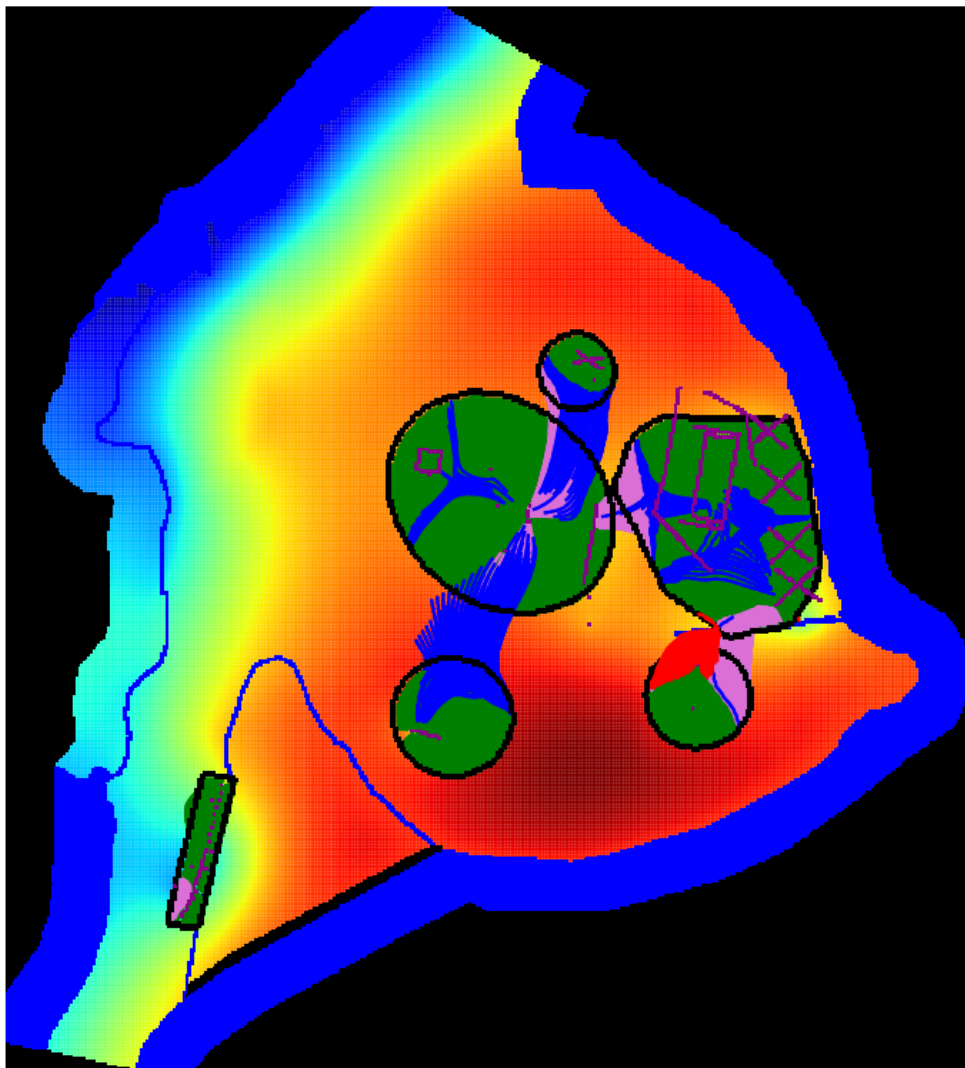


KLIMAÆNDRINGERS BETYDNING FOR GRUNDVANDSSTRØMMENE OG FORURENINGSTRUSLEN MOD NÆRMILJØET OMKRING RØNLAND FREM MOD ÅR 2100 - MODELLERING AF ET „WORST-CASE“ SCENARIO



Forfatter: Thomas Ljungberg
Redaktør: Søren M. Kristiansen
december - 2019

Forfatter: Thomas Ljungberg

Redaktion: Søren M. Kristiansen

Udgiver: Institut for Geoscience, Aarhus Universitet, Høegh-Guldbergs Gade 2, 8000 Aarhus C.
e-mail: geogeo.au.dk

Fagfælle-bedømt: Søren M. Kristiansen, Institut for Geoscience, Aarhus Universitet.

Forside illustration: Partikelbanesimulering for hotspot-områderne på Rønland og Cheminovas gamle fabriksgrund. Simuleringen dækker perioden år 2080-2100, hvor vandstanden i Nissum Bredning er øget med 1,16-1,70 m og nedbøren er omtrent uændret i forhold til nutiden.

Udgivelsesår: 2019

Forord

Denne rapport er udarbejdet på foranledning af en samarbejdsaftale med Region Midtjylland som opfølgning på en tidligere grundvandsmodel, som Institut for Geoscience har udarbejdet for Rønland.

Formålet med denne rapport er på en meget lokal skala, at belyse betydningen af ændringer i randbetingelserne for grundvandsstrømmene i et område, som pga. sin kystnære beliggenhed må forventes at være meget følsomt for fremtidige klimaændringer.

Baggrunden er, at undergrunden under FMC Site Rønland og Cheminovas gamle fabriksgrund på Harboøre Tange er forurenet med en række miljøfremmede stoffer efter produktionen af pesticider og herbicider. For at imødegå denne forurening og forhindre at den spredes til nærmiljøet, er der iværksat afværgeoppumpning af grundvand, som renses og derefter udledes til vandmiljøet. Afværgeoppumpningen her er flere gange blevet analyseret/optimeret ved hjælp af forskningsbaserede grundvandsmodeller fra Institut for Geoscience.

I projektet her er en eksisterende dynamisk grundvandsmodel blevet tilpasset, således at den kan simulere FN's RCP8.5 scenarie og DMI's øvre bud for de forventede havspejlsstigninger frem mod år 2100. Modellen er herefter brugt til at analysere de forventede klimaændringers betydning for grundvandsstrømmene og forureningstruslen de næste 80 år i et område, hvor der foregår en massiv oppumpning af grundvand.

Rapporten er fagligt kommenteret Søren Munch Kristiansen, Institut for Geoscience.

Hovedparten af rapporten og modelleringen er lavet, mens Thomas Ljungberg var ansat på Institut for Geoscience, men selve den afsluttende rapportskrivning, layout og kommentering er foregået siden september 2019 mens Thomas Ljungberg har været freelance ansat til denne opgave.

FMC Site Rønland takkes for at stille data om grundvandsstanden og oppumpningen i det modellerede område til rådighed. Jordforureningskontoret på Region Midtjylland takkes for at have bidraget med uvurderlig faglig sparring.

Region Midtjylland har afgrænset den faglige opgave, mens hverken Region Midtjylland eller FMC Corporation har haft indflydelse på rapportens faglige konklusioner.

Data til brug for tilpasningen af modellen er indkøbt af Region Midtjylland, og disse overdrages ved projektets afslutning til dem i original form. Disse data kan derfor senere anvendes til yderligere analyser, skulle et sådant behov opstå.

Søren Munch Kristiansen har været projektansvarlig og redaktør af denne rapport.

Aarhus, d. 13. december 2019.

Søren M. Kristiansen, lektor

Indledning

De igangværende, og ikke mindst de forventede kommende, klimaforandrings indvirkning på grundvandsstrømmene på Rønland og A/S Cheminovas gamle fabriksgrund på Harboøre Tange, rejser spørgsmålet om hvorvidt de eksisterende afværgeforanstaltninger i området også i fremtiden vil være tilstrækkelige til at forhindre forureningen i at spredes til recipienterne Nissum Bredning, Knopper Enge samt Thyborøn og Harboøre Fjorde.

Nærværende rapport omhandler beregning af de generelle grundvandsstrømme og grundvandsfluxen ud af området frem mod år 2100, ud fra hhv. IPCC's RCP8.5 scenarie og DMI's øvre bud for de forventede havniveaustigninger omkring Danmark. Ud over eventuelle generelle ændringer af grundvandsstrømmene vil også mere lokale ændringer omkring/fra de kendte „hotspot-områder“, og dermed transportvejene for hotspotforureningerne, blive analyseret.

Analyserne foretages ved hjælp af en tilpasset udgave af den dynamiske grundvandsmodel, som blev opstillet for området i forbindelse med specialeprojektet "Dynamiske grundvandsmodeller for Rønland og Cheminovas gamle fabriksgrund"[Ljungberg, 2016a]. Ved afslutningen af specialeprojektet havde modellen problemer med at eftergøre observationer af trykniveauet på især den centrale del af Rønland, ligesom kalibreringen af modellen gav hydrauliske ledningsevner for nogle af de hydrostratigrafiske enheder, som ikke var i overensstemmelse med tidligere opstillede modeller og almindelig geologisk erfaring, hvorfor den efterfølgende er blevet justeret. Grundlaget for modellen - den geologiske model og den hydrogeologiske tolkningsmodel - samt modellen og justeringer af den er beskrevet i Hansen [2004], Ljungberg [2016b], Ljungberg [2016a] og Ljungberg [2017b], hvortil der henvises for en udførlig gennemgang af disse. I denne rapport gennemgås således kun de ændringer af modellen, som er foretaget i forbindelse med dette projekt.

Metoder og data

Analyserne gennemføres ved brug af programmet „FloPy“ [Bakker et al., 2016], som er et Python scripting interface til MODFLOW modelkoden fra US Geological Survey [US Geological Survey, 2019]. Desuden er programmet QGIS [QGIS Development Team, 2019] anvendt til fremstilling af kort samt håndtering af nogle af de geospatielle data.

Til brug for beregning af nedsivningen har Danmarks Meteorologiske Institut udvalgt tre CORDEX¹ modeller, som viser hhv. en lav, middel og høj nedbørsændring fra perioden 1970-2000 til 2070-2100 (bilag A.2 på side 36). Fra hver af disse tre modellers simulering af nedbør, temperatur og globalindstråling er den potentielle evapotranspiration beregnet, hvorefter nedsivningen for hver af modellerne er beregnet ved hjælp af programmet „ECPY“ [Christensen, 2016]. DMI's oceangruppe har desuden leveret et ekspertestimat af den forventede maksimale havniveaustigning ved den jyske vestkyst frem mod år 2100 (bilag A.1 på side 33)

¹CORDEX er et WCRP (World Climate Research Programme) sponsoreret program, som kan generere regionale scenarier for de globale klimaændringer.

Indholdsfortegnelse

Kapitel 1 Tilpasning af modellen	1
1.1 Rumlig diskretisering	1
1.1.1 Strukturelle ændringer	1
1.1.2 Afværgeforanstaltninger	3
1.2 Tidslig diskretisering	3
1.2.1 „Kendt trykniveau“ randbetingelser	3
1.2.2 Oppumpning	5
1.2.3 Nedsivning	6
1.3 Validering af modellen	7
1.3.1 Vandstand i Nissum Bredning og den inddæmmede sø	7
1.3.2 Opfyldning af havnesedimentdepotet og etablering af grøft	9
1.3.3 Sammenligning af oprindelig model og CORDEX middel	10
Kapitel 2 Resultater	13
2.1 Overordnede grundvandsstrømme og flux ud af området	13
2.1.1 2020'erne	13
2.1.2 2060'erne	15
2.1.3 2090'erne	17
2.2 Hotspotområderne	19
2.2.1 2010-2030	20
2.2.2 2050-2070	23
2.2.3 2080-2100	26
Kapitel 3 Sammenfatning	29
Referencer	31
Bilag	32
Bilag A Dataleverance fra DMI	33
A.1 Havniveau	33
A.2 DMI's beskrivelse af klimadata	36

1 Tilpasning af modellen

Som udgangspunkt for dette projekt er valgt den 6-lags model, som blev brugt i projektet „Analyse af transporttider og -veje for hotspotforureningerne på Rønland og Cheminovas gamle fabriksgrund“ [Ljungberg, 2017a], med havnesedimentdepotet opfyldt og med grøft hele vejen rundt om depotet. I det følgende beskrives de strukturelle og tidslige ændringer, der er foretaget af modellen i forbindelse med dette projekt.

1.1 Rumlig diskretisering

1.1.1 Strukturelle ændringer

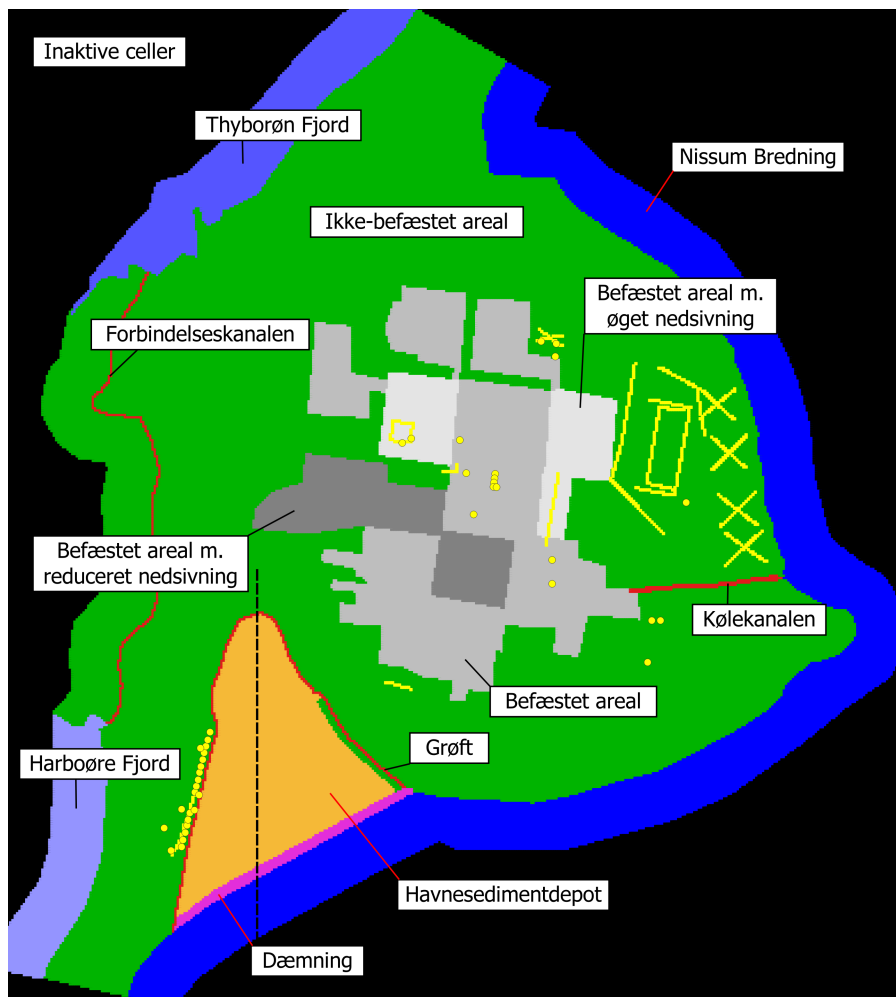
Der er kun foretaget ganske få, og små, ændringer af den rumlige diskretisering af modellen. De fleste af disse ændringer er sket i forbindelse med at den rumlige diskretisering, f.eks. opdelingen af modellen i zoner med forskellige randbetingelser og udpegningen af hvilke modelceller, der skal repræsentere dræn, er flyttet fra det kommercielle program „Groundwater Vistas“ til open-source programmet „QGIS“. Denne flytning er dels sket af tidsøkonomiske hensyn, og dels for at opnå en tættere sammenknytning mellem den numeriske grundvandsmodel og de geospatielle data den simulerer og bygger på.

Den tættere sammenknytning med et dedikeret GIS-program har tilladt en mere præcis digitalisering, hvilket har medført mindre ændringer i det horisontale plan af kystlinjens forløb omkring kølevandskanalens udløb, samt af havnesedimentdepotet og grøften omkring det.

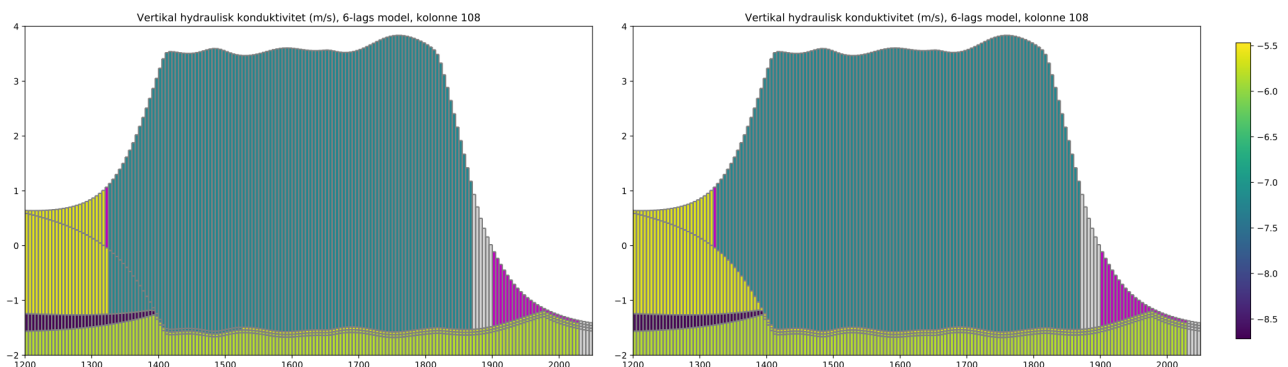
I det vertikale plan er der kun ændret på modellen et enkelt sted, nemlig ved den allerede opfyldte del af havnesedimentdepotets nordlige ende. I den oprindelige 5-lags model, som 6-lags modellen er en videreudvikling af, var den opfyldte del af depotet repræsenteret ved en reduceret hydraulisk ledningsevne af det øverste lag i modellen. For at simulere en situation, hvor depotet er helt fyldt op, blev modellen tilføjet en konturering af toppen af det øverste lag, hvor der i den endnu ikke opfyldte del af depotet var tilføjet en række kunstigt forhøjede punkter. Herefter blev kontureringen af den tidligere top (som altså nu udgør bunden af det øverste lag) justeret, således at det nye øverste lag overalt var minimum 5 cm tykt, og laget blev, undtaget i den ikke opfyldte del af depotet, tildelt samme hydrauliske parametre som det næstøverste lag. I den ikke opfyldte del af depotet blev laget tildelt samme hydrauliske parametre som den allerede opfyldte del.

Ovennævnte fremgangsmåde medførte at sedimentdepotets nordlige ende i modellen repræsenteres af to lag, og dermed er i direkte kontakt med det tredje-øverste lag, som repræsenterer det tynde indskudte lerlag. Denne situation vurderes ikke at være i overensstemmelse med virkeligheden, da havnesedimentet er udlagt ovenpå den eksisterende strandaflejring, og det er derfor i dette projekt valgt kun at have depotet repræsenteret i modellens øverste lag. Ændringen medfører dels at depotets tykkelse i den nordlige ende gradvist øges i sydlig retning, dels at det overalt underlejres af et lag med relativt høj hydraulisk ledningsevne. På figur 1 på den følgende side ses det diskretiserede område inkl. placeringen af afværgeforanstaltninger og et nord-syd profil gennem havnesedimentdepotet, mens figur 2 på næste side viser profilet gennem depotet før og efter den omtalte ændring.

Da sedimentdepotet i dette projekt omkranses af grøften, hvor trykniveauet modelleres som en kendt randbetingelse, ventes ændringen kun at få væsentlig betydning for trykniveauet i den nordlige del af depotet



Figur 1: Det diskretiserede område. Gule markeringer angiver placeringen af afværgeforanstaltninger. Den stiplede sorte linje angiver placeringen af et nord-syd profil gennem havnesedimentdepotet (figur 2).



Figur 2: Nord-syd profil af havnesedimentdepotet. Til venstre ses situationen før ændringen af modellen, til højre situationen efter. Bortset fra grå, som er inaktive celler, og magenta, som angiver en „kendt trykniveau“ randbetingelse viser farverne den vertikale hydrauliske ledningsevne. Bemærk at der er ca. 80 gange overhøjning på figuren.

1.1.2 Afværgeforanstaltninger

Flytningen af dele af modellen til QGIS har også medført at det var nødvendigt at lave en ny digitalisering af de dræn, som indgår i afværgeforanstaltningerne. Dette kan i teorien have (men har ikke nødvendigvis) medført små ændringer i drænenes horisontale udstrækning. Disse ændringer er dog så små at de ikke forventes at have betydning for resultatet af modelleringen, og nævnes derfor kun for fuldstændighedens skyld.

Udover eventuelle mindre ændringer af drænenes udstrækning er de eneste ændringer i afværgeforanstaltningerne, at der er tilføjet syv nye pumpeboringer, som er etableret siden 6-lags modellen blev opstillet i 2017. De fem af disse boringer er placeret i en L-form ved IPE-tankanlægget i den centrale del af produktionsområdet, og er alle filtersat i ca. 4-9 m's dybde. De øvrige to boringer, som er kommet til, er ifølge statusrapporten fra 2018 [FMC, 2019] placeret sydøst for Regnvandsbassin 2. Ved dette projekts udførelse var den præcise placering af boringerne ikke kendt af nærværende projekt, og de er derfor blot indlagt i modellen tæt ved den sydøstlige side af regnvandsbassinet.

Den helt nøjagtige placering af disse boringer vurderes ikke at have ret stor betydning for grundvandsstrømmenes retning, da de er placeret forholdsvis tæt ved det sted, hvor grundvandspejlet har sit højeste punkt, og dermed forventes at trække vand fra et omtrent cirkulært område. En mindre forskydning af dette område ventes ikke at have ret stor indvirkning på hvorvidt afværgeren er i stand til at afskære grundvandsstrømmen fra hotspotområderne, men dette kan dog hverken be- eller afkræftes uden kendskab til boringernes nøjagtige placering.

1.2 Tidlig diskretisering

Da modellen i dette projekt skal simulere en væsentlig længere periode end tidligere, og randbetingelserne ændrer sig gennem hele perioden, har det af beregningsmæssige hensyn været nødvendigt at bruge en længere stress-periode (det „tids-skridt“ modellen tager mellem hver opdatering af randbetingelserne) end tidligere. Det er valgt at sætte længden af stress-perioderne til 1 uge (7 døgn), idet denne varighed reducerer det nødvendige antal beregninger til $\frac{1}{7}$, men dog stadig tillader en høj grad af dynamik i randbetingelserne. Modellen løber fra 1/1-1989 til udgangen af år 2100, og indledes med en stationær stress-periode, hvilket i alt giver 5843 stress-perioder.

I det følgende gennemgås hvorledes de tidsvarierende data er tilpasset til stress-periode længden og de forventede klimaforandringer.

1.2.1 „Kendt trykniveau“ randbetingelser

Bortset fra havnesedimentdepotet er zonerne defineret som kendt trykniveau randbetingelser (figur 1 på forrige side) de samme som i den oprindelige model. De forventede klimaforandringer får dog forskellig betydning for disse zoner, som derfor gennemgås i mindre „grupper“.

Havnesedimentdepotet frembyder den specielle udfordring, at det i grundvandsmodellen ikke er muligt at ændre en modelcelles status fra „kendt trykniveau“ til „aktiv“², og depotet modelleres derfor som værende opfyldt helt fra modellens start. Dette har desuden den tolkningsmæssige fordel, at eventuelle ændringer af grundvandsstrømmene omkring depotet vil skyldes klimaforandringerne alene.

²dvs. en celle hvor trykniveauet beregnes af modellen

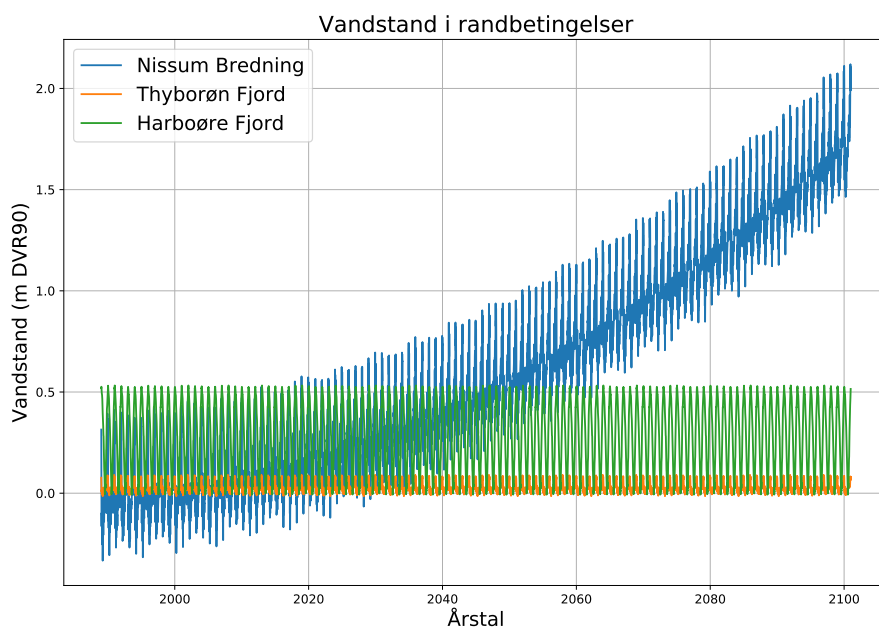
Nissum Bredning og grøften ved havnesedimentdepotet

DMI's øvre bud for havniveaustigningen langs den jyske vestkyst frem mod år 2100 er 1,7 m (bilag A.1 på side 33, Grinsted et al. [2015]) som følge af en konstant accelererende stigning, og da Nissum Bredning står i åben forbindelse med Vesterhavet, antages det at vandstanden i bredningen vil stige med samme rate som i havet.

Ud fra vandstandstidsserien fra den oprindelige grundvandsmodel [Ljungberg, 2016a,b] er der konstrueret et „gennemsnitsår“ ved at beregne den gennemsnitlige vandstand for hver enkelt dag i et 366-dages år. Dette gennemsnitsår gentages gennem hele modelperioden, med dagligt tillæg af en konstant accelererende funktion, som har værdien 0 i år 2000 og 1,7 i år 2100. Endelig er den herved fremkomne tidsserie justeret så den har middelværdi 0 i 1990. Fra denne tidsserie er den gennemsnitlige vandstand i hver 7-dages stress-periode beregnet og anvendt som vandstand i modellen. Grøften rundt om havnesedimentdepotet (Grøften) tildeles samme trykniveau som Nissum Bredning, da de står i åben forbindelse med hinanden.

Lagunesøerne og forbindelseskanalen

Thyborøn Fjord, Harbøre Fjord og forbindelseskanalen mellem dem står i forbindelse med Nissum Bredning via en sluse i Thyborøn Havn, hvilket vil sige at vandstanden i søerne og kanalen til en vis grad kan kontrolleres uafhængigt af vandstanden i Nissum Bredning. Fra Naturstyrelsen oplyses det, at man fremover vil tilstræbe at opretholde samme vandstand i lagunesøerne som i dag [Aaser, 2019]. Tidsserien for vandstanden i lagunesøerne er derfor konstrueret ved at beregne et gennemsnitsår, på samme måde som for Nissum Bredning, og gentage dette gennem hele modelperioden. Den gennemsnitlige vandstand for hver 7-dages stress-periode er herefter beregnet og anvendt i modellen. Vandstanden i forbindelseskanalen modelleres til enhver tid som lineært varierende mellem de to lagunesøer. På figur 3 ses de konstruerede tidsserier for trykniveauet i Nissum Bredning, Thyborøn Fjord og Harbøre Fjord.



Figur 3: De konstruerede tidsserier for vandstanden i „kendt trykniveau“ randbetingelserne.

Kølevandskanalen

For kølevandskanalen antages det at der ikke sker ændringer i den nuværende situation, og den modelleres derfor med en vandstand på 0,4 m (DVR90) gennem hele modelperioden.

1.2.2 Oppumpning

Til dette projekt har FMC stillet oppumpningsdata for perioden 2009-2018 til rådighed. Af statusrapporten for 2018 [FMC, 2019] fremgår det at de to nye boringer ved Regnvandsbassin 2 ventes idriftsat i løbet af 2019, samt at pumperne i boringerne ved IPE tankanlægget af hensyn til rensningsanlægget kører med reduceret ydelse, men at ydelsen påregnes øget efterhånden som forureningen bliver rensset op. For at inkludere disse forhold i scenarieberegningerne er der til de registrerede oppumpningsdata tilføjet to „ekstra“ år. Da der i 2018 var en del problemer med pumpestop, tørpumpning af boringer/dræn o.lign., og det vurderes i statusrapporten fra 2018 at disse problemer til dels hænger sammen med den meget tørre sommer, er det valgt at basere pumperaterne i disse år på oppumpningen i 2017, men dog med flg. ændringer.

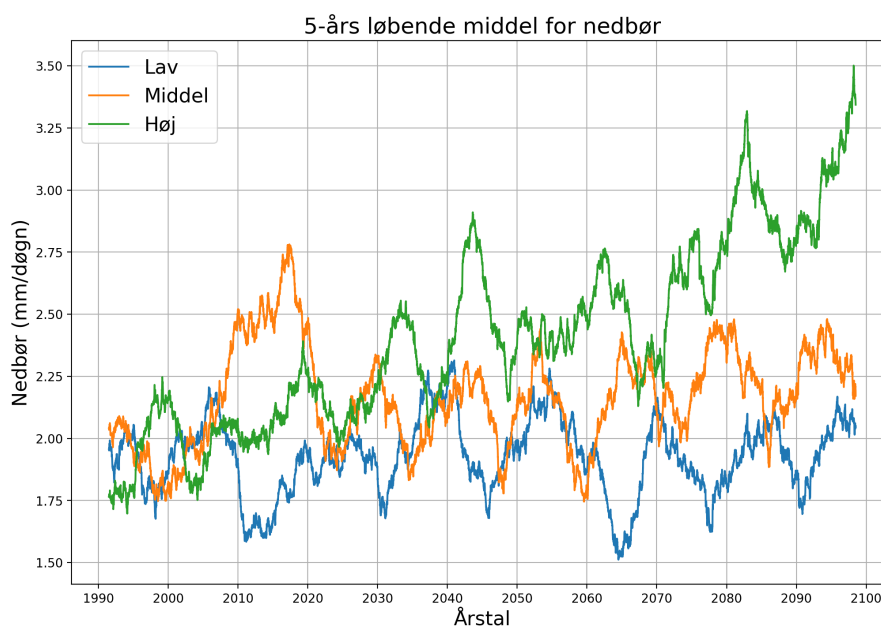
- Boringerne ved Regnvandsbassin 2 er tildelt en pumperate på 100 m³/måned hver [FMC, 2019], startende i juni 2019.
- For boringerne ved IPE tankanlægget oplyses det at de er igangsat i sidste halvdel af 2018, samt at de ved slutningen af året ydede 24 m³/døgn, svarende til 8760 m³/år, men at denne rate efter planen vil stige til 15000 m³/år, når forureningsgraden falder. I modellen starter oppumpningen fra disse boringer i november 2018 med en rate på 8760 m³/år, fordelt ligeligt mellem de fem boringer, og ved starten af 2020 øges pumperaten til de 15000 m³/år.
- Boringen G9F02 gik ud af drift i oktober 2018, og det er ikke længere muligt at pumpe fra den [FMC, 2019]. Denne boring er derfor ikke medtaget i de ekstra år.
- Startende i april 2018 øgede FMC oppumpningen fra Syddrænet betragteligt, og vil iflg. statusrapporten i 2020 genoverveje om afværgeforanstaltningerne i Sydområdet skal udbygges. For dette dræn er det derfor valgt at bruge den gennemsnitlige oppumpning for månederne april-december 2018 som pumperate for alle månederne i de to ekstra år.

Det skal desuden bemærkes at der i Skorstensområdet er tre boringer, af hvilke to er lavt-ydende (J8F01 og J8F02) og en er højt-ydende (J8F03). Den ene af de lavt-ydende har ikke været i drift siden slutningen af 2015, og sidst i 2018 blev den højt-ydende pludseligt meget lavt-ydende. Da det vides at FMC i øjeblikket planlægger reetablering/udbygning af afværger i Skorstensområdet, er det valgt at opretholde den høje ydelse fra 2017 for J8F03, for dog at have noget oppumpning i dette område i fremtidssceneriet.

Da oppumpningen i denne (delvist konstruerede) tidsserie er registreret på månedsbasis, og modellen skal bruge den på ugebasis, er den først beregnet på daglig basis ved at fordele den registrerede oppumpning ligeligt på hver dag i den respektive måned, hvorefter den gennemsnitlige oppumpning for hver 7-dages stress-periode er beregnet og anvendt i modellen. Før 2009/efter 2020 anvendes i modellen den gennemsnitlige oppumpning for hhv. hele 2009 og hele 2020.

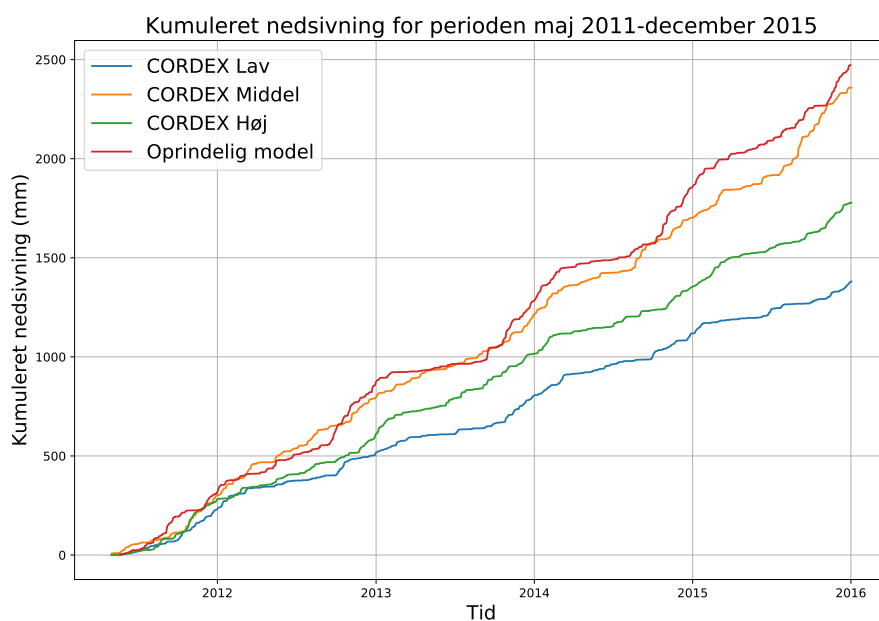
1.2.3 Nedsivning

Til brug for beregning af en tidsserie for nedsivningen i modelområdet har DMI fra CORDEX model-ensemblet udvalgt tre scenarier (herefter benævnt som „CORDEX lav“, „CORDEX middel“ og „CORDEX høj“), som ender med hhv. en lav, middel og høj ændring i nedbøren fra perioden 1970-2000 til 2070-2100, og fra hvert af disse scenarier hentet tidsserier for hhv. nedbør, temperatur og potentiel fordampning (DMI's beskrivelse af disse tidsserier findes i bilag A.2 på side 36). Figur 4 viser en 5-års løbende middel for nedbøren i hvert af de tre scenarier. På baggrund af disse klimatidsserier er der, ved hjælp af programmet „ECPY“ [Christensen, 2016; Olesen & Heidmann, 2002], beregnet en tidsserie for nedsivningen for hvert af de tre scenarier.



Figur 4: 5 års løbende middel for nedbøren i modelområdet. Bemærk at der, på grund af den løbende middel, mangler $2\frac{1}{2}$ år i hver ende af figuren.

Et interessant træk ved CORDEX middel er, at nedbøren i perioden 2008-2019 er betragteligt højere end i CORDEX høj, men herefter falder og ikke igen senere opnår samme niveau som i denne periode. Plottes nedsivningen beregnet på baggrund af CORDEX modellerne sammen med den beregnede nedsivning fra den oprindelige model, som på figur 5 på næste side, ses desuden at de to tidsserier ligger ret tæt på hinanden. Alle tilstandsvariable (dvs. oppumpning, nedsivning og trykniveau i randbetingelserne) for CORDEX middel scenariet i denne periode ligner således de tilsvarende i den oprindelige model. Dette scenarie kan dermed bruges som en kvalitativ validering af den ændrede diskretisering, ved at sammenholde modelresponsen med responsen fra den oprindelige model.



Figur 5: Kumuleret nedsvivning beregnet på baggrund af CORDEX modellerne plottet sammen med nedsvivningen fra den oprindelige model.

1.3 Validering af modellen

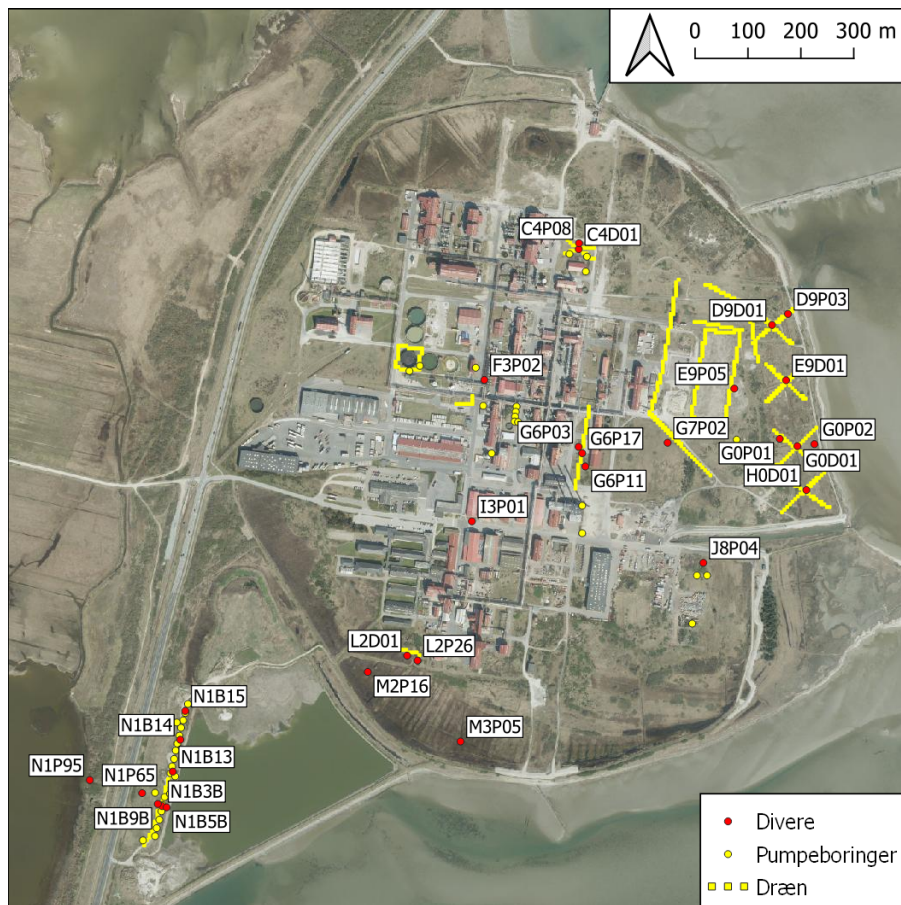
Som nævnt muliggør ligheden mellem CORDEX middel og de observerede klimadata i den oprindelige modelperiode en kvalitativ validering af den nye diskretisering af modellen. I dette afsnit sammenholdes derfor modelresponsen fra CORDEX middel med responsen fra den originale 5-lags grundvandsmodel [Ljungberg, 2017b] ved hjælp af udvalgte model- og divertidsserier. Figur 6 på den følgende side viser placeringen af divere og afværgeforanstaltninger i modelområdet.

De væsentligste ændringer af diskretiseringen i den nye model er opfyldningen af havnesedimentdepotet samt den længere stress periode, hvor brugen af den gennemsnitlige vandstand over en længere periode uvægerligt vil eliminere ekstreme begivenheder. Det må derfor forventes at de største forskelle mellem den oprindelige og den nye model vil ses på den gamle fabriksgrund og i Sydområdet, idet disse områder ligger umiddelbart op til begge randbetingelser. Inden CORDEX middel sammenholdes med den oprindelige model vurderes derfor først betydningen af de strukturelle ændringer af diskretiseringen, dvs. opfyldningen af depotet og etablering af grøften hele vejen rundt om det, ved at køre den oprindelige model med disse ændringer.

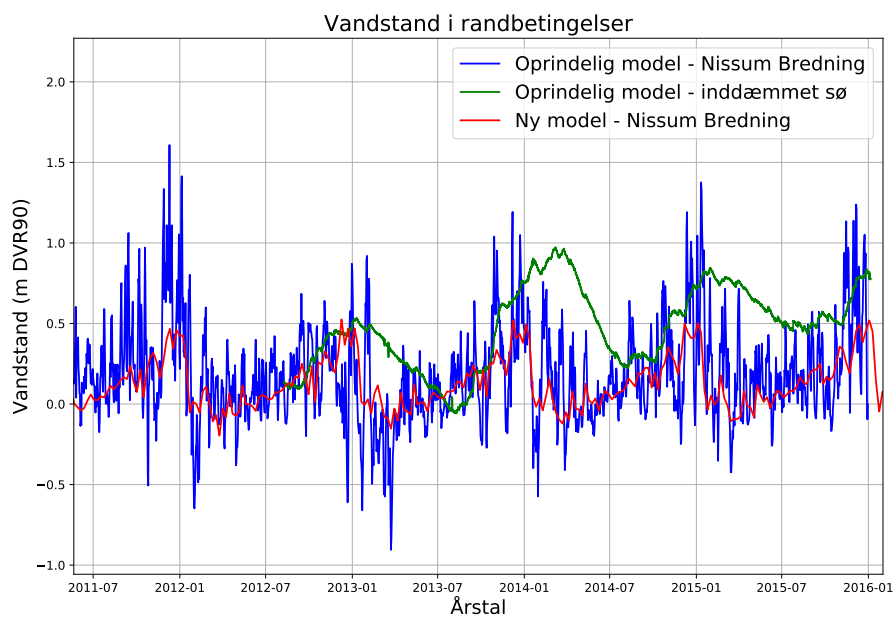
1.3.1 Vandstand i Nissum Bredning og den inddæmmede sø

På figur 7 på næste side ses vandstanden i Nissum Bredning og havnesedimentdepotet i den oprindelige model, samt vandstanden i Nissum Bredning i den nye model. Det ses tydeligt at brugen af gennemsnitsværdier for vandstanden i Nissum Bredning i den nye model har udglattet tidsserien betragteligt. Den gennemsnitlige vandstand i den nye model synes dog at harmonere fint med vandstanden i den oprindelige model, ligesom årstidsvariationen i tidsserien tydeligvis er bevaret.

Det ses endvidere at vandstanden i havnesedimentdepotet i den oprindelige model, er væsentligt højere end i Nissum Bredning. Da grøften i den nye model modelleres som værende etableret hele vejen rundt om depotet, og vandstanden i den er den samme som i Nissum Bredning, må det forventes at den nye model vil vise et lavere trykniveau i området omkring depotet end den oprindelige model.



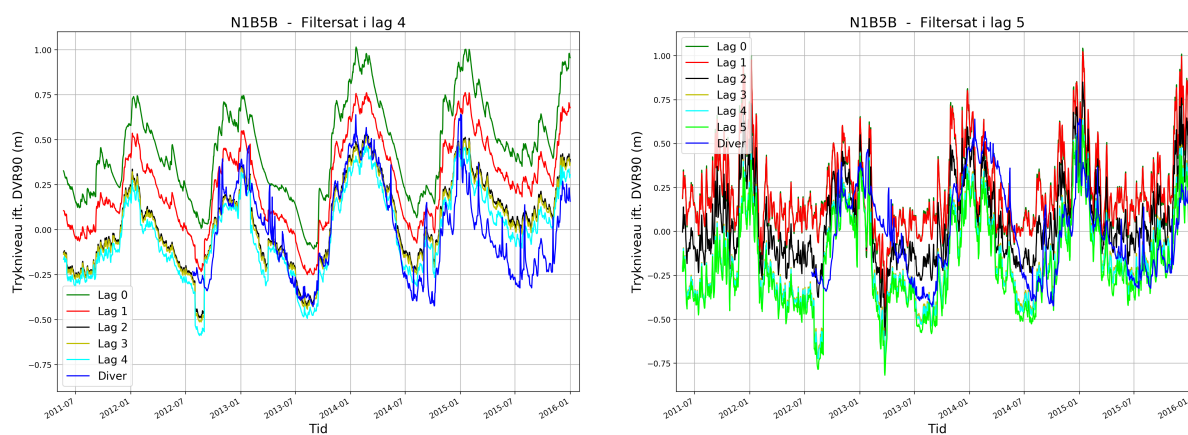
Figur 6: Placering af diverse og afværgeforanstaltninger.



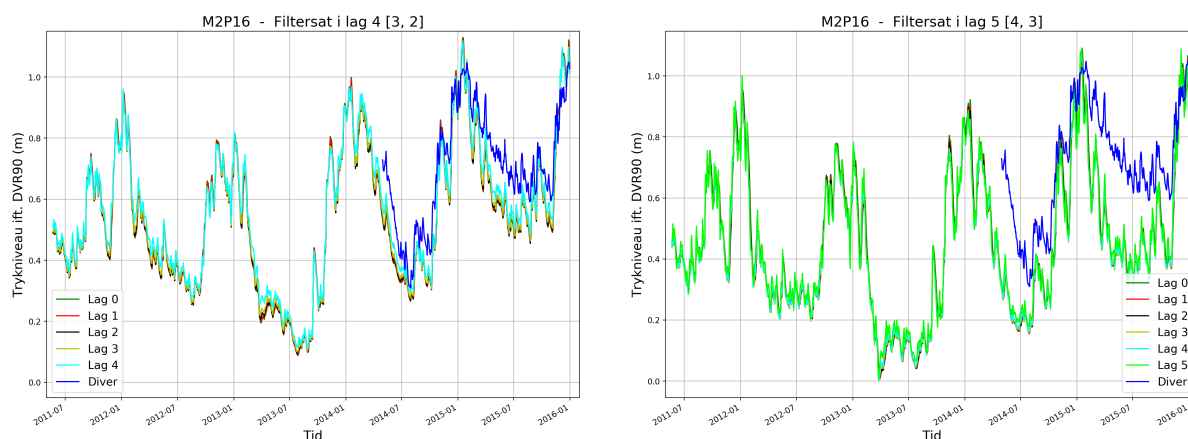
Figur 7: Vandstand i Nissum Bredning i hhv. den oprindelige og den nye model samt vandstand i havnesedimentdepotet.

1.3.2 Opfyldning af havnesedimentdepotet og etablering af grøft

På figur 8 og figur 9 ses modelresponsen ved diverne N1B5B og M2P16 for hhv. den oprindelige model og en model med havnesedimentdepotet fyldt op og grøften etableret hele vejen rundt om det; alle øvrige tilstandsvariable er identiske i de to modeller. Det ses af figurerne at modellen med opfyldt depot, som forventet, viser et lavere trykniveau her tæt ved depotet end den oprindelige model. Det ses endvidere at der, især på den gamle fabriksgrund, er blevet væsentlig større dynamik i trykniveauet, hvilket skyldes at vandstanden i den inddæmmede sø er langt mere stabil end i Nissum Bredning og grøften. Ved de øvrige diverne på den gamle fabriksgrund, samt ved diverne L2D01 og L2P26 er situationen nogenlunde den samme som ved de her viste, mens der ved M3P05 kun ses et ganske lille trykniveaufald. På resten af Rønland ses der ikke nogen ændring i trykniveauet som følge af opfyldningen af sedimentdepotet og etableringen af grøften. Da kilden til trykniveaufaldet er anbragt på „nedstrøms“ side af forureningen, og trykniveauændringen ved de nærmeste diverne i øvrigt ikke er ret stor, vurderes det at betydningen for grundvandsstrømmene er minimal, og at opfyldningen af depotet og etableringen af grøften dermed ikke vil påvirke modelresponsen nævneværdigt.



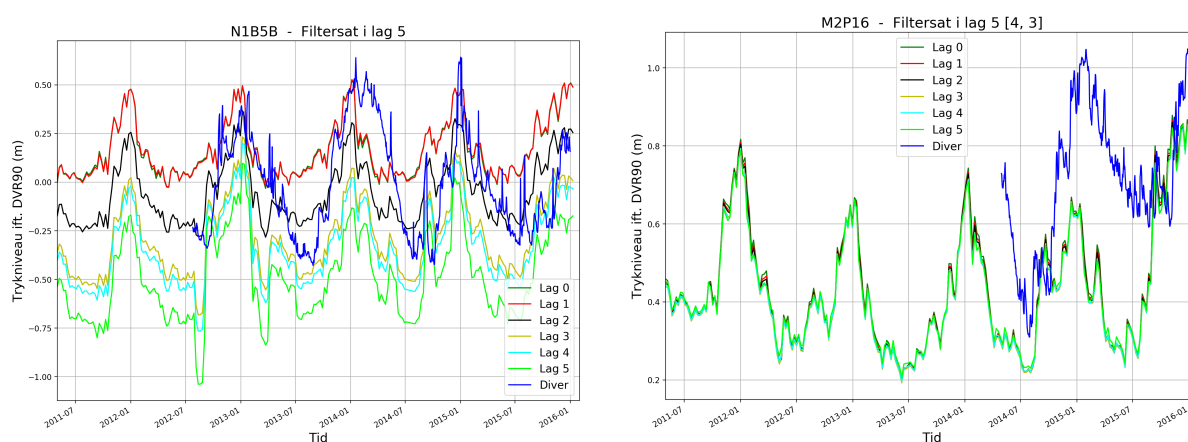
Figur 8: Modelrespons ved diveren N1B5B. Til højre ses responsen med den oprindelige model, til venstre responsen med havnesedimentdepotet fyldt op og grøften etableret hele vejen rundt om det.



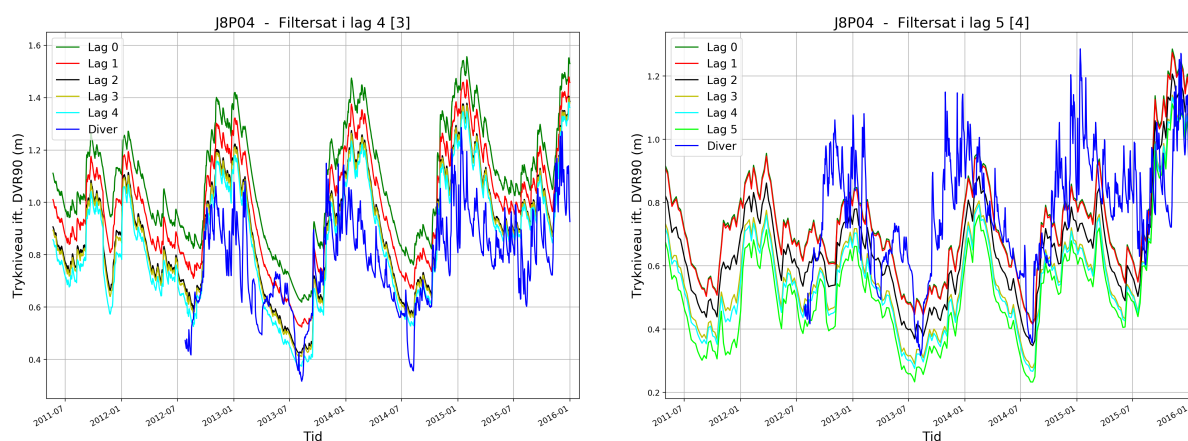
Figur 9: Modelrespons ved diveren M2P16. Til højre ses responsen med den oprindelige model, til venstre responsen med havnesedimentdepotet fyldt op og grøften etableret hele vejen rundt om det.

1.3.3 Sammenligning af oprindelig model og CORDEX middel

På figur 10 ses modelresponsen for CORDEX middel ved diverne N1B5B og M2P16, og på figur 11 til figur 15 på side 12 ses responsen for hhv. den oprindelige model og CORDEX middel for nogle udvalgte diver. Generelt ses det at responsen fra CORDEX middel er noget glattere end responsen fra den oprindelige model. Denne tendens, som især er tydelig ved de kystnære diver, skyldes den længere stress periode, og er dermed forventet. Det ses desuden at det modellerede trykniveau med CORDEX middel særligt om vinteren er lavere end med den oprindelige model, hvilket også skyldes den længere stress periode, der, som tidligere nævnt, har elimineret ekstreme vandstande. Da trykniveausænkningen er nogenlunde ens over hele modelområdet, og årstidsvariationen og trykniveauforskellen mellem lagene i modellen synes at være omtrent uændret, vurderes det at den ændrede diskretisering ikke vil påvirke grundvandsstrømmene i så høj grad at resultatet af de følgende scenarieberegninger bliver misvisende.

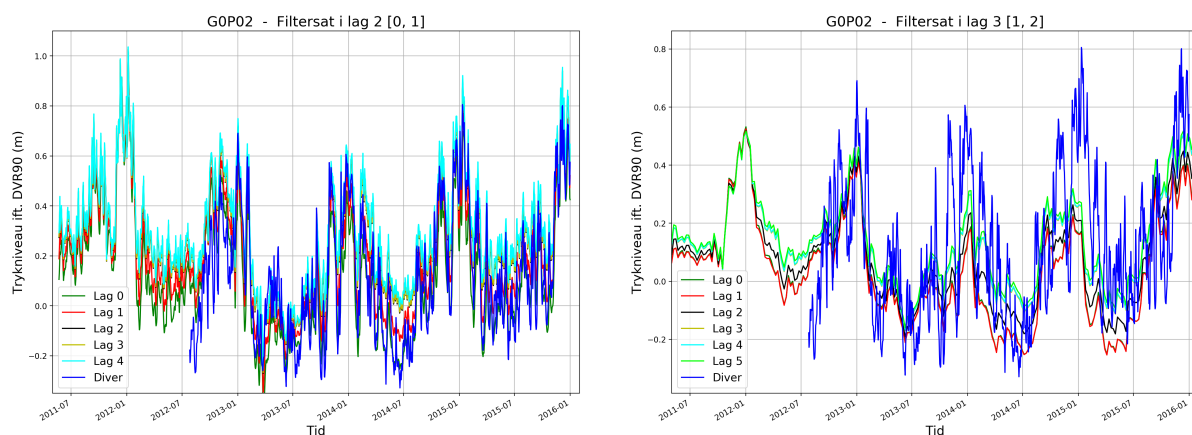


Figur 10: Modelrespons for CORDEX middel ved diverne N1B5B og M2P16. De tilsvarende tidsserier for den oprindelige model findes i venstre side af figur 8 på foregående side og figur 9 på forrige side.

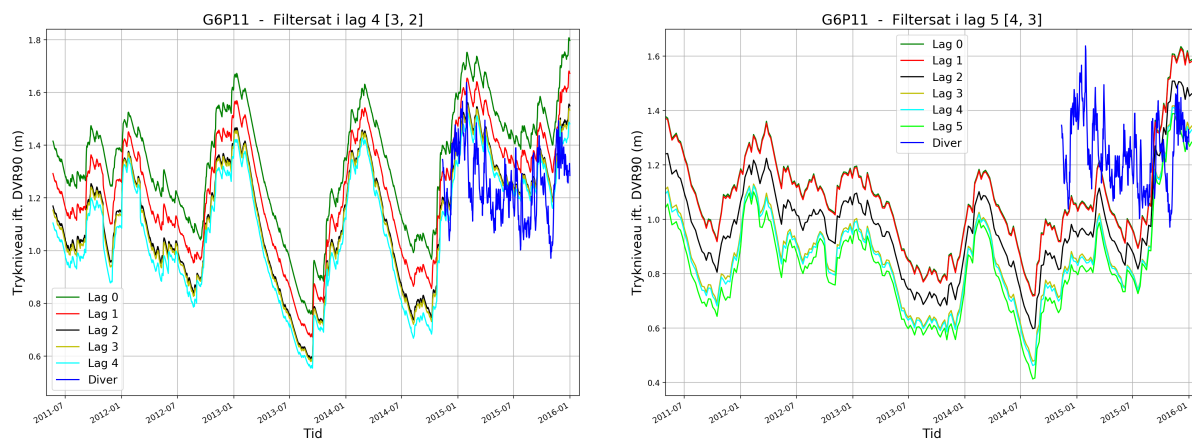


Figur 11: Modelrespons ved diveren J8P04. Til højre ses responsen med den oprindelige model, til venstre responsen fra CORDEX middel.

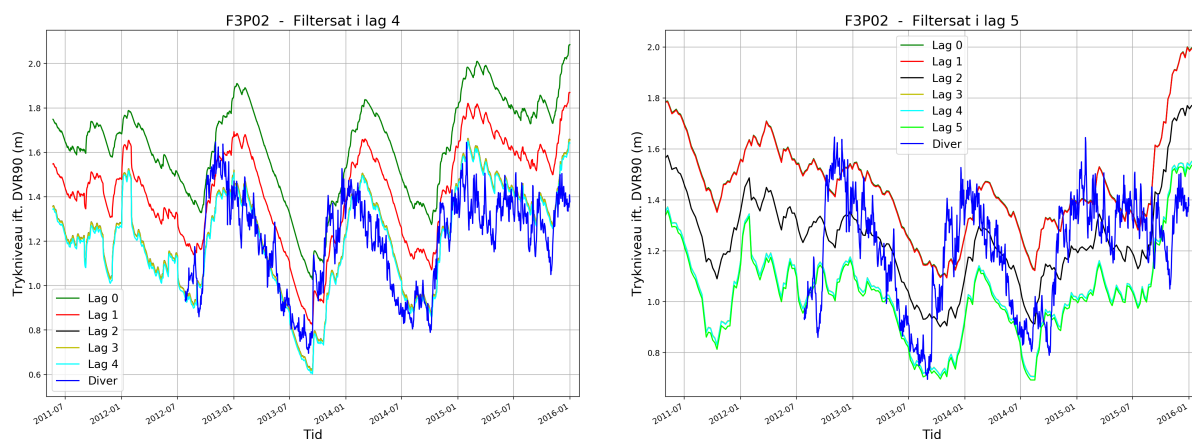
Sammenligning af oprindelig model og CORDEX middel



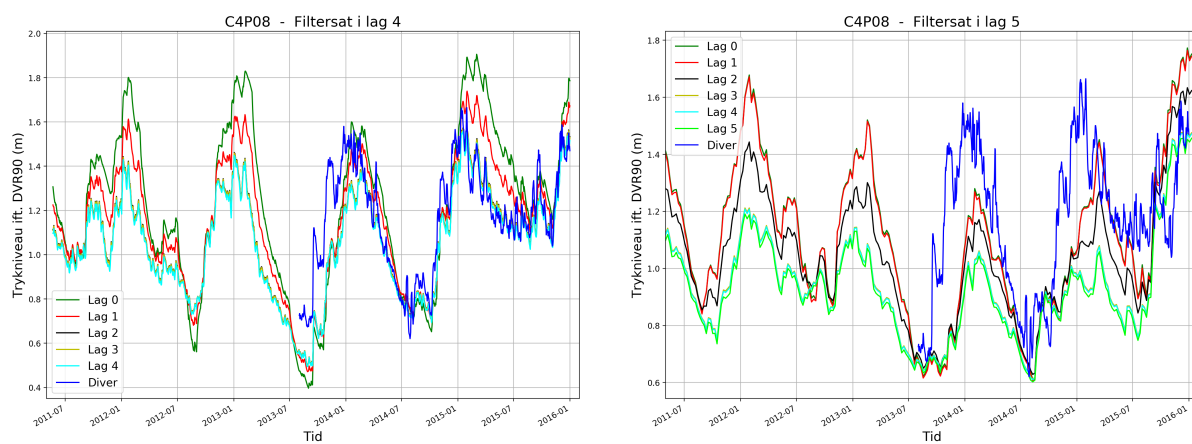
Figur 12: Modelrespons ved diveren G0P02. Til højre ses responsen med den oprindelige model, til venstre responsen fra CORDEX middel.



Figur 13: Modelrespons ved diveren G6P11. Til højre ses responsen med den oprindelige model, til venstre responsen fra CORDEX middel.



Figur 14: Modelrespons ved diveren F3P02. Til højre ses responsen med den oprindelige model, til venstre responsen fra CORDEX middel.



Figur 15: Modelrespons ved diveren C4P08. Til højre ses responsen med den oprindelige model, til venstre responsen fra CORDEX middel.

2 Resultater

I dette kapitel præsenteres resultaterne af scenarieberegningerne. Indledningsvis ses på de overordnede grundvandsstrømme samt fluxen ud af området, hvorefter der ses nærmere på de lokale grundvandsstrømme i/omkring de definerede hotspotområder [Ljungberg, 2017a]. For bedre at kunne relatere modellens respons på de tre CORDEX scenarier og det stigende havniveau, ses i tabel 1 den gennemsnitlige nedbør for årtierne mellem år 2000 og 2100 i de tre scenarier, samt ændringen i middel havniveau ved start og slut af årtierne.

Tabel 1: Havniveauændring (d_H) ift. år 2000 og gennemsnitlig årlig nedbør for årtierne mellem år 2000 og 2100.

Årti	CORDEX lav (mm)	CORDEX middel (mm)	CORDEX høj (mm)	d_H (m), start	d_H (m), slut
2000-2010	740	752	717	0,00	0,06
2010-2020	631	944	768	0,06	0,14
2020-2030	709	749	784	0,14	0,25
2030-2040	743	753	828	0,25	0,38
2040-2050	697	756	943	0,38	0,54
2050-2060	761	777	867	0,54	0,72
2060-2070	653	803	901	0,72	0,93
2070-2080	663	822	952	0,93	1,16
2080-2090	737	795	1094	1,16	1,42
2090-2100	717	846	1116	1,42	1,70

2.1 Overordnede grundvandsstrømme og flux ud af området

De overordnede grundvandsstrømme tolkes og præsenteres her ved hjælp af kort, som viser det gennemsnitlige trykniveau i det øverste lag på en farveskala, og grundvandets gennemsnitlige strømningensretning som vektorpile, for de tre årtier 2020-2030, 2060-2070 og 2090-2100. Farveskala og skalering af vektorpilene er ens på disse figurer, så disse kan sammenlignes direkte figurerne imellem.

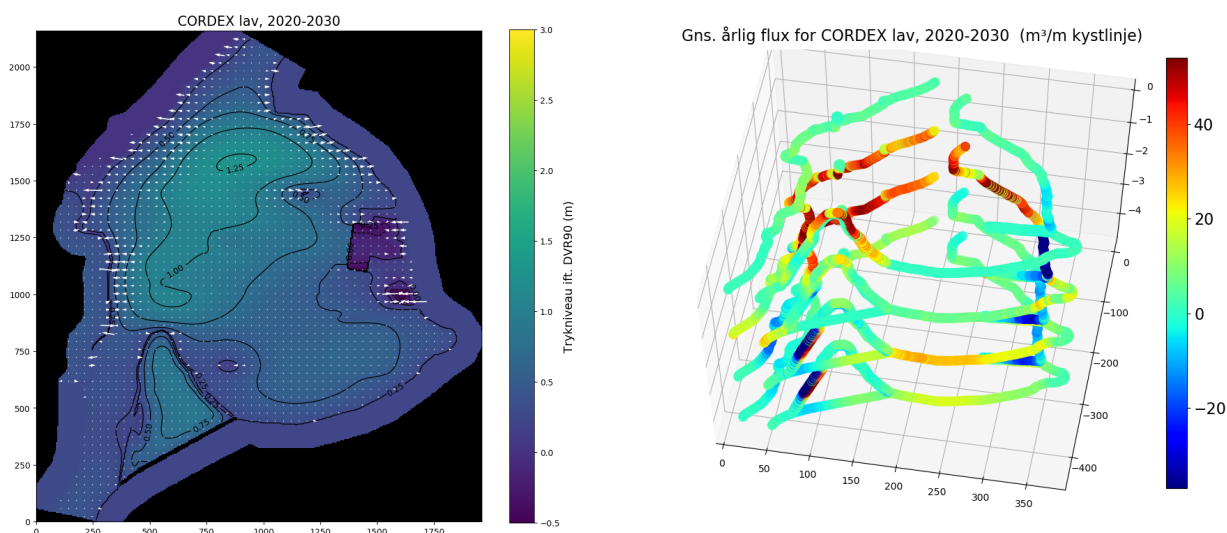
Fluxen ud af området visualiseres ved hjælp af 3D-figurer, hvor kystlinjen vises for lagene 0, 1, 3 og 5 - dvs. *ikke* for ler- og siltbåndet, da disse lag dels er meget tynde, dels har en meget lav hydraulisk ledningsevne. De viste lag er farvet iht. den gennemsnitlige årlige flux pr. meter kystlinje. På disse figurer er farveskalaen *ikke* fastholdt, men repræsenterer 2-98 % percentilen af den afbildede flux.

2.1.1 2020'erne

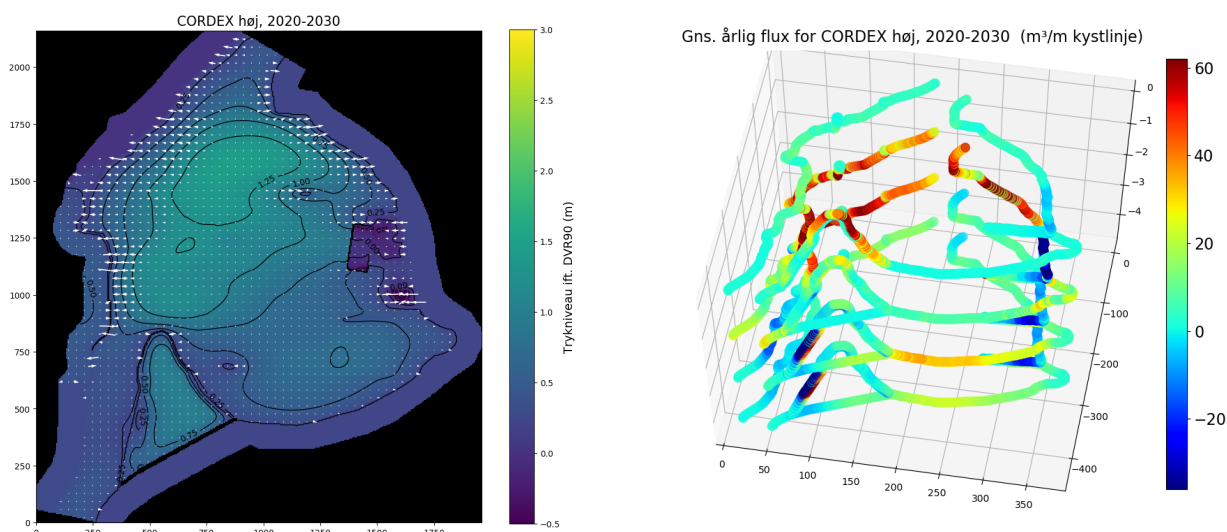
I dette årti er der kun ganske lidt forskel på de tre CORDEX modeller, hvilket tydeligt afspejles i de modellerede grundvandsstrømme og trykniveauer, som stort set er ens; derfor vises her kun CORDEX lav og høj.

Som det ses på figur 16 og 17 på side 15 findes det højeste gennemsnitlige trykniveau på den nordvestlige del af Rønland, hvorfra grundvandsskellet strækker sig ned mod den nordlige ende af

havnesedimentdepotet. Den overordnede grundvandsstrøm er således i østgående retning under stort set hele produktionsområdet, og der ses i de øverste lag en ret stor udstrømning til Nissum Bredning på den nordligste del af Rønland. I Østområdet skaber den massive oppumpning store sænkningstragter, og der ses derfor en vestlig strømning fra Nissum Bredning ind mod afværgeforanstaltningerne. I Syd- og Skorstensområdet er trykniveaugradienten meget lav, og det er derfor vanskeligt at se vektorpilenes retning, men sammenholdt med aftegningen af fluxen ud af området, antyder trykniveaunkonturerne at strømmingen i det meste af Sydområdet er mod Syddrænet, men at der dog er en vis udstrømning i de dybe lag under Rønlands sydkyst. Desuden ses der, i det øverste lag, en ret kraftig udstrømning til den nordligste del af grøften rundt om havnesedimentdepotet. I Skorstensområdet synes strømmingen at være østlig/sydøstlig, og der ses da også en ret svag udstrømning i de dybe lag under Rønlands sydøstlige kyst. På den gamle fabriksgrund ses der en tydelig sænkningstragt omkring afværgeforanstaltningerne, som sammen med den negative strømning i de dybe lag under Harboøre Fjords kyst antyder at afværgeren sandsynligvis trækker vand fra hele dette delområde.



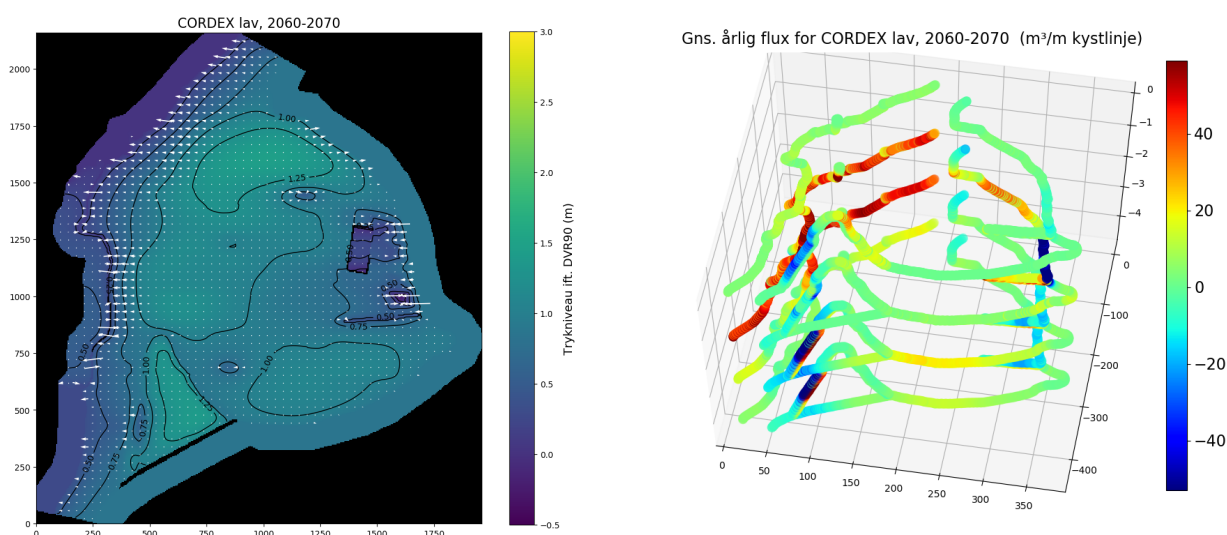
Figur 16: Modellerede grundvandsstrømme og flux for CORDEX lav i 2020'erne.



Figur 17: Modellerede grundvandsstrømme og flux for CORDEX høj i 2020'erne.

2.1.2 2060'erne

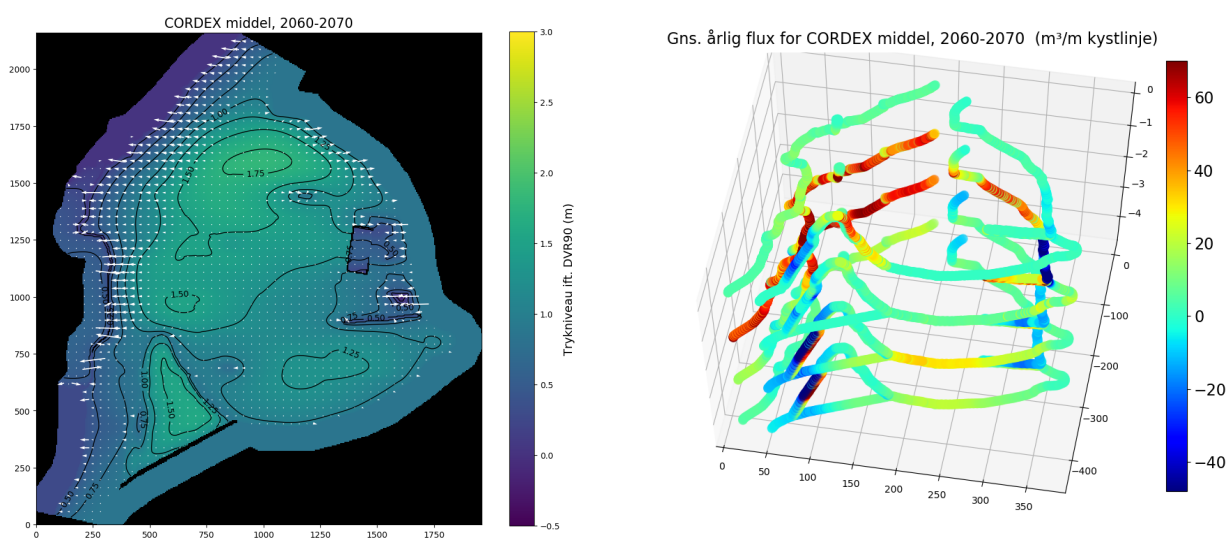
På figur 18 ses modelresponsen for CORDEX lav scenariet i 2060'erne. Responsen ligner meget CORDEX høj scenariet for 2020'erne, men dog med visse forskelle. På det nordlige Rønland betyder det øgede trykniveau i Nissum Bredning således at udstrømningen under Rønlands nordøstlige kyst er blevet reduceret. Tilsyneladende er grundvandskkellet her rykket længere mod øst, således at en større del området nu afvander mod Thyborøn Fjord. Herudover ses der kun større ændringer på den gamle fabriksgrund, hvor det øgede trykniveau i Nissum Bredning og grøften skaber en vestlig rettet trykniveaugradient, således at der nu, især i de øvre lag, strømmer vand ud under Harboøre Fjords kyst.



Figur 18: Modellerede grundvandsstrømme og flux for CORDEX lav i 2060'erne.

På figur 19 på den følgende side ses modelresponsen for CORDEX middel scenariet i 2060'erne. Bortset fra at trykniveauet, især centralt i området, er øget betydeligt som følge af den øgede nedsivning i forhold til CORDEX lav, er potentialebilledet stort set uændret, og strømningensbilledet

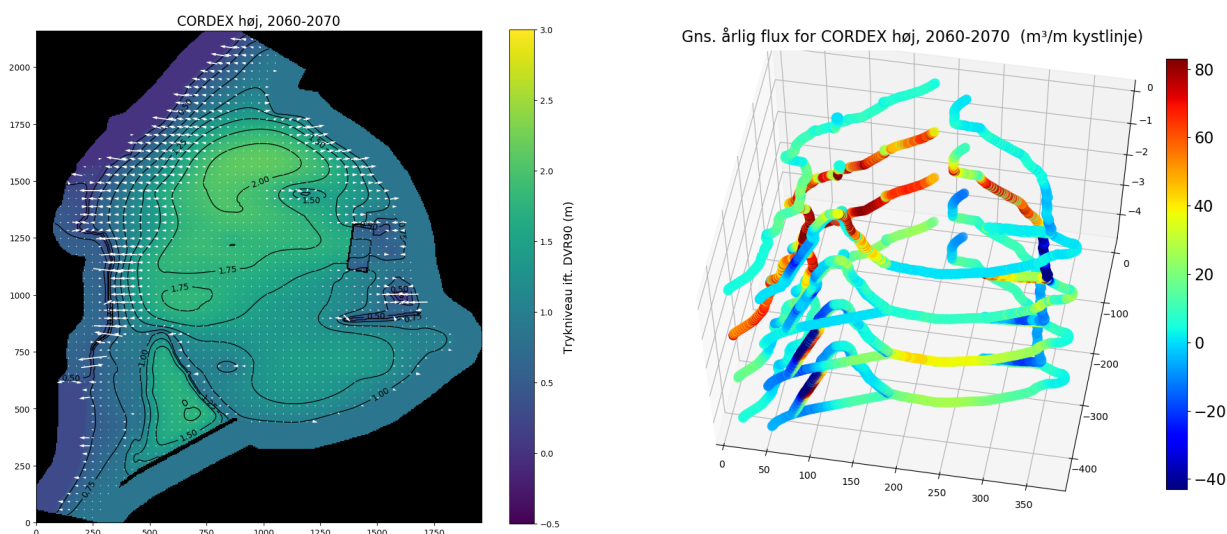
er derfor også stort set uændret, bortset fra at grundvandsfluxen naturligvis er øget tilsvarende til nedsivningen.



Figur 19: Modellerede grundvandsstrømme og flux for CORDEX middel i 2060'erne.

Figur 20 på næste side viser modelresponsen for CORDEX høj scenariet i 2060'erne. Ligesom for CORDEX middel er potentialebillede og strømningsbillede stort set uændret, men trykniveauet, og dermed også grundvandsfluxen, er kraftigt forøget. Dog skal det nævnes at den øgede nedsivning nu ser ud til at være ved at skabe så højt et trykniveau at der opstår et „hul“ i afværgen i Østområdet ud for den sydlige ende af Svovlgruberne, hvor den indadvendte strømning fra Nissum Bredning er forsvundet.

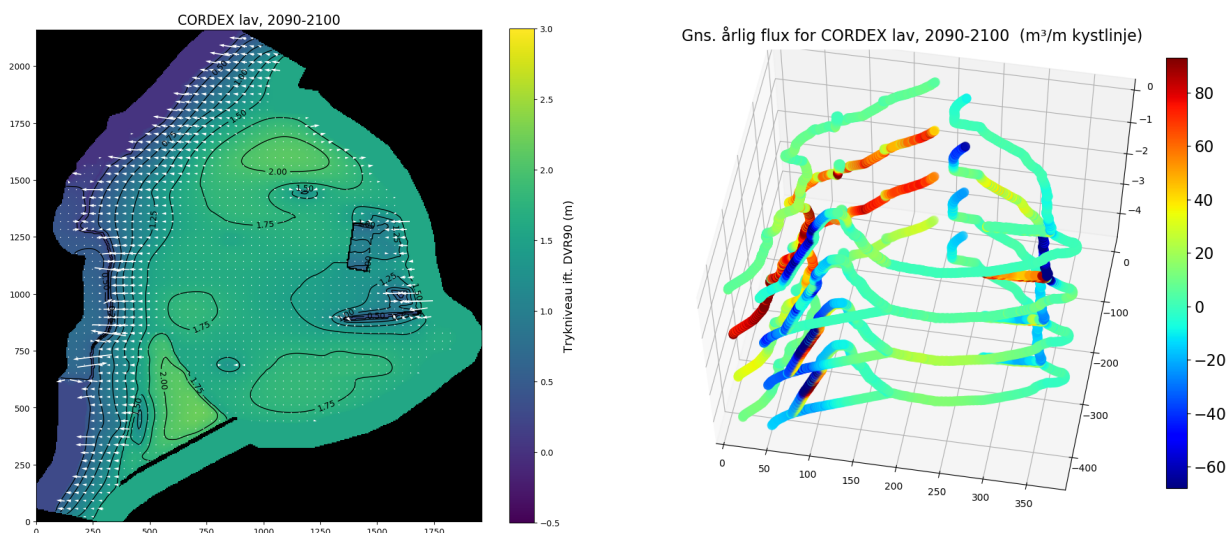
Det skal bemærkes, at modellen nu simulerer et trykniveau, som i alle yderområder på Rønland er højere end terrænoverfladen, og som i et stort område vest for Svovlgruberne er i samme højde som overfladen. Det skal derfor pointeres at modellen *ikke* er designet til at simulere hverken permanente eller temporære søer/vandflader eller nogen form for overfladeafstrømning, og derfor kan simulere et trykniveau, som er vilkårligt højere end terrænoverfladen. Da det er trykniveauforskellene mellem forskellige steder, der driver grundvandsstrømmene, betyder dette altså at modellen kan vise strømninger, som ikke ville opstå i virkeligheden, simpelthen fordi vandet ville løbe af på overfladen. Ligeledes kan de simulerede trykniveauer i disse områder derfor ikke tages til udtryk for hvor meget vand, der vil stå, men kan kun betragtes som en indikation på at der *sandsynligvis* vil stå vand her.



Figur 20: Modellerede grundvandsstrømme og flux for CORDEX høj i 2060'erne.

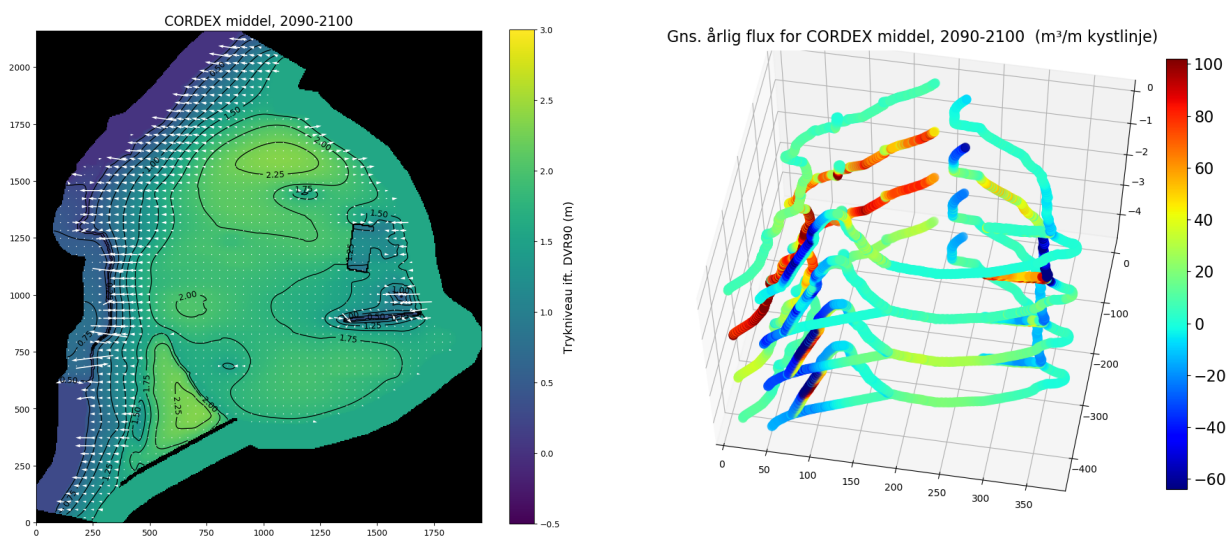
2.1.3 2090'erne

På figur 21 ses modelresponsen for CORDEX lav scenariet i 2090'erne. Trykniveauet er i store dele af modelområdet over eller i højde med terrænet, hvilket vil sige at der sandsynligvis vil stå blankt vand i disse områder selv med dette lave CORDEX scenarie. Udstrømningen til Nissum Bredning er i denne situation forholdsvis lille, idet den høje vandstand skaber en vestligt rettet trykniveaugradient, som den relativt lille nedsivning kun i mindre områder er i stand til at modvirke. Der ses således en stor udstrømning mod de vestlige randbetingelser, ligesom den lave vandstand i kølevandskanalen på det østlige Rønland betyder at der vil strømme vand fra det omkringliggende område ud i kanalen.

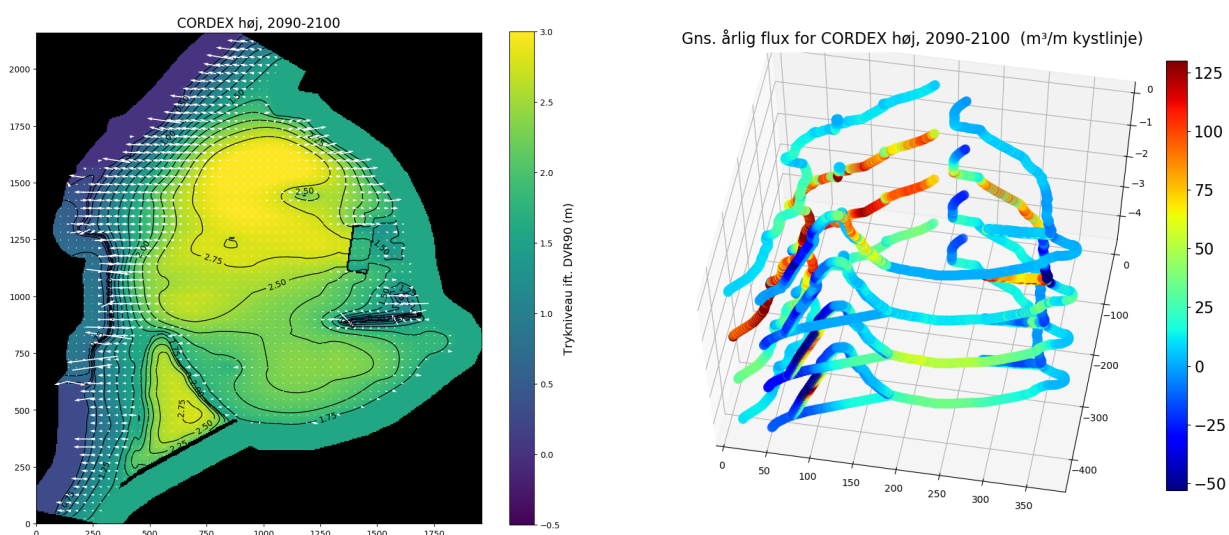


Figur 21: Modellerede grundvandsstrømme og flux for CORDEX lav i 2090'erne.

På figur 22 og figur 23 på næste side ses modelresponsen for hhv. CORDEX middel og høj scenarierne. Trykniveauet og fluxen ud af området ses at stige som følge af den øgede nedsivning, men derudover er der tilsyneladende ikke betydelige forskelle i den overordnede grundvandsstrømning ift. CORDEX lav scenariet.



Figur 22: Modellerede grundvandsstrømme og flux for CORDEX middel i 2090'erne.



Figur 23: Modellerede grundvandsstrømme og flux for CORDEX høj i 2090'erne.

2.2 Hotspotområderne

I dette afsnit ses der nærmere på de lokale grundvandsstrømme i/omkring de definerede hotspotområder [Ljungberg, 2017a]. De lokale grundvandsstrømme visualiseres ved hjælp af partikelbanesporinger foretaget med programmet „MODPATH 6“ [US Geological Survey, 2019]. For hver af de tre CORDEX scenarier er der indenfor hotspotområderne tilsat partikler til lagene 1, 3 og 5, som tilsammen repræsenterer langt den største del af grundvandsmodellen. Partiklerne „slippes“ ved starten af årene 2010, 2050 og 2080, og spores herefter i 20 år, medmindre de er „termineret“ (mere om dette i næste afsnit), hvilket vil sige at sporingen er ophørt, inden de 20 år er gået.

Ved en MODPATH-simulering kan partiklerne termineres enten (a) når de når en forud defineret „stopzone“, (b) når de når en randbetingelse (hvilket i denne model kan være enten en celle, der pumpes fra, eller en celle, der er defineret som en kendt trykniveau randbetingelse) eller (c) når de når en såkaldt „weak sink“. En „weak sink“ er en celle, hvorfra der strømmer vand både til en randbetingelse og til en eller flere aktive modelceller. Ved opsætningen af simuleringen skal det vælges om partikler skal termineres, når de når en sådan celle, eller om de skal fortsætte igennem den. I dette projekt er det valgt at terminere sådanne partikler. På de følgende kort er partikelbanerne farvet i forskellige farver, efter følgende model.

Grøn Partikler, som er termineret indenfor det område, hvor de er startet.

Blå Partikler, som ikke er termineret - dvs. at de fortsat bevæger sig.

Rød Partikler, som har nået en stopzone. Som stopzoner er defineret alle modelceller i/under Nissum Bredning, Thyborøn Fjord, Harboøre Fjord og Forbindelseskanaalen, samt modellens øverste lag i Grøften og Kølevandskanaalen.

Syren Partikler, som er termineret uden for det hotspot, hvor de er startet.

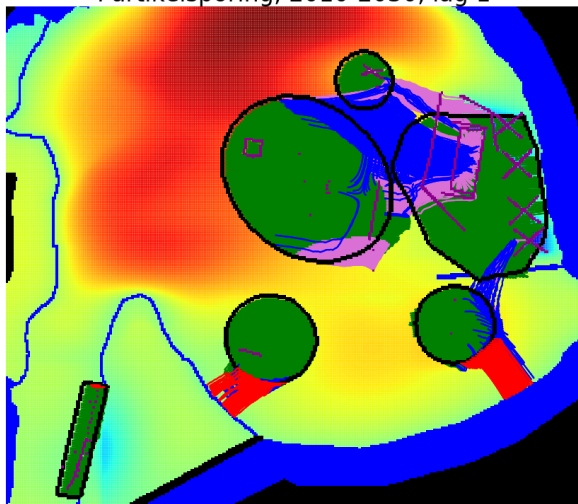
Det skal bemærkes, at både de grønne og de syren-farvede spor kan repræsentere partikler, som er termineret i en „weak sink“. Da en sådan både kan ligge op ad en celle, der pumpes fra, og en celle, der er defineret som en kendt trykniveau randbetingelse, vil det, særligt for partikler, som er repræsenteret af syren-farvede spor, være usikkert hvorvidt de opfanges af afværgen eller ender i en kendt trykniveau randbetingelse.

Partikelsporene vises på et baggrundskort, som angiver periodens gennemsnitlige trykniveaufordeling i det respektive lag på en relativ farveskala, hvor rødlige farver angiver højt trykniveau og blå farver angiver lavt trykniveau (den mørkeblå farve på „kendt trykniveau“ randbetingelserne har dog ikke noget med trykniveauet at gøre). Trykniveauet, som er angivet på baggrundskortene, kan derfor ikke sammenlignes på tværs af figurerne.

2.2.1 2010-2030

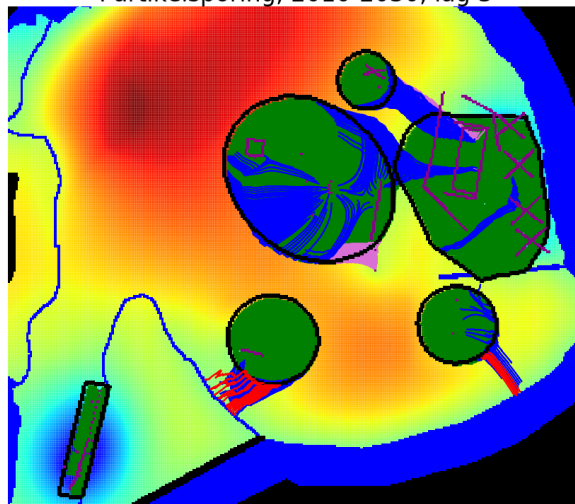
CORDEX lav

Partikelsporing, 2010-2030, lag 1



Figur 24: Partikelbanesporing for lag 1 i årene 2010-2030.

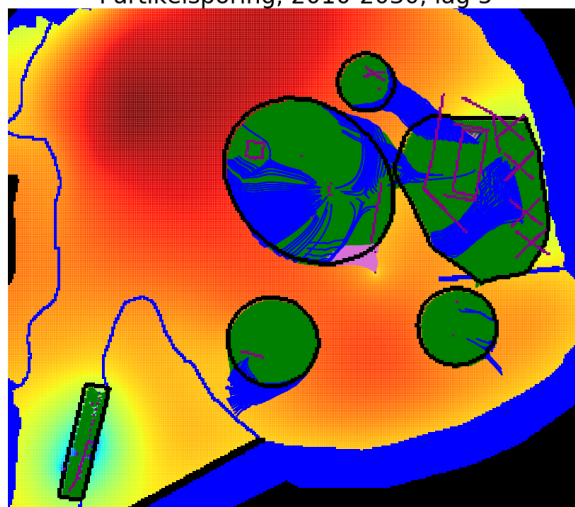
Partikelsporing, 2010-2030, lag 3



Figur 25: Partikelbanesporing for lag 3 i årene 2010-2030.

Figurene 24 til 26 viser resultatet af partikelbanesporingen for CORDEX lav i perioden 2010-2030. Det ses at langt størstedelen af partiklerne opfanges af afværgen, men der er dog nogle få partikler fra udkanten af hhv. Syd- og Skorstensområdet, som undslipper afværgen og infiltrerer til hhv. Grøften og Nissum Bredning. Der er desuden en del partikler fra både det nordlige og det centrale produktionsområde, samt nogle få fra Skorstensområdet, som opfanges af afværgen i Østområdet.

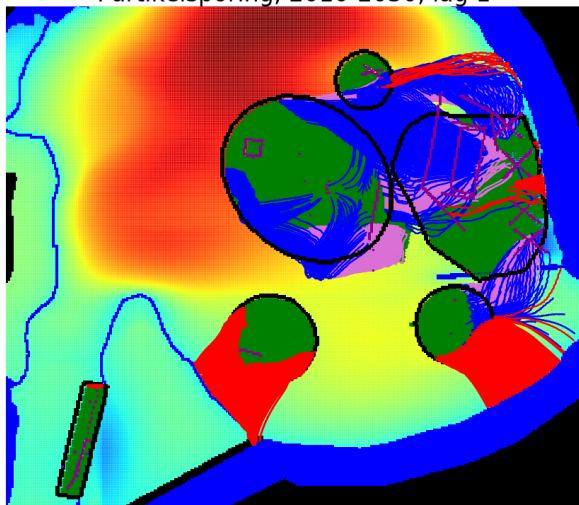
Partikelsporing, 2010-2030, lag 5



Figur 26: Partikelbanesporing for lag 5 i årene 2010-2030.

CORDEX middel

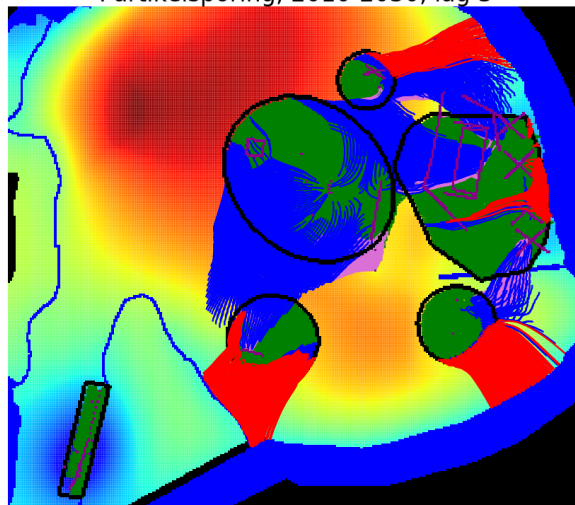
Partikelsporing, 2010-2030, lag 1



Figur 27: Partikelbanesporing for lag 1 i årene 2010-2030.

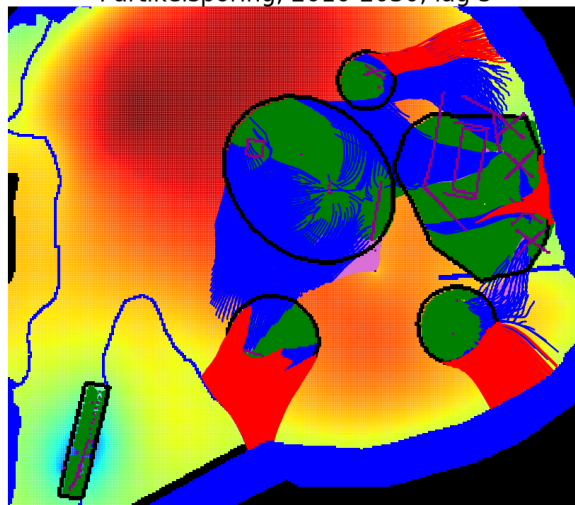
Figurene 27 til 29 viser resultatet af partikelbanesporingen for CORDEX middel i perioden 2010-2030. Det ses at langt størstedelen af partiklerne også i dette scenarie opfanges af afværgerne, men der er dog en del partikler, primært fra udkanten af hhv. Syd- og Skorstensområdet, som undslipper afværgerne og infiltrerer til hhv. Grøften og Nissum Bredning. Fra det nordlige produktionsområde og Østområdet undslipper relativt få partikler, og infiltrerer til Nissum Bredning. Der er desuden en relativt stor mængde partikler fra flere af delområderne, som efter de 20 år fortsat er aktive. Størstedelen af disse partikler ser ud til at være på vej mod afværgeforanstaltningerne, men der er dog nogle få fra det nordlige produktionsområde, som ser ud til at ville nå Nissum Bredning.

Partikelsporing, 2010-2030, lag 3



Figur 28: Partikelbanesporing for lag 3 i årene 2010-2030.

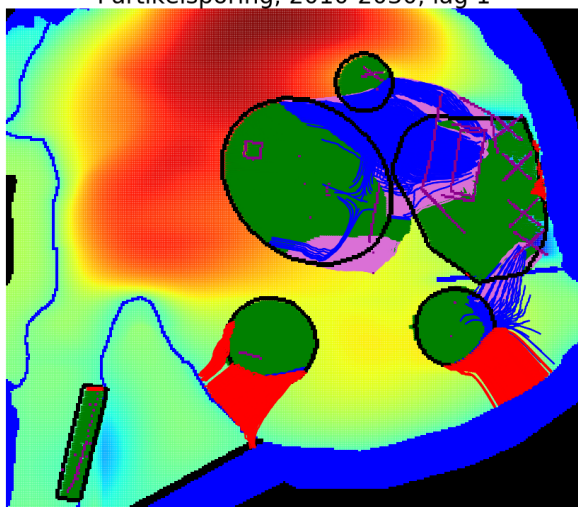
Partikelsporing, 2010-2030, lag 5



Figur 29: Partikelbanesporing for lag 5 i årene 2010-2030.

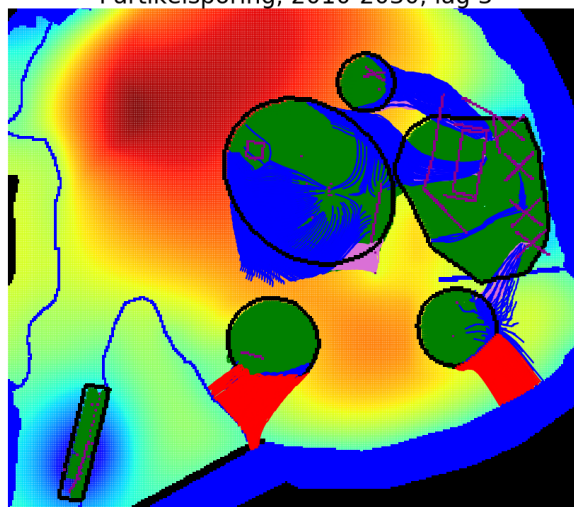
CORDEX høj

Partikelsporing, 2010-2030, lag 1



Figur 30: Partikelbanesporing for lag 1 i årene 2010-2030.

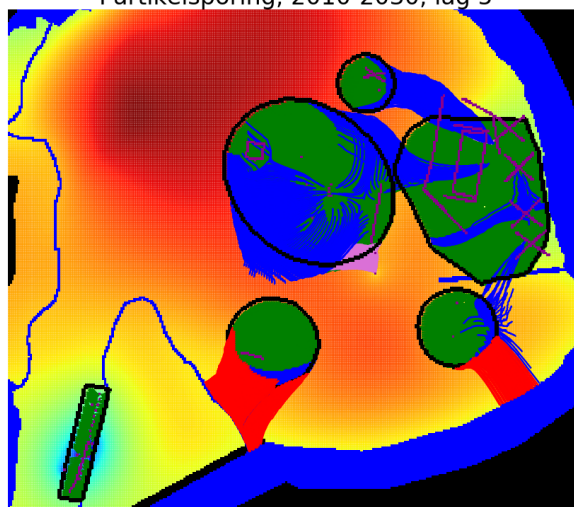
Partikelsporing, 2010-2030, lag 3



Figur 31: Partikelbanesporing for lag 3 i årene 2010-2030.

Figurene 30 til 32 viser resultatet af partikelbanesporingen for CORDEX høj i perioden 2010-2030. Resultatet af denne simulering ligner meget resultatet for CORDEX lav i samme periode, men der er dog lidt flere partikler som udslipper afværgen eller stadig er aktive efter de 20 års sporing.

Partikelsporing, 2010-2030, lag 5

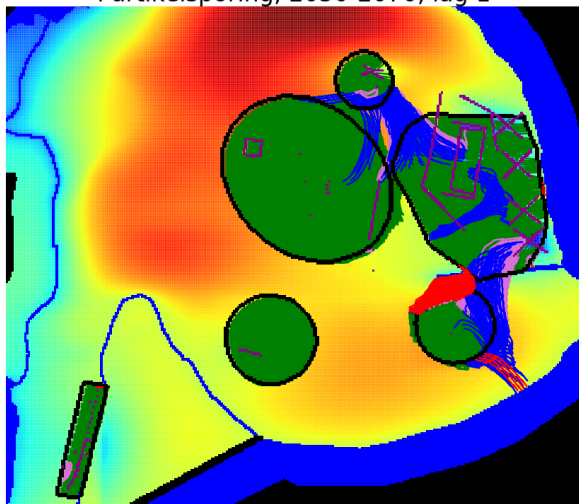


Figur 32: Partikelbanesporing for lag 5 i årene 2010-2030.

2.2.2 2050-2070

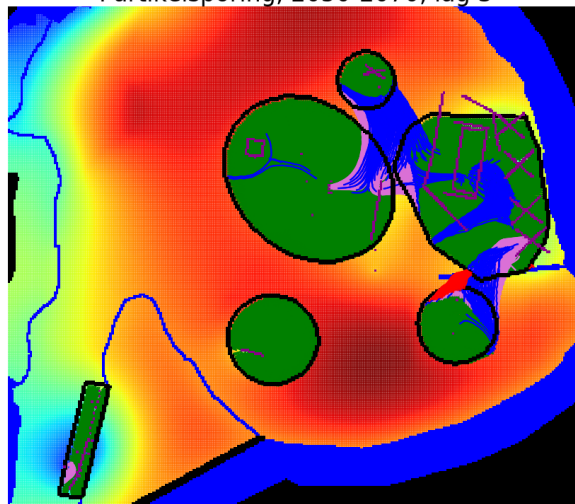
CORDEX lav

Partikelsporing, 2050-2070, lag 1



Figur 33: Partikelbanesporing for lag 1 i årene 2050-2070.

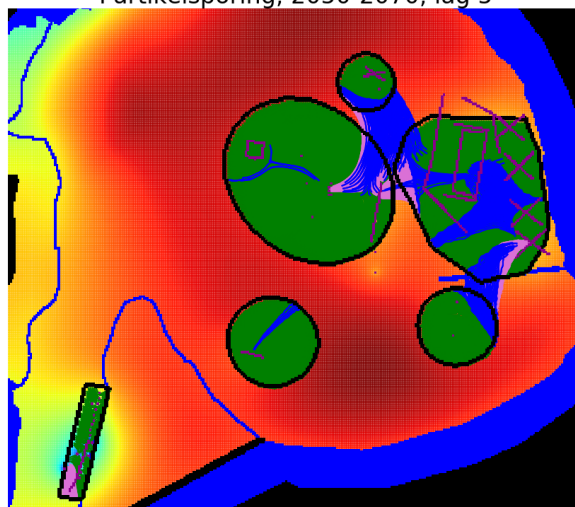
Partikelsporing, 2050-2070, lag 3



Figur 34: Partikelbanesporing for lag 3 i årene 2050-2070.

Figurene 33 til 35 viser resultatet af partikelbanesporingen for CORDEX lav i perioden 2050-2070. Det øgede trykniveau i Nissum Bredning har, i forhold til perioden 2010-2030, sænket den udadrettede trykniveaugradient, hvilket betyder at stort set alle partikler opfanges af afværgen i dette scenarie. Der er dog nogle få partikler fra Skorstensområdet, som undslipper afværgen og infiltrerer til kølevandskanalen eller Nissum Bredning.

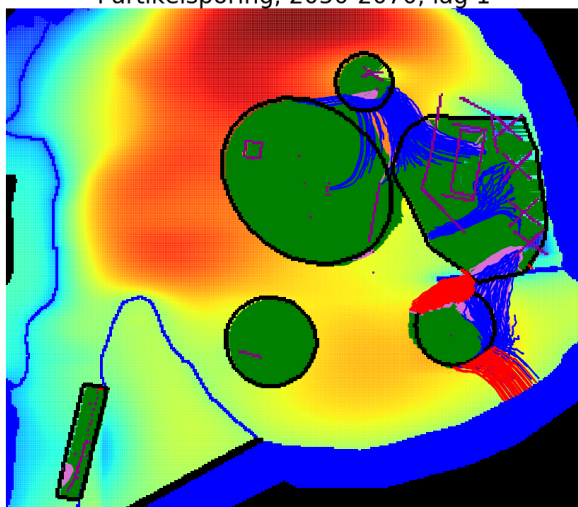
Partikelsporing, 2050-2070, lag 5



Figur 35: Partikelbanesporing for lag 5 i årene 2050-2070.

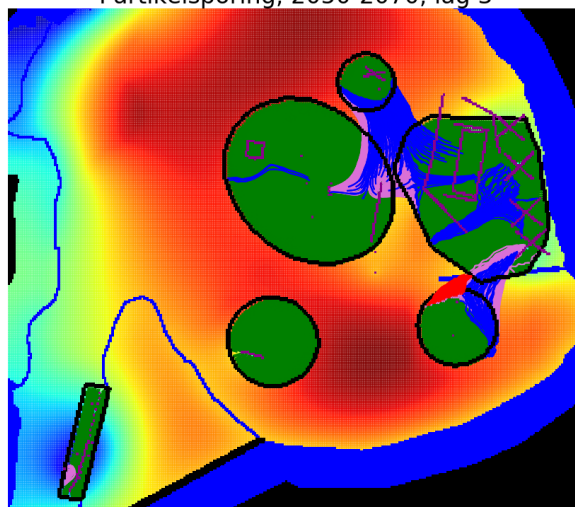
CORDEX middel

Partikelsporing, 2050-2070, lag 1



Figur 36: Partikelbanesporing for lag 1 i årene 2050-2070.

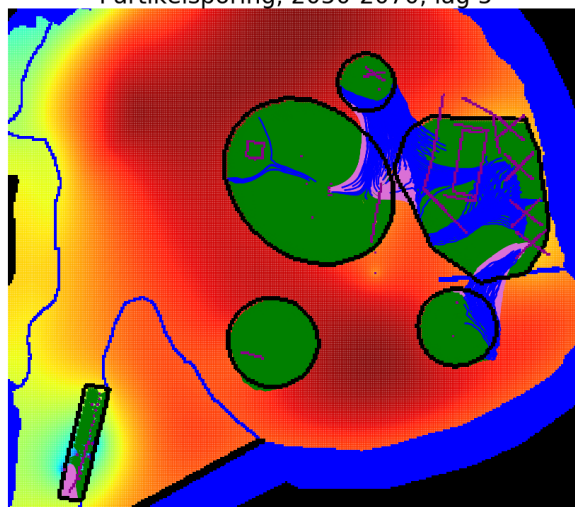
Partikelsporing, 2050-2070, lag 3



Figur 37: Partikelbanesporing for lag 3 i årene 2050-2070.

Figurene 36 til 38 viser resultatet af partikelbanesporingen for CORDEX middel i perioden 2050-2070. Ligesom i CORDEX lav scenariet for denne periode opfanges næsten alle partikler af afværgen; der er dog lidt flere partikler fra Skorstensområdet, som infiltrerer til hhv. kølevandskanalen og Nissum Bredning.

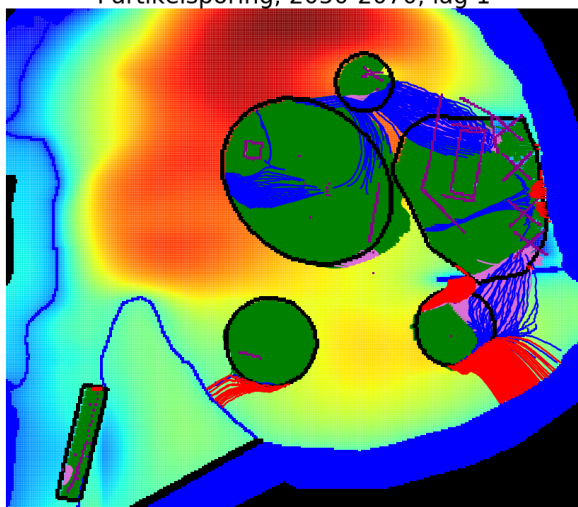
Partikelsporing, 2050-2070, lag 5



Figur 38: Partikelbanesporing for lag 5 i årene 2050-2070.

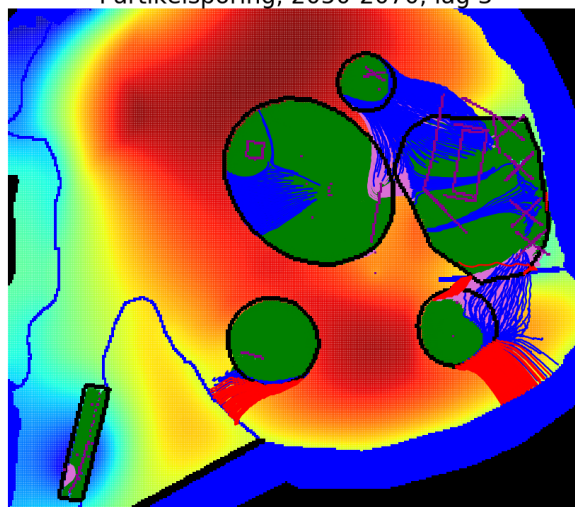
CORDEX høj

Partikelsporing, 2050-2070, lag 1



Figur 39: Partikelbanesporing for lag 1 i årene 2050-2070.

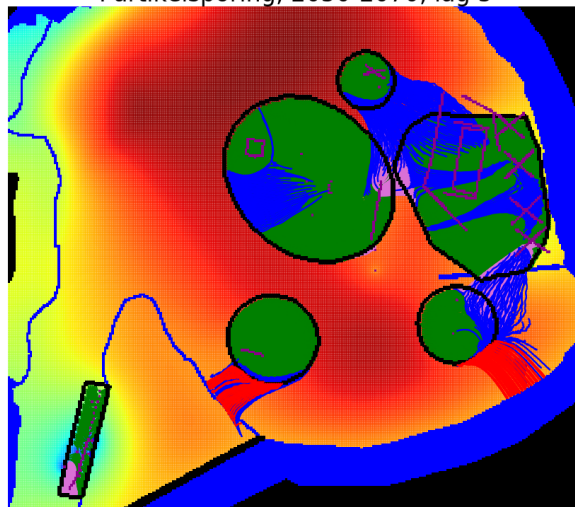
Partikelsporing, 2050-2070, lag 3



Figur 40: Partikelbanesporing for lag 3 i årene 2050-2070.

Figurene 39 til 41 viser resultatet af partikelbanesporingen for CORDEX høj i perioden 2050-2070. I dette scenarie er den gennemsnitlige årlige nedbør i denne periode ca. 885 mm, og det ses da også tydeligt at den udadvendte trykniveaugradient er øget, idet der nu ikke kun undslipper flere partikler fra Skorstensområdet, men også fra Syd- og Østområdet, og de partikler fra det nordlige produktionsområde, som opfanges af afværgeren i Østområdet, nu presses længere mod øst. Det øgede trykniveau i Nissum Bredning er dog fortsat i stand til nogenlunde at bremse grundvandsstrømmene, så størstedelen af partiklerne fra hotspotområderne opfanges af afværgeforanstaltningerne.

Partikelsporing, 2050-2070, lag 5

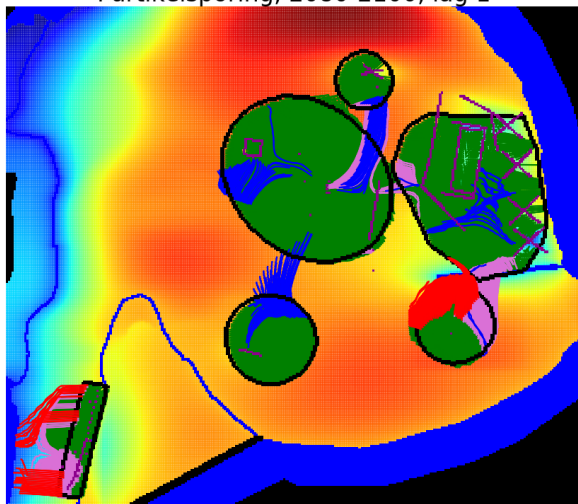


Figur 41: Partikelbanesporing for lag 5 i årene 2050-2070.

2.2.3 2080-2100

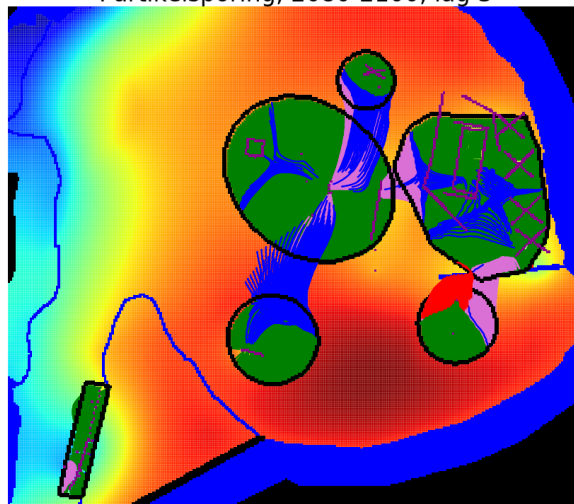
CORDEX lav

Partikelsporing, 2080-2100, lag 1



Figur 42: Partikelbanesporing for lag 1 i årene 2080-2100.

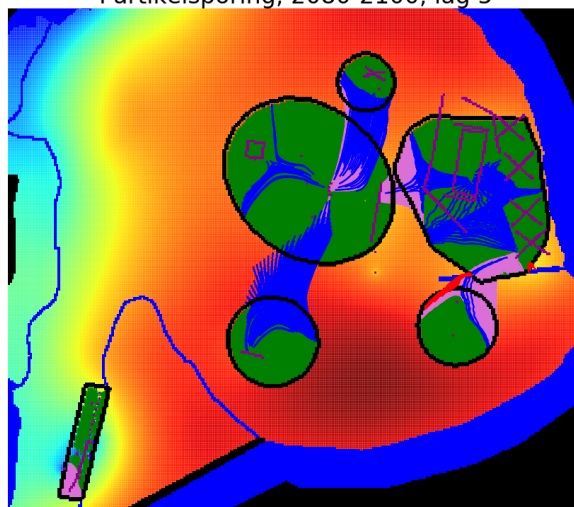
Partikelsporing, 2080-2100, lag 3



Figur 43: Partikelbanesporing for lag 3 i årene 2080-2100.

Figurene 42 til 44 viser resultatet af partikelbanesporingen for CORDEX lav i perioden 2080-2100. Det stadigt stigende trykniveau i Nissum Bredning skaber nu så stærk en vestlig strømning på den gamle fabriksgrund, at afværgen ikke længere kan opfange alle partiklerne. Også på den sydlige del af Rønland er betydningen af det øgede trykniveau synlig, idet relativt mange partikler fra Sydområdet bevæger sig mod nord, hvor de ser ud til at ville blive opsamlet af afværgen i det centrale produktionsområde. Fra den vestlige del af Østområdet ses nu også en vestligt rettet strømning af partikler, som også opsamles af afværgen i det centrale produktionsområde.

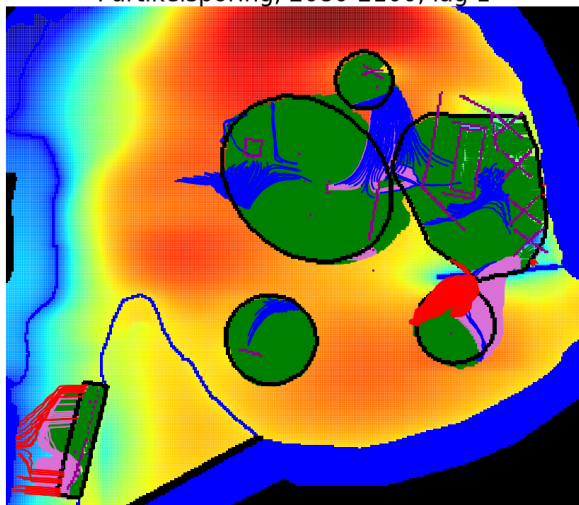
Partikelsporing, 2080-2100, lag 5



Figur 44: Partikelbanesporing for lag 5 i årene 2080-2100.

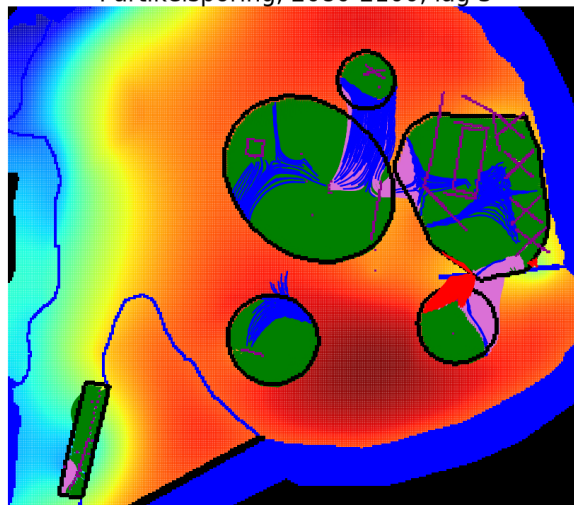
CORDEX middel

Partikelsporing, 2080-2100, lag 1



Figur 45: Partikelbanesporing for lag 1 i årene 2080-2100.

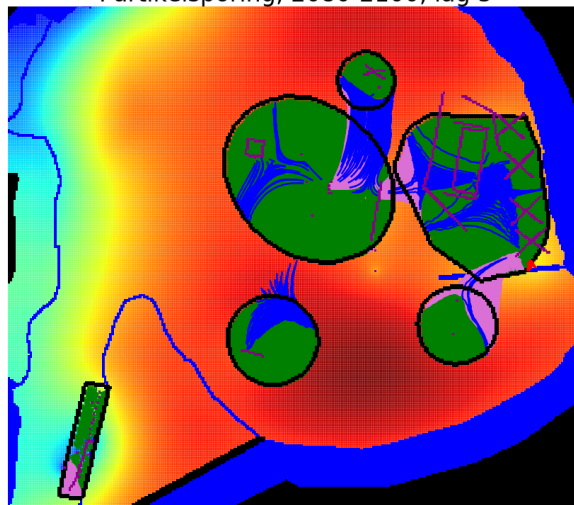
Partikelsporing, 2080-2100, lag 3



Figur 46: Partikelbanesporing for lag 3 i årene 2080-2100.

Figurene 45 til 47 viser resultatet af partikelbanesporingen for CORDEX middel i perioden 2080-2100. Det høje trykniveau i Nissum Bredning presser stadig partikler fra den gamle fabriksgrund og den vestlige del af Østområdet mod vest, og partikler fra Sydområdet mod nord. Kombinationen af det høje trykniveau og den øgede nedsivning skaber nu desuden en begyndende vestlig strømning fra den vestlige del af det centrale produktionsområde.

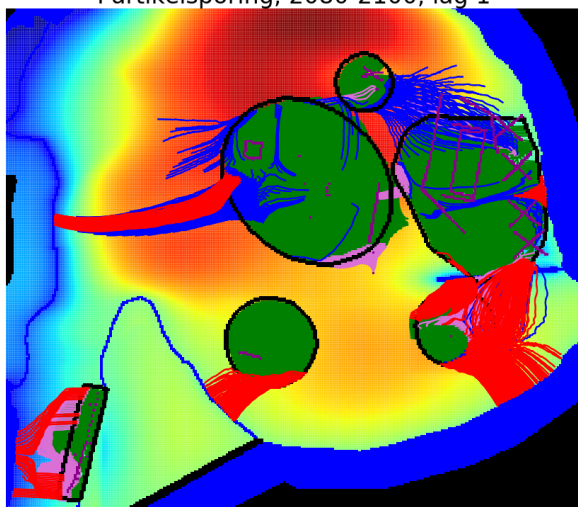
Partikelsporing, 2080-2100, lag 5



Figur 47: Partikelbanesporing for lag 5 i årene 2080-2100.

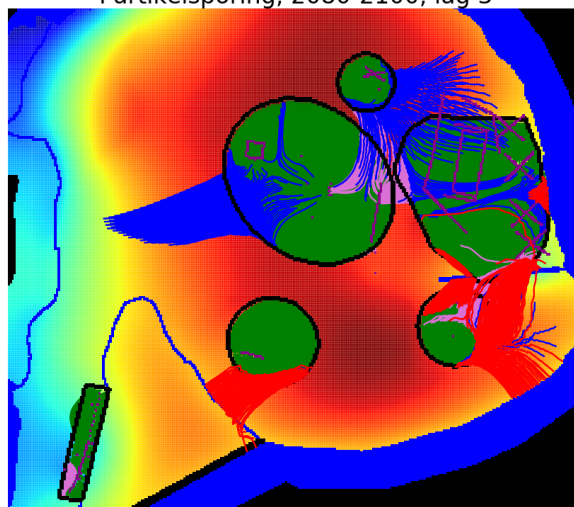
CORDEX høj

Partikelsporing, 2080-2100, lag 1



Figur 48: Partikelbanesporing for lag 1 i årene 2080-2100.

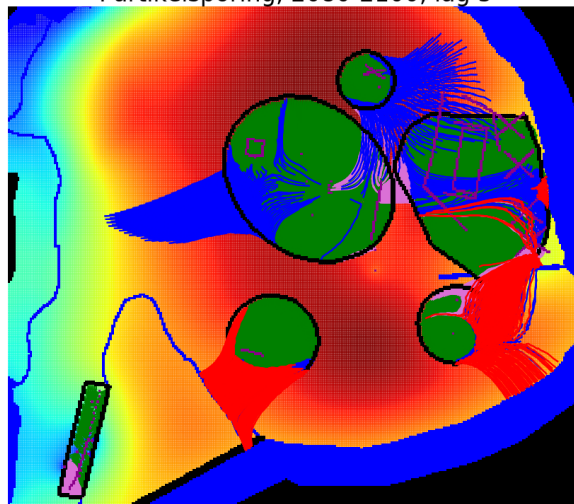
Partikelsporing, 2080-2100, lag 3



Figur 49: Partikelbanesporing for lag 3 i årene 2080-2100.

Figurene 48 til 50 viser resultatet af partikelbanesporingen for CORDEX høj i perioden 2080-2100. Det høje trykniveau i Nissum Bredning kombineret med den stærkt øgede nedsivning forårsager nu en tydelig vestgående strømning, både fra det centrale produktionsområde og på den gamle fabriksgrund. Desuden ses det at der fra store dele af Skorstensområdet og udkanten af Sydområdet undslipper partikler til hhv. kølevandskanalen, Nissum Bredning og Grøften. Endelig er der en mindre mængde partikler fra det nordlige produktionsområde, som fortsat er aktive, men som ser ud til at ville infiltrere til Nissum Bredning.

Partikelsporing, 2080-2100, lag 5



Figur 50: Partikelbanesporing for lag 5 i årene 2080-2100.

3 Sammenfatning

Samlet set viser simuleringerne, som forventet, at der er et nøje samspil mellem hhv. vandstanden i Nissum Bredning, nedsivningen i modelområdet og grundvandsstrømmene. Mere specifikt, er der særligt i det nordlige produktionsområde, Skorstensområdet og Sydområdet en nær sammenhæng mellem disse parametre og afværgens evne til at opsamle alt grundvandet fra de definerede hotspot-områder. Den massive oppumpning i Østområdet og på den gamle fabriksgrund, samt det centrale produktionsområdes nærhed til toppunktet for trykniveauet, betyder at afværgens effektivitet i disse områder er mindre påvirkelig af ændringer i hhv. vandstand og nedsivning. Således er det kun i de mest ekstreme scenarier, med meget høj vandstand i Nissum Bredning og kraftigt forøget nedbør, at der ses betydelig påvirkning af afværgesituationen.

Det fremgår af simuleringerne, at en vandstandsstigning i Nissum Bredning på op mod en meter, svarende til DMI's øvre bud for 2070'erne, ikke vil have negativ effekt på afværgen. En sådan forøgelse af trykniveauet kan ligefrem hjælpe med at opretholde en indadrettet trykniveaugradient, som vil forhindre forureningen i hotspotområderne i at infiltrere til bredningen. I modsætning hertil vil en forøget nedsivning øge trykniveaugradienten mod randbetingelserne, og gøre det vanskeligere for afværgeforanstaltningerne at forhindre forureningen i at spredes. I en sådan situation vil hovedsageligt de ydre områder på Rønland - det nordlige produktionsområde, Sydområdet og Skorstensområdet - være udsatte, da grundvandsfluxen stiger med afstanden til grundvandsskellet; i Østområdet synes den massive oppumpning dog at være i stand til at forhindre nævneværdig udstrømning af grundvand.

Simuleringerne indikerer desuden, at et tænkt scenarie, hvor vandstanden ikke stiger nævneværdigt, men nedsivningen øges, vil øge den udadrettede trykniveaugradient, hvilket sandsynligvis vil have væsentlig negativ indflydelse på afværgesituationen i det nordlige produktionsområde, Sydområdet, Skorstensområdet og muligvis også Østområdet.

Det ses endvidere af simuleringerne at en vandstandsstigning på 70-80 cm i Nissum Bredning, kombineret med en årlig nedbør på over 800 mm, vil medføre at alle yderområderne på Rønland oversvømmes, og at grundvandet vil stå meget tæt på, eller lidt over, terrænoverfladen i store dele af produktionsområdet. Det skal derfor endnu en gang pointeres at grundvandsmodellen, som tidligere nævnt, ikke er designet til at simulere en sådan situation; modellen „kender“, så at sige, ikke terrænets højde og hældning, og kan derfor opbygge trykniveauer, som er umulige at opnå i virkeligheden. Resultaterne af simuleringerne bliver derfor stadig mere usikre, efterhånden som størrelsen af de områder, hvor der simuleres et trykniveau, som er højere end terrænoverfladen, tiltager. Skal grundvandsmodellen kunne simulere sådanne scenarier mere nøjagtigt, vil det kræve en omfattende videreudvikling, som er langt udover målet med dette projekt. Simuleringerne kan dermed opsummeres som følger:

- Afværgeforanstaltningerne synes generelt at være meget robuste overfor de modellerede klimaændringer.
- En forøgelse af nedbøren vil betyde større risiko for spredning af forureningen.
- Omend en forøgelse af vandstanden i Nissum Bredning på omkring en meter ikke synes at frembyde problemer mht. spredning af forureningen, vil en sådan dog med stor sandsynlighed give markante problemer med oversvømmelser på Rønland.
- Grundvandsmodellen er ikke på nuværende tidspunkt i stand til nøjagtigt at simulere hverken årstidsbestemte eller permanente oversvømmelser i modelområdet, hvilket betyder at simuleringerne for den sidste halvdel af århundredet er usikre.

Det skal også kraftigt understreges at grundvandsmodellen, selvom der er store udsving i de anvendte klimatidsserier, tager udgangspunkt i gennemsnitlige værdier for vandstand og nedsivning. Det betyder, at ekstreme begivenheder på ingen måde er indtænkt, hverken hvad angår oversvømmelseshøjder eller -hyppighed, på trods af at dette også forventes som en del af RCP8.5 scenariet [IPCC, 2014].

Afslutningsvis skal opmærksomheden henledes på en nyligt accepteret artikel af Shepherd et al. [2019], hvori det konkluderes at afsmeltningen fra den grønlandske iskappe fra 1992 til 2018 har været tæt på det forudsagte for IPCC's scenarie for en høj global opvarmning. Er den samme tendens gældende for den antarktiske iskappe, som potentielt kan bidrage væsentligt mere til den globale havniveaustigning end den grønlandske, er det altså sandsynligt at vi i fremtiden vil se havniveaustigninger i samme størrelsesorden, som simuleret i nærværende projekt.

Referencer

- Aaser, H. F. (2019). Personlig kommunikation. Naturstyrelsen.
- Bakker, M., Post, V., Langevin, C. D., Hughes, J. D., White, J. T., Starn, J. J., & Fienen, M. N. (2016). Scripting modflow model development using python and flopy. *Groundwater*. ISSN 1745-6584. DOI 10.1111/gwat.12413. URL <http://dx.doi.org/10.1111/gwat.12413>.
- Christensen, S. (2016). *Some Basic and Advanced Techniques in Numerical Groundwater Modeling*. Department of Geoscience, Aarhus University.
- FMC (2019). Statusrapport nr. 32. Status over grundvandsstrømme og afværgeforanstaltninger på Rønland og gl. fabriksgrund i 2018.
- Grinsted, A., Jevrejeva, S., Riva, R. E. M., & Dahl-Jensen, D. (2015). Sea level rise projections for northern europe under rcp8.5. URL [cr01309https://www.glaciology.net/publication/2015-08-25-sea-level-rise-projections-for-northern-europe-under-rcp8-5/](https://www.glaciology.net/publication/2015-08-25-sea-level-rise-projections-for-northern-europe-under-rcp8-5/). DOI 10.3354/cr01309.
- Hansen, H. P. (2004). Geologisk model for Rønland. Geomorfologisk projektarbejde, Geologisk Institut, Aarhus Universitet.
- IPCC (2014). Climate change 2014: Synthesis report. Technical report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Ljungberg, T. (2016a). Dynamiske grundvandsmodeller for Rønland og Cheminovas gamle fabriksgrund. Specialrapport, Geologisk Institut, Aarhus Universitet.
- Ljungberg, T. (2016b). Forberedelse til opstilling af dynamisk grundvandsmodel. Geologisk projektarbejde, Geologisk Institut, Aarhus Universitet.
- Ljungberg, T. (2017a). Analyse af transporttider og -veje for hotspotforureningerne på Rønland og Cheminovas gamle fabriksgrund.
- Ljungberg, T. (2017b). Analyse og optimering af afværgeforanstaltningerne på Rønland og Cheminovas gamle fabriksgrund.
- Olesen, J. E. & Heidmann, T. (2002). *Evacrop - Et program til beregning af aktuel fordampning og afstrømning fra rodzonen*. Research center Foulum, Tjele, Denmark.
- QGIS Development Team (2019). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. URL <http://qgis.osgeo.org>.
- Shepherd, A., Ivins, E., Rignot, E., Smith, B., van den Broeke, M., Velicogna, I., Whitehouse, P., Briggs, K., Joughin, I., Krinner, G., Nowicki, S., The IMBIE Team, & more (2019). Mass balance of the Greenland Ice Sheet from 1992 to 2018. *Nature*. ISSN 1476-4687. DOI 10.1038/s41586-019-1855-2. URL <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1855-2>.
- US Geological Survey (2019). Modflow and related programs. URL https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/modflow-and-related-programs?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects.

Bilag

A Dataleverance fra DMI

A.1 Havniveau

Havvandstand

Vandstanden i havet er stigende, og vil fortsætte med at stige de næste flere hundrede år. Hvor meget vandstanden vil stige, afhænger dog meget af hvor mange drivhusgasser der udledes. Specielt for høje CO₂ scenarier er der desuden meget aktiv forskning i hvordan specielt Antarktis vil reagere, og dermed hvad risikoen for store stigninger i vandstanden er.

Der er forskelle på hvordan vandstanden vil stige forskellige steder på Jorden. Stigningerne i vandstanden ved de danske kyster forventes overordnet set at følge den globale gennemsnits-stigning ret tæt, men dog påvirket af landhævning. I området omkring Harboøre er den overordnede landhævning omkring 0,07 m på 100 år (Personlig kommunikation, Per Knudsen, DTU Space, 2016), men vil desuden påvirkes af lokale hævnings/sætninger i området omkring Limfjordens mundning. Landhævningen skal trækkes fra stigningen i havet, når signalet ved kysten skal beregnes.

DMI's eksisterende tal for forventede vandstandsstigninger omkring Danmark er udgivet i DKC rapport 14-06 (Olesen et al. 2014), dog anbefaler vi at bruge studiet af Grinsted et al. 2015 til estimat af et øvre bud for vandstandsstigninger. For området omkring Harboøre vil det være relevant at bruge Grinsted et al.'s estimater for Esbjerg, da begge ligger på den danske vestkyst, og der kun er små forskelle i landhævningen.

DMI's tal vil blive opdateret med udgivelsen af Klimaatlasset i efteråret 2019. Dette vil være baseret på en ny IPCC specialrapport der vil udkomme umiddelbart inden, samt den nyeste litteratur, specielt Bamber et al. 2019, der anses for at være bedste nuværende bud for en pessimistisk (høj) vurdering af den øvre grænse for vandstandsstigninger.

Tabel 1: Vandstandsstigninger ved Harboøre: DMI's nuværende anbefalede tal. Desuden global middelværdi fra nyt studie, som vil blive taget i betragtning ved udarbejdelse af værdier DMI's Klimaatlas.

	Vandstandsstigning ved Harboøre (meter)	Gældende		Kilde
		Fra år	Til år	
Median for RCP4.5	0,4	1986-2005	2081-2100	Olesen et al. 2014, fratrukket landhævning
Median for RCP8.5	0,6	1986-2005	2081-2100	Olesen et al. 2014, fratrukket landhævning
95-percentil for RCP8.5	1,7	2000	2100	Grinsted et al. 2015, værdi for Esbjerg
95-percentil for højt scenarie (nyt studie, global middelværdi)	2,4	2000	2100	Bamber et al. 2019

Litteratur

Olesen et al. 2014:

Martin Olesen, Kristine Skovgaard Madsen, Carsten Ankjær Ludwigsen, Fredrik Boberg, Tina Christensen, John Cappelen, Ole Bøssing Christensen, Katrine Krogh Andersen, Jens Hesselbjerg Christensen (2014): Fremtidige klimaforandringer i Danmark, DMI DKC rapport 14-06

https://www.dmi.dk/fileadmin/user_upload/Rapporter/DKC/2014/Klimaforandringer_dmi.pdf

Grinsted et al. 2015:

Grinsted, Jevrejeva, Riva, Dahl-Jensen (2015), Sea level rise projections for Northern Europe under RCP8.5, Clim. Res., doi:10.3354/cr01309 <https://www.glaciology.net/publication/2015-08-25-sea-level-rise-projections-for-northern-europe-under-rcp8-5/>

Bamber et al. 2019:

Jonathan L. Bamber, Michael Oppenheimer, Robert E. Kopp, Willy P. Aspinall, Roger M. Cooke, Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment, Proceedings of the National Academy of Sciences May 2019, 201817205; DOI: 10.1073/pnas.1817205116

<https://www.pnas.org/content/early/2019/05/14/1817205116>

A.2 DMI's beskrivelse af klimadata

Filer:

README.1st - denne fil!

Klimanormaler for Positionen ved Høfte 42, fra Klimagrid Danmark. Udviklet for perioden 1989-2008 (20 års). Normalerne er glattet med et 35-dages-vindue. Kanteffekter er undgået. Daglige værdier - dvs 366 værdier - en for hver dag i et normalår. Temperaturenheden er grader C, precipitation (nedbør) er i mm/dag, og Makkink potentiel evapotranspiration er i mm/dag:

```
KGDK_precip_normal_1989-2008_Høfte_42.csv
KGDK_T_normal_1989-2008_Høfte_42.csv
KGDK_PET_normal_1989-2008_Høfte_42.csv
```

Bias-Adjusted CORDEX model-filer for tiden (1989-2100). Bias er korrigeret ved at finde korrektions-faktoren (en addend for temperaturer og en multiplikativ faktor for nedbør og PET) for hver dag i normalperioden på basis af 35-dages glattede normalværdier og ligeledes 35-dages glattede modelværdier for hver af årets 366 dage. Korrektionsfaktoren blev derefter påført alle dage i alle år frem til 2100. I hver fil er der, udover år, dag, og måned, tre kolonner med den pågældende variabel fra en 'lav' model, en 'middel' model og en 'høj' model, og tre kolonner for det samme men glattet med et rullende 7-dages vindue. Lav, Middel og Høj refererer til tre CORDEX modeller identificeret udfra deres lave, middel og høje nedbørsændring fra perioden 1970-2000 til 2070-2100. Fra de tre identificerede modeller blev derefter temperaturen, nedbøren og globalstrålingen hentet, og Makkink PET beregnet.

PET er beregnet efter Makkink-formeln og er således givet af temperatur og overflades globalstråling. Makkink er beregnet på grundlag af temperaturer der er rettet ind til temperatur-normalen - korrektionen er påført alle model-temperaturer dag for dag frem til 2100. Globalstrålingen er taget direkte fra de tre identificerede modeller og der er ikke påført noget korrektion. PET blev derefter beregnet. Til sidst blev PET yderligere rettet ind til den observerede PET normal.

```
bias_adjusted_temperature_1989-2100_Høfte_42.csv
bias_adjusted_precipitation_1989-2100_Høfte_42.csv
bias_adjusted_Makkink_1989-2100_Høfte42.csv
```

Three plots, showing the evolution of bias-adjusted T, precipitation and Makkink PET between 1989 and 2100:

fig_T.png
fig_precip.png
fig_Makkink.png

On the plots the red curve is for the 'low precip change model', green is for 'mid' and blue is for 'high'. As the shown curves are 5-year running means some p

Spørgsmål kan rettes til Peter Thejll på DMI: pth@dmi.dk

22 Maj 2019

----- SLUT -----