold til reference situationen og dette er i overensstemmelse med den metodik Cowi anvender i deres detail grundvandsmodellering. Der simuleres dynamisk med grundvandsmodellen, dvs. med variationer på daglige eller mindre tidsskridt. Da det vurderes at både grundvandssystemets stationære- og dynamiske ændringer kan være af betydning for projekteringen, præsenteres tillige ændringer grundvandsstandens dynamik relativt dels til reference situationens middelniveau og dels til reference situationens grundvandsdynamik, dvs. modellerede grundvandsvariationer for kontrolperioden.



Figur B5-3 Modellernes evne til at simulere målte grundvands potentialer

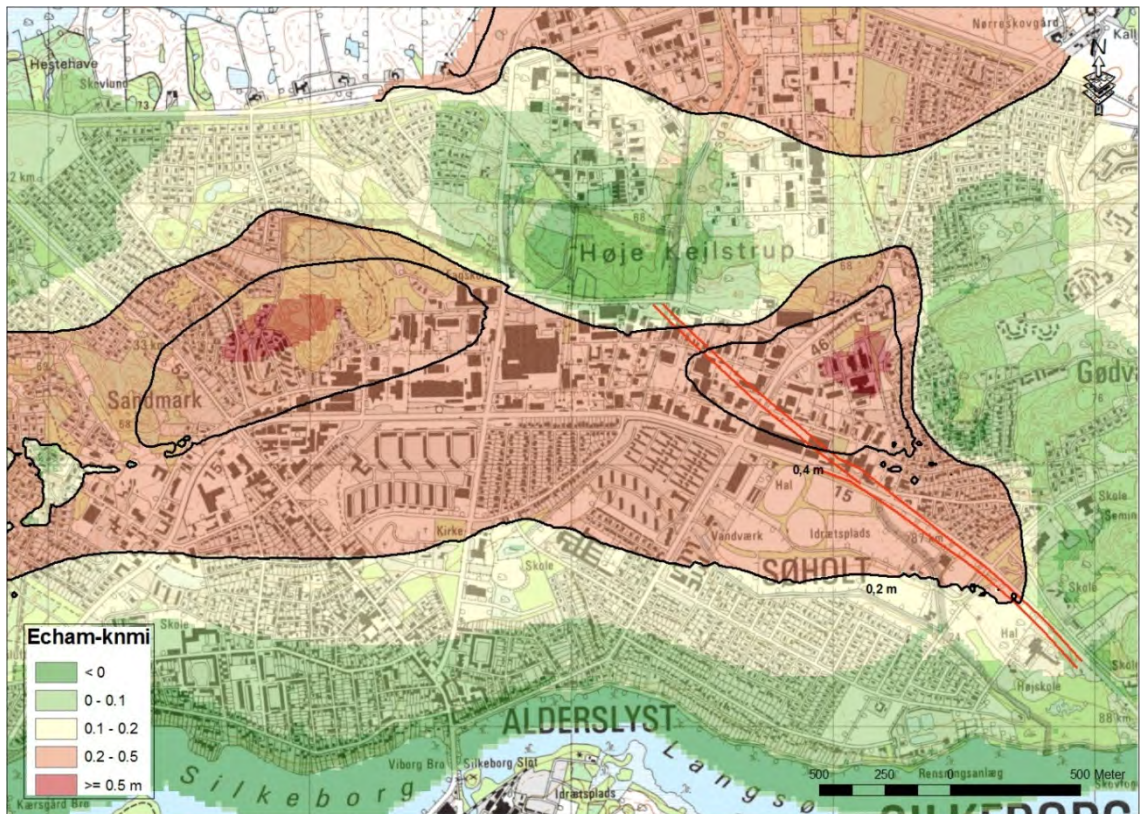
Alle resultater præsenteres for approksimative 100x40 meter zoner (Figur B5-4), der følger projektet stationeringen, og derfor svarer til de enheder der arbejdes med i motorvej projekteringen. Inden for hver zone er grundvandspotentialiet midlet for lag 2 i modellen, hvilket svarer til bunden af terrasse magasinet ved Søholt og det øvre kvartære magasin ved Dyrehaven. Ved at tage middelværdien af simuleret grundvands potentialiet for de celler (ca. 10) der ligger inden for de enkelte zoner, mister man noget variation, men modelleringsresultatet bliver mere robust.



Figur B5-4 Zone placering og – nummerering

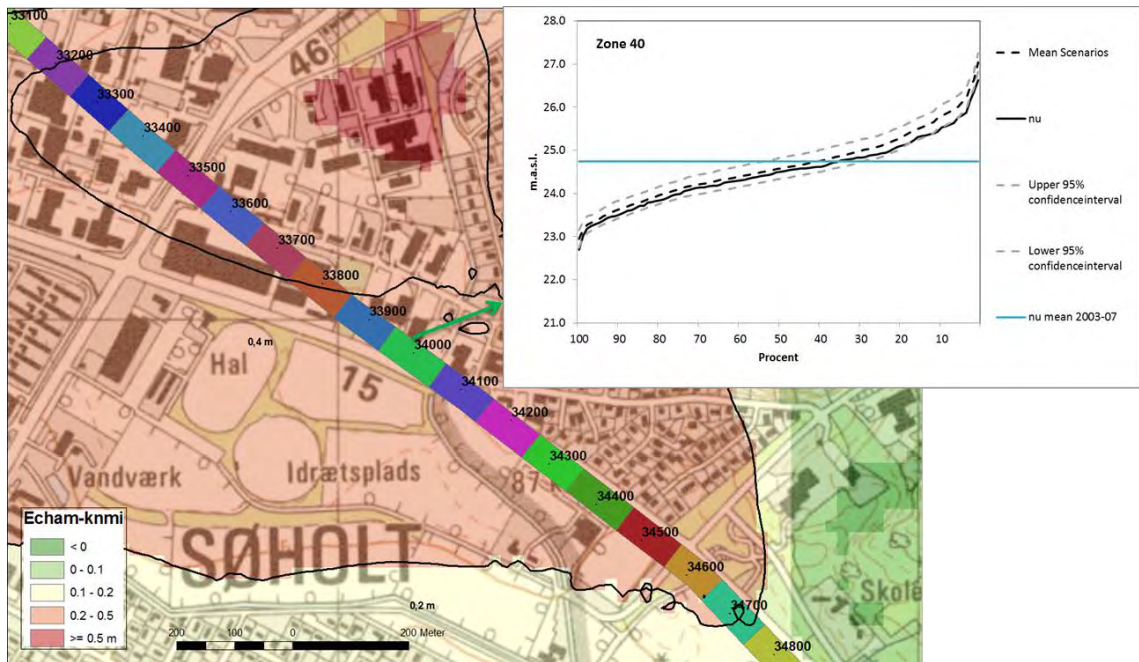
Resultater

For at skabe et overblik over hvor meget middelændringen varierer på tværs af området, så er der udvalgt et af 11 scenarier i ENSEMBLES. Med klimadata fra dette scenarie (echam-kmni) er middelværdien af den simulerede grundvandsstand for lag 2 (øvre kvartære magasin og terrasse magasin) for perioden 2081-2100 beregnet. Denne er fratrukket middelværdien af den simulerede grundvandsstand for reference perioden 1991-2010. Scenariet, der er udgangspunkt for figuren, ligger nogenlunde i midten af ENSEMBLES model beregningerne. Det ses af Figur B5-5, at de største middelændringer er at finde i de flade dele af området, hvor disse ligger i umiddelbart nærhed af stejle topografiske gradienter. Største delen af motorvejs transektet har en middelændring på 0,2 – 0,5 meter.

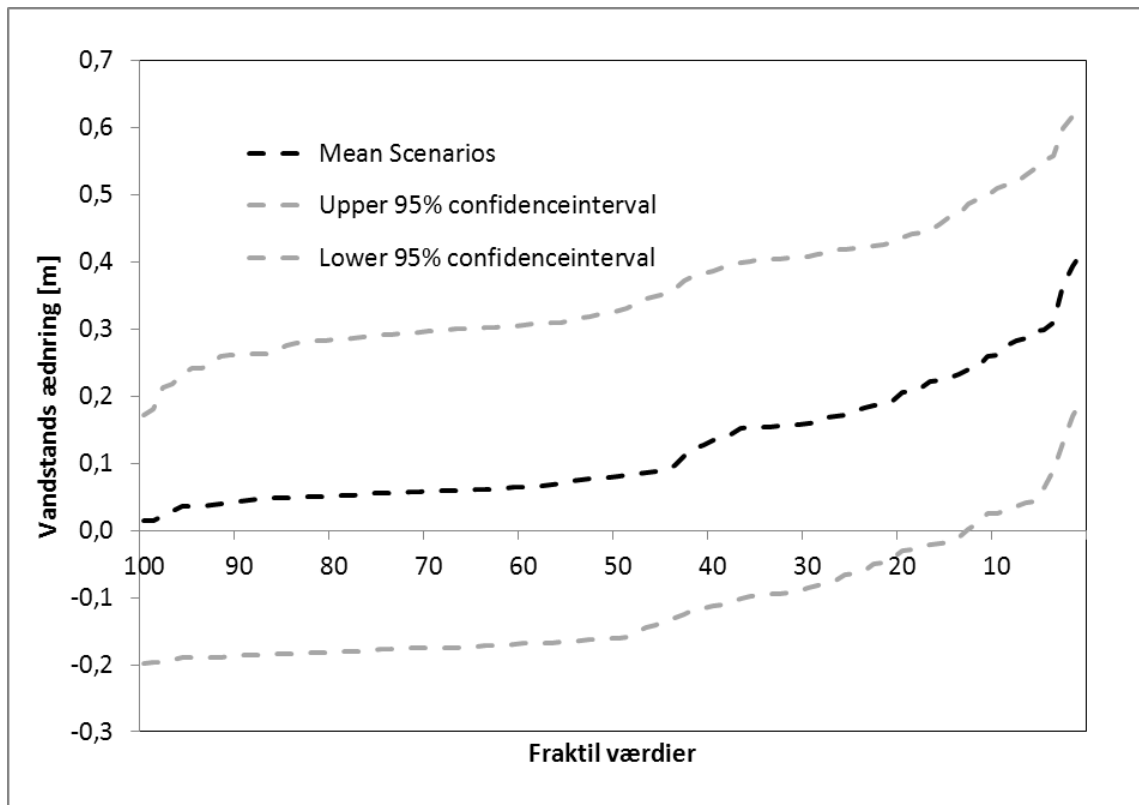


Figur B5-5 Middelvandstand ændringer (middel af vandstand 2081-2100 minus middel af vandstand 1991-2010) for ét ENSAMBLE scenarie

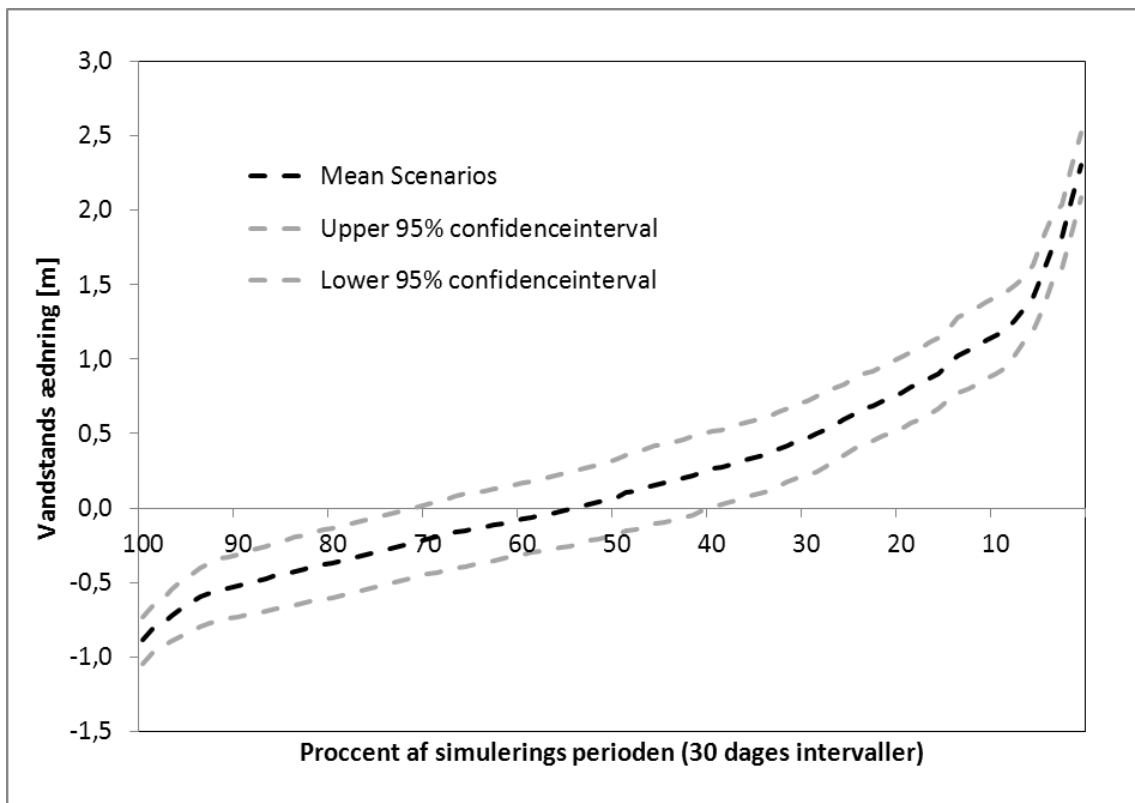
For hver af zonerne er der udregnet varighedskurver (Figur B5-6) hvor x-aksen angiver procent af tiden hvor grundvandsstanden er højere end værdien aflæst på y-aksen. Dette er udregnet for alle 11 scenarier hvorefter middel og 95% konfidensintervaller er udregnet og plottet mod reference situationen og middelværdien af reference situationen (svarende til den grundvandsstand Cowi anvender i deres detalje model). Tilsvarende er der udregnet kurver (Figur B5-7) hvor middel af scenarierne (mean scenario) er fratrukket reference scenariet (nu) pr. fraktil værdi, dvs. gjort relativ i forhold til nuværende situation, og der er udregnet kurver (Figur B5-8) for hvor middel af scenarierne er fratrukket middel af reference situationen (nu), dvs. hvor kurverne er gjort relativ i forhold til den grundvandsstand som Cowi anvender i deres detalje model. Der er relativ stor forskel på hvor kraftige ændringer der ses, hvilket skal tages som udtryk for at modellen forventer mere variation i trykniveau indenfor en 20 årsperiode end variation mellem de enkelte fraktil værdier.



Figur B5-6 Varighedskurve udregnet for zone 34000



Figur B5-7 Trykniveau ændring relativt i forhold til reference situation (zone 34000)



Figur B5-8 Trykniveau ændringer relativt i forhold til middel af reference periode (zone 34000)

Kurverne for alle zoner er opsummeret i tabelform, hvor 1%, 5% og 50% fraktilen er opgjort for middel og konfidensintervaller, dvs. hvor der er fokus på de høje grundvandsstande. Der er opgjort to tabeller, dels Tabel B5-1 svarende til Figur B5-7, dvs. de relative trykniveau ændringer i forhold til reference situationen, og dels Tabel B5-2 svarende til Figur B5-8, hvor trykniveau ændringerne er i forhold til middeltrykniveauet af reference situationen.

Tilsvarende figurerne afspejler tabellerne den store forskel der er på at sammenligne hændelser i forhold til at sammenligne ændringer fra middeltrykniveau, hvor systemets naturlige dynamik overlejer klimasignalet.

Tabel B5-1 Relativ trykniveau ændring for udvalgte fraktilværdier

Zone	Middel af scenarier			øvre95%			nedre95%		
	1% fraktil	5% fraktil	50% fraktil	1% fraktil	5% fraktil	50% fraktil	1% fraktil	5% fraktil	50% fraktil
33200	0,66	0,39	0,11	0,98	0,70	0,40	0,34	0,10	-0,15
33300	0,61	0,41	0,09	0,92	0,71	0,42	0,30	0,09	-0,22
33400	0,56	0,40	0,10	0,85	0,69	0,42	0,26	0,09	-0,22
33500	0,52	0,38	0,10	0,79	0,66	0,42	0,24	0,07	-0,21
33600	0,49	0,37	0,10	0,76	0,64	0,40	0,23	0,07	-0,20
33700	0,47	0,35	0,10	0,73	0,62	0,40	0,22	0,06	-0,20
33800	0,45	0,33	0,09	0,70	0,60	0,37	0,21	0,05	-0,19
33900	0,43	0,32	0,08	0,66	0,58	0,35	0,20	0,05	-0,18
34000	0,41	0,30	0,08	0,63	0,55	0,33	0,20	0,06	-0,16
34100	0,41	0,29	0,07	0,62	0,51	0,30	0,20	0,08	-0,14
34200	0,42	0,27	0,06	0,63	0,48	0,28	0,22	0,08	-0,12
34300	0,45	0,27	0,07	0,65	0,48	0,26	0,24	0,09	-0,12
34400	0,45	0,27	0,06	0,67	0,47	0,24	0,24	0,07	-0,11
34500	0,47	0,29	0,05	0,69	0,46	0,22	0,25	0,09	-0,11
34600	0,48	0,30	0,04	0,69	0,47	0,21	0,27	0,12	-0,11
34700	0,47	0,28	0,04	0,67	0,44	0,19	0,27	0,10	-0,10
34800	0,47	0,28	0,03	0,67	0,44	0,16	0,28	0,13	-0,09

Tabel B5-2 Trykniveau ændring i forhold til middel af reference situationen for udvalgte fraktilværdier

Zone	Middel af scenarier			øvre95%			nedre95%		
	1% fraktil	5% fraktil	50% fraktil	1% fraktil	5% fraktil	50% fraktil	1% fraktil	5% fraktil	50% fraktil
33200	3,02	1,97	0,08	3,34	2,29	0,37	2,70	1,66	-0,22
33300	3,00	2,03	0,09	3,31	2,33	0,42	2,69	1,73	-0,25
33400	2,87	1,98	0,09	3,17	2,26	0,42	2,58	1,70	-0,23
33500	2,75	1,91	0,10	3,03	2,18	0,41	2,47	1,64	-0,22
33600	2,67	1,85	0,10	2,94	2,11	0,40	2,40	1,59	-0,21
33700	2,59	1,79	0,10	2,84	2,04	0,39	2,33	1,54	-0,20
33800	2,49	1,72	0,09	2,74	1,96	0,37	2,25	1,48	-0,19
33900	2,40	1,65	0,08	2,63	1,89	0,35	2,16	1,41	-0,19
34000	2,30	1,57	0,08	2,52	1,81	0,33	2,08	1,34	-0,18
34100	2,22	1,51	0,07	2,43	1,74	0,32	2,01	1,28	-0,17
34200	2,15	1,45	0,06	2,36	1,66	0,28	1,95	1,24	-0,16
34300	2,12	1,41	0,05	2,32	1,60	0,25	1,91	1,22	-0,15
34400	2,11	1,38	0,03	2,32	1,56	0,22	1,90	1,20	-0,15
34500	2,15	1,37	0,02	2,36	1,54	0,19	1,93	1,20	-0,15
34600	2,17	1,36	0,01	2,39	1,52	0,17	1,96	1,19	-0,15
34700	2,14	1,33	0,00	2,34	1,49	0,15	1,94	1,17	-0,16
34800	2,08	1,27	-0,01	2,28	1,42	0,12	1,88	1,12	-0,14

Der er ikke gennemført en formaliseret ekstremværdi analyse for alle zonerne, men for to af zonerne (33500 og 34000) er der lavet en simple ekstremværdi analyse på baggrund af 30 dages hændelser for middel af scenarier, som via dels lognormal og dels Gumbel plot er fremskrevet til 100 års hændelser. De beregnede 100 års hændelserne viser en øget grundvandsstandsændring på 20 – 30% i forhold til 1% fraktilen når man ser på det rene klimabidrag (dvs, i

forhold til 1% fraktilen for middel af scenarier i Tabel B5-1), og 1-2 meter når der sammenlignes med 1% fraktilen for det kombinerede bidrag af klimaændringer og naturlig variation (dvs. i forhold til 1% fraktilen for middel af scenarier i Tabel B5-2).

Diskussion – forbehold for foreløbige resultater

Grundvands model resultaterne afspejler at der er forholdsvis stor forskel mellem klimafremskrivningerne for de enkelte ENSEMBLES klimamodeller. Dette kan tydeligst ses af Figur B5-7 og Tabel B5-1, hvor 95% konfidensintervallerne er brede i forhold til middelværdien er scenarierne. Tilsvarende tendens er observeret i andre projekter, der anvender ENSEMBLES resultater, og skal ses som udtryk for den betydelige model usikkerhed der ligger i de globale og regionale klimamodeller.

Det er væsentligt at fremhæve at resultaterne i denne note er foreløbige og vil blive forbedret i løbet af de kommende måneder. De tre væsentligste usikkerhedskilder i den sammenhæng er:

- **Delta Change Metoden.** Beregningerne er baseret på den såkaldte Delta Change Metode, som er en relativ simpel metode til at konvertere resultater fra klimamodeller til input til grundvandsmodeller. For nedbør er delta change koefficienterne således beregnet som ændringen i en klimamodellens simuleringer af middelnedbør i de enkelte måneder, f.eks. sammenligning af gennemsnitsnedbør for Januar for perioden 1991-2010 med 2081-2100. Herved ses der helt bort fra at nedbørsmønstret med antallet af nedbørsdage og fordelingen af nedbør på hændelser med høj og lav nedbørsintensitet også ændres. Delta Change Metoden vides fra andre studier at undervurdere ændringen i ekstremnedbør i forhold til flere andre korrektionsmetoder. For bedre at kunne vurdere betydningen heraf er vi i gang med at lave en anden korrektionsmetode (Histogram Equalization) hvor vi forventer at kunne have resultater parat snart. Vi forventer at Histogram Equalization Metoden vil resultere i højere værdier for klimændringens effekter på trykniveauer (Figur B5-7 og Tabel B5-1).
- **Grundvandsmodellen – geologi.** Som nævnt indledningsvis pågår der for tiden et arbejde med at forbedre det geologiske grundlag for modellen i området tæt på Silkeborg Langsø. Det vil kunne påvirke klimaeffekterne, men vil formodentlig kun have en relativt mindre betydning for områder uden for lokalområdet hvor arbejdet pågår. Der har primært været diskuteret to muligt geologiske ændringer. Dels en ændring af geologien under terrasse magasinet ved Søholt, således at der muligvis optræder et underliggende vandførende lag (i prækvartæret), hvilket vil både vil kunne bidrage positivt eller negativt med grundvandsbidrag til terrasse magasinet og hvilket både vil kunne bidrage positivt eller negativt til kontakten til Silkeborg Langsø og dermed dynamikken i området. Det er således ikke på nuværende grundlag muligt at vurdere påvirkningen i forhold til klimaeffekten. Dels er overgangen fra de højere liggende kvartære aflejringer til terrasse magasinet ved at blive undersøgt, og tilsvarende er det svært at vurdere klimaeffekten da ændringer i overgangen kan påvirke positivt som negativt.
- **Grundvandsmodellen – dynamik.** Grundvandsmodellen er indtil videre ikke blevet kalibreret eller testet mod dynamiske data såsom tidsserier af trykniveauer. Det skyldes at sådanne data ikke har været til rådighed for kalibreringen. Det er meget vigtigt at få testet modellens evne til at simulere tidsvariationer i trykniveauer og få de rigtige år-

sagssammenhænge (hvor meget af variationen stammer fra nedbørshændelser i lokalområdet og hvor meget skyldes vandspejlsvariationer i Silkeborg Langsø). En sådan analyse kræver modelrekalibreringer med anvendelse af pejledata, vandspejlsdata fra Langsøen og vandføringsmålinger fra de stationer Orbicon har etableret i området.

Anbefalinger

Den naturlige trykniveauvariation er i modelresultaterne ganske udtalte, men ikke nødvendigvis identisk med virkeligheden. Analysen af de indsamlede pejledata og model-rekalibreringer kan meget vel medføre ændringer for modelresultaterne specielt hvad angår Tabel B5-2, hvorfor denne skal anvendes med forbehold. Anvendes data fra Tabel B5-1 bør analyse suppleres med et element af hvilken naturlig variation i grundvandsstand der kan forventes langs transektet, som supplement til vurdering af basis niveauet i reference situationen.

Fraktilværdierne kan ikke direkte oversættes til ekstremværdi hændelser, selvom at 1% fraktilen nogenlunde svarer til den næststørste hændelse indenfor den beregnede 20 års periode. Sammenligningen med simple udregnede 100 års hændelser for to af zonerne viste 20-30% større ændringer end 1% fraktilen, om det samme gælder for alle zoner er ukendt om end det må anses for sandsynligt. Da der på nærværende tidspunkt ikke er foretaget en formaliseret ekstremværdi analyse af grundvandsstands beregningerne kan 1% fraktilen løst oversættes til en 10-20 års hændelse, ønskes der at tage hensyn til en 100 års hændelse kan et forsigtigt bud være at addere 20-30% på de relative ændringer (Tabel B5-1) eller 1-2 meter på ændringerne i forhold til middel vandstand (Tabel B5-2). Det skal bemærkes at fraktilværdierne og den simple ekstremværdi analyse er begge baseret på model beregnede grundvandsstande på perioder af 30 dages varighed, samt at følsomheden overfor valg af periodelængden, f.eks. 1, 5 og 10 dages perioder, ikke er undersøgt.

De beregnede konfidensintervallerne er ikke et udtryk for en risiko vurdering hvor usikkerhed omkring geologi og grundvandsmodel parametre er undersøgt, men skal ses som et kvalificeret bud på hvordan den usikkerhed der ligger i ENSEMBLES klimamodel beregninger overføres til grundvandsmodellen. For at imødekomme dette, bør der tages udgangspunkt i den øvre del af konfidensintervallet.