

Klimaeffekter på hydrologi og grundvand (Klimagrundvandskort)

Hans Jørgen Henriksen, Anker Lajer Højberg, Lauren Paige Seaby, Peter van der Keur,
Simon Stisen, Lars Trolborg, Torben O. Sonnenborg &
Jens Christian Refsgaard

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



GEUS

Klimaeffekter på hydrologi og grundvand (Klimagrundvandskort)

Hans Jørgen Henriksen, Anker Lajer Højberg, Lauren Paige Seaby, Peter van der Keur,
Simon Stisen, Lars Trolborg, Torben O. Sonnenborg & Jens Christian Refsgaard

Klimaeffekter på hydrologi og grundvand (Klimagrundvandskort)

Hans Jørgen Henriksen, Anker Lajer Højberg, Lauren Paige Seaby, Peter van der Keur,
Simon Stisen, Lars Trolborg, Torben O. Sonnenborg & Jens Christian Refsgaard



Datablad

Titel:	Klimaeffekter på hydrologi og grundvand (Klimagrundvandskort)
Forfattere:	Hans Jørgen Henriksen, Anker Lajer Højberg, Martin Olsen, Lauren P. Seaby, Peter van der Keur, Simon Stisen, Lars Troldborg, Torben O. Sonnenborg og Jens Christian Refsgaard, GEUS.
Udgiver:	Koordineringsenhed for forskning i klimatilpasning Aarhus Universitet
URL:	http://kft.au.dk
Udgivelsesår:	2012
Redaktion afsluttet:	Juni 2012
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Om KFT:	Koordineringsenhed for forskning i klimatilpasning (KFT) er etableret under regeringens strategi for tilpasning til klimaændringer i Danmark. KFT består af Aarhus Universitet, Danmarks Tekniske Universitet (DTU), Københavns Universitet (KU), Roskilde Universitet, De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) samt Danmarks Meteorologiske Institut (DMI). KFT's sekretariat har adresse ved DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. KFT skal fremme tværgående videnopbygning inden for forskning i klimatilpasning samt i klima og klimaeffekter relevant for klimatilpasning og indgå i forskningspolitiske netværk for at tilgodese dette og inddrage erfaringer fra internationale klimarelaterede aktiviteter. KFT skal sikre, at data og forskningsresultater er til rådighed for forskningsmiljøerne, samfundet og de sektorer, som skal udmønte konkrete tilpasningsinitiativer. KFT kommunikerer blandt andet igennem Miljøministeriets www.klimatilpasning.dk
Emneord:	Klimatilpasning, følsomhed, sårbarhed, kortlægning
Sideantal:	85
Internetversion:	Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) på Miljøministeriets hjemmeside http://www.klimatilpasning.dk og KFT's hjemmeside http://kft.au.dk

Indholdsfortegnelse

Forord	4
Ordliste	5
1. Resumé	7
1.1 Hovedresultater vedr. de fire leverancer.....	7
1.2 Metodik og usikkerhedsvurdering	9
1.3 Kortfattet anbefaling til brugen af Klimagrundvandskort.....	10
2. Introduktion til leverancer	12
2.1 Formål	12
2.2 Målgruppe for projektet	12
2.3 Projektoutput: de fire leverancer	12
2.4 Om troværdighed og usikkerhed på Klimagrundvandskort	13
3. Metodik til vurdering af klimaændringer effekter på grundvand	17
3.1 Klimamodel simuleringer.....	18
3.2 Bias korrektion.....	19
3.3 Hydrologisk modelanvendelse	22
3.4 Vandbalance vurdering	23
3.5 Model setup og kalibrering	24
3.6 Simuleringer og dataudtræk for produktionskørsler.....	25
3.7 Usikkerhedsvurdering.....	25
4. Resultater	28
4.1 Resultater af usikkerhedsanalyser	28
4.1.1 Inputusikkerheder	28
4.1.2 Parameterusikkerhed	31
4.1.3 Resultater af følsomhedsanalyser.....	32
4.1.4 Parameterusikkerhed og afhængighed af dybden til grundvandsspejlet.....	37
4.2 Bag om forskelle i nedbørsændringer for tør, median og våd klimamodel.....	39
4.3 Resultater for de fire leverancer.....	41
4.4 Vurdering af ændringer i klimainputs signifikans	46
5. Referencer	48
Appendix 1- Beskrivelse af produktionskørsler	50
Appendix 2 Usikkerhedsanalyser	53
Appendix 3 Resultater for hele landet af de fire leverancer	62
Appendix 4: Resultater for hele landet i tabel form	79

Forord

Klimaeffekter på hydrologi og grundvand (Klimagrundvandskort) er finansieret af KFT, Klima- og Energiministeriet og De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS). Projektet blev påbegyndt i august 2010 og afsluttet i juni 2012.

Projektet har haft en følgegruppe bestående af Louise Grøndahl, DMI (nu Naturstyrelsen), Bent Andersen og Svend Binnerup, Aarhus Universitet.

Anledningen til iværksættelsen af Klimagrundvandskort er et behov for screening i forhold til klimaeffekter på grundvandsstand og grundvandsdannelse.

Målgruppen er i første omgang fagfolk i kommuner, vandselskaber, regioner, stat, rådgivere mm., der arbejder med klimatilpasning.

Ordliste

DBS-korrektion	Distribution Based Scaling, histogram eller intensitetsbaseret korrektion. DBS-korrektion benytter statistisk dobbelt gamma funktion til at bias-korrigere signalet fra klimamodellen i forhold til kontrolperiodens observerede data. Ved metoden sikres det at både middelværdi og spredning er bevaret vurderet på sæsonbasis og domænebasis (de syv DK model delområder) for kontrolperioden 1991-2010 (Seaby et al., in prep.). Efterfølgende processeres referenceperioden (1961-1990) og fremtidig periode (2021-2050) ved hjælp af samme dobbelt gammafunktion.
DK model	Den nationale vandressource model (DK model) er en detaljeret landsdækkende integreret grundvands- overfladevandsmodel der beskriver samtlige komponenter i ferskvandskredsløbet dvs. hvordan nedbør og fordampning giver anledning til overfladisk afstrømning og nedsivning fra rodzonen og til grundvand. Herfra afstrømmer det til dræn, vandløb, søer og hav eller indvindes til husholdninger, industri/erhverv og markvanding. DK model er opbygget i 0,5x0,5 km net med i størrelsesorden 10 beregningslag for Danmark dækkende 43.000 km ² og består af syv domæne model (område modeller) for hhv. Sjælland, Sydhavnsøerne, Fyn, Syddjylland, Midtjylland, Nordjylland og Bornholm. Modellen udnytter de fleste af de data, der foreligger i de nationale databaser vedr. geologi, jordart, jordtype, topografi, klima og hydrologi, og er opbygget i MIKE SHE/MIKE 11 koden (www.vandmodel.dk), og er senest opdateret med resultater fra kortlægningen af grundvandet.
ENSEMBLES	Europæisk projekt afsluttet i 2009 hvor et dusin europæiske forskningsinstitutioner foretog dynamiske simuleringer med regionale klimamodeller med 25 km opløsning koblet til globalmodeller sva- rende til SRES (Special Report on Emission Scenarios) A1B sce- nariet, der er et mid-range scenarie for fremskrivningen af driv- husgasser jf. IPCC. Resultaterne af ENSEMBLES er lagret ved DMI i en database der indeholder omkring 130 forskellige meteo- rologiske oplysninger på daglig basis (eller timebasis). Data herfra er anvendt til beregning af nedbør, temperatur og fordampning på daglig basis for et 25 km grid for Danmark for en halv snes regio- nale og globale modeller (http://ensemblesrt3.dmi).
GCM	General Circulation Model (også kaldt Global Climate Model) er en numerisk repræsentation af klimasystemet incl. land-overfladen, hav is og atmosfære-ocean processer der beskriver fysiske, kemi- ske og biologiske processer og variable og deres interaktion og feedback. GCM'ere foretager beregninger med horisontale bereg- ningsceller på 200-300 km som benyttes som input til regionale klimamodeller (se RCM).

JUPITER databasen	GEUS's landsdækkende boringsdatabase for grundvands-, drikkevands-, råstof-, miljø- og geotekniske data. JUPITER databasen indeholder over 240.000 boringer. Derudover indeholder den over 35.000 vandindvindingsanlæg med informationer om bl.a. oppumpede vandmængder, pejlinger og tilladelser til vandindvinding).
Median klimamodel	Den midterste GCM/RCM (~ middel ændringen) af i alt ni analyserede klimamodeller fra ENSEMBLES, vurderet i forhold til effekten af klimaændringer på ændret grundvandsstand og grundvandsdannelse. Ud fra ni kombinationer af RCM og GCM på basis af Sjælland og Ringkøbing Fjord oplandet er udvalgt ECHAM-SMHI modellen (bestående af den globale klimamodel ECHAM fra det tyske Max Planck Institut kombineret med SMHI's RCA3 regional model). Median klimamodellen giver dermed en fremskrivning af nedbør, temperatur og fordampning der resulterer i en middel stor tilvækst i grundvandsdannelse og afstrømning for perioden 2021-2050 i forhold til 1961-1990.
PEST	PEST er en gradientbaseret, ikke lineær invers optimeringsrutine (Doherty et al., 2004). PEST er anvendt til kalibreringen af DK model til parameteroptimering hvor der typisk er optimeret på rod-dybde, hydraulisk ledningsevne for sand og ler, dræn tidskonstant, vandløbslækage og magasintal. Ved hjælp af invers optimering fås et estimat af de enkelte parametre der indgår i analysen ud foreliggende observationsdata og en valgt objektivfunktion, der vægter de kvantitative kalibreringskriterier (fx residual afvigelse og middelfejl på trykniveau og afstrømning osv.). Desuden fastlægges fx nedre og øvre konfidensgrænser (fx 95 %) ligesom indbyrdes afhængighed mellem parametre kan analyseres.
RCM	Regional climate model. En regional klimamodel benytter randbetingelser fra en GCM, og laver mere detaljerede beregninger for en region (fx Europa og Nordatlanten) med en opløsning på 12 eller 25 km. Et eksempel på en RCM er DMI's HIRHAM model.
Våd og Tør klimamodel	Den hhv. vådeste og tørreste GCM/RCM (~ den med max og min stigning af grundvandstand og grundvandsdannelse for Sjælland og Ringkøbing Fjord oplandet) af i alt ni analyserede klimamodeller fra ENSEMBLES. Våd klimamodel udgøres af ECHAM fra det tyske Max Planck Institut kombineret med DMI's HIRHAM regional model. Tør klimamodel udgøres af ARPEGE og RM5.1 regional model fra National Centre of Met. Research, CNRM i Frankrigt. Våd og Tør klimamodel udspænder dermed største og mindste stigning i grundvandsstand og grundvandsdannelse for 2021-2050 i forhold til referenceperioden 1961-1990. De har omtrent samme årsnedbør for referenceperioden, men store forskelle på nedbørsmængden for den fremtidige periode.

1. Resumé

1.1 Hovedresultater vedr. de fire leverancer

Beregninger af ændringer i grundvandstand og grundvandsdannelse for den nære fremtid 2021-2050 i forhold til referenceperioden 1961-1990 viser væsentlige ændringer i såvel grundvandsdannelsen som grundvandsspejlet efter fremskrivning med tre forskellige klima modeller for Danmark. Der er på Klimagrundvandskort beregnet ændringer med klima, der forudsiger en hhv. stor (*våd klimamodel*), middel (*median klimamodel*) og lille (*tør klimamodel*) ændring fra referenceperioden til fremtiden. De tre klimamodeller er anvendt med henblik på tilvejebringelse af et robust screeningsgrundlag for ændringer i grundvandsdannelse og grundvandsstand, herunder geografiske variationer der afhænger af geologiske forhold, jordbundstype, arealanvendelse og fx dybde til grundvandsspejl.

Screeningen har omfattet fire leverancer med Klimagrundvandskort (i 500 x 500 meters opløsning) for Danmark. Leverancerne beskriver ændringer i: (1) middel grundvandsdannelse (30-årig periode), (2) typisk lav årlig grundvandsdannelse (der forekommer en gang hvert 10. år), (3) middel grundvandstand og (4) typisk høj grundvandsstand (største 5 døgnmiddel der forekommer hvert 10. år). Samtidig er der for kontrolperioden 1991-2010 udarbejdet kort, der viser de absolutte størrelser for grundvandsdannelse og dybde til grundvandsspejl. Der foreligger således et grundlag for samlet at vurdere ikke blot ændringer men samtidig hvorvidt disse ændringer vil give særlige problemer set i forhold til fx dybden til grundvandsspejlet eller den aktuelle grundvandsdannelse, og dermed pege på behov for klimatilpasning.

For første gang er der tilvejebragt landsdækkende kort over klimaeffekter på grundvandsstand og grundvandsdannelse. Man kan på Klimagrundvandskort på portalen zoome ind på forskellige områder og danne sig et overblik over forventede konsekvenser og variationer i konkrete områder, og samtidig vurdere robustheden af fremskrivningen med mulighed for sammenligning af fremskrivningen for hhv. våd, median og tør klimamodel. Median klimamodel giver i forhold til ENSEMBLES datasættet et centralt skøn for konsekvenser på grundvand, mens våd og tør klimamodel udspænder den fulde variation for de forskellige klimamodeller.

De beregnede kort viser stor geografisk forskel på grundvandsdannelsen hvor nogen områder har stor grundvandsdannelse (> 200 mm/år) og andre områder har meget lille grundvandsdannelse (< 50 mm/år). På samme måde er der meget stor geografisk variation på dybden til det øvre grundvandsspejl fra mere end 10 meter, til under en meter for kontrolperioden 1991-2010. Det har stor betydning for hvor følsomme de forskellige områder er overfor de vurderede ændringer i grundvandsdannelse og grundstand.

I tabel 1.1 er resultater for de fire leverancer sammenfattet ud fra nærværende rapports landsdækkende Klimagrundvandskort med dels absolutte størrelser for kontrolperioden (1991-2010), og dels ved ændringer for hhv. tør, median og våd klimamodel for perioden 2021-2050 i forhold til referenceperioden 1961-1990.

Tabel 1.1 Sammenfatning af hovedresultater for A1B emissionsscenarioet for hhv. absolutte størrelser for kontrolperioden 1991-2010 og ændringer for de fire leverancer for hhv. våd, median og tør klimamodel for 2021-2050 i forhold til referenceperioden 1961-1990. %-tal er i forhold til hele Danmarks areal.

A1B Emissionssce- nariet	Ændringer		Ændringer		Ændringer	
Absolutte Størrelser (observations periodens data 1991-2010)	Våd klimamodel		Median klimamodel		Tør klimamodel	
	2021-50 versus 1961-90		2021-50 versus 1961-90		2021-2050 versus 1961-90	
Middel grundvands- dannelse						
0-25 mm/år: 35%	≤ 0 mm/år	25%	≤ 0 mm/år	46%	≤ 0 mm/år	78%
25-100 mm/år: 20%	0-20 mm/år	44%	0-20 mm/år	35%	0-20 mm/år	21%
100-200 mm/år: 14%	20-40 mm/år	8%	20-40 mm/år	10%	20-40 mm/år	1%
200-350 mm/år: 15%	40-100 mm/år	15%	40-100 mm/år	8%	40-100 mm/år	0%
> 350 mm/år: 16%	> 100 mm/år	8%	> 100 mm/år	1%	> 100 mm/år	0%
Typisk lav grundvands- dannelse						
0-25 mm/år: 37%	≤ 0 mm/år	21%	≤ 0 mm/år	45%	≤ 0 mm/år	72%
25-100 mm/år: 20%	0-20 mm/år	45%	0-20 mm/år	38%	0-20 mm/år	23%
100-200 mm/år: 15%	20-40 mm/år	11%	20-40 mm/år	9%	20-40 mm/år	3%
200-350 mm/år: 16%	40-100 mm/år	18%	40-100 mm/år	7%	40-100 mm/år	1%
> 350 mm/år: 12%	> 100 mm/år	6%	> 100 mm/år	1%	> 100 mm/år	0%
Middel grundvands- stand 1991-2010:						
≤ 0 m 1%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	2%
0 til 1 m 40%	Fald 0 til 1 m	1%	Fald 0 til 1 m	1%	Fald 0 til 1 m	85%
1 til 3 m 20%	Stign 0 til 0,5 m	50%	Stign 0 til 0,5 m	67%	Stign 0 til 0,5 m	12%
3 til 10 m 21%	Stign 0,5 til 1 m	17%	Stign 0,5 til 1 m	20%	Stign 0,5 til 1 m	0%
> 10 m 18%	Stigning > 1 m	33%	Stigning > 1 m	12%	Stigning > 1 m	0%
Typisk høj grundvands- stand						
≤ 0 m 20%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	13%
0 til 1 m 37%	Fald 0 til 1 m	1%	Fald 0 til 1 m	7%	Fald 0 til 1 m	61%
1 til 3 m 11%	Stign 0 til 0,5 m	50%	Stign 0 til 0,5 m	67%	Stign 0 til 0,5 m	25%
3 til 10 m 17%	Stign 0,5 til 1 m	12%	Stign 0,5 til 1 m	15%	Stign 0,5 til 1 m	0%
> 10 m 15%	Stigning > 1 m	37%	Stigning > 1 m	11%	Stigning > 1 m	1%

Tendenserne for beregnede ændringer i grundvandsdannelsen følger i store træk grundvandsdannelsens fordeling, sådan at områder der i forvejen har stor grundvandsdannelse også har de største ændringer i grundvandsdannelsen for middel og typisk lav grundvandsdannelse dog med store geografiske variationer fra over 100 mm/år til under 20 mm/år. En stor del af landet får et fald i grundvandsdannelsen, ikke kun for tør klimamodel, men også i tilfælde hvor der sker større fordampning eller ændret dræning i fremtidigt kli-

ma, der lokalt kan påvirke den geografiske fordeling af grundvandsdannelsen til beregningsslag 2..

Ændringen i grundvandsstanden følger i nogen grad fordelingen af dybden til grundvandspejlet. Den våde klimamodel giver stigninger i grundvandsstanden på mellem nul og en meter for en stor del af landet typisk hvor grundvandsspejlet er beliggende forholdsvis tæt på terræn. Større områder har stigninger på over en meter, og en del områder har markante stigninger i grundvandsstanden på over fem meter, typisk hvor grundvandsspejlet i forvejen står dybt (> 10 meter under terræn). Median klimamodel giver i sammenligning hermed lidt det samme landsdækkende billede, blot med mere moderate stigninger i grundvandspejlet i middel, med væsentligt færre områder med markante stigninger over to til tre meter, og med en større del af landet med moderate stigninger i intervallet nul og en meter. Der ses ikke fald i grundvandsstanden for våd eller median klimamodel. Tør klimamodel giver et fald i grundvandsstanden for en stor del af landet på mellem nul og en meter, med enkelte undtagelser bl.a. Bornholm og kystnære dele af Nordvestjylland.

1.2 Metodik og usikkerhedsvurdering

Vurderingen af klimausikkerhed (input fra globale og regionale klimamodeller) er gennemført på baggrund af ni udvalgte kombinationer af globale og regionale klimamodeller fra ENSEMBLES datasættet ved kørsler med alle ni klimamodeller for Sjælland og Ringkøbing Fjord oplandet. Denne analyse har vist, at ECHAM-DMI kombinationen repræsenterer den model af de ni udvalgte kombinationer, der generelt giver den største stigning i grundvandsstand og grundvandsdannelse. ECHAM-SMHI giver en median stigning, og ARPEGE-CNRM den mindste stigning (faktisk et fald). De tre udvalgte kombinationer giver omtrent samme nedbør for referenceperioden 1961-1990 med ca. 700 mm/år for Sjælland og 850 mm/år for Midtjylland, men meget forskellig fremskrivning for 2021-2050, hvor ECHAM-DMI giver en stigning til 850 mm/år for Sjælland og 1000 mm/år for Midtjylland. Med ECHAM-SMHI er stigningen omtrent det halve, mens ARPEGE-CNRM giver en omtrent uændret nedbør for den fremtidige periode i forhold til reference perioden.

Usikkerheden i de beregnede leverancer som følge af usikkerheden på modelparametrene er belyst ved en følsomhedsanalyse for Sjælland og Ringkøbing Fjord oplandet, hvor udvalgte parametre, beskrivende forskellige dele af grundvandssystemet, er ændret til deres nedre 95 % konfidensgrænser bestemt ved modelkalibreringen. Analysen viser, at hydraulisk ledningsevne samt rodzonedybden er de mest følsomme parametre for simulerede ændringer af grundvandsstand og grundvandsdannelse. Ved kombination af disse to parametre er usikkerheden større end for de to parametre alene, men mindre end summen af usikkerhederne for de to parametre enkeltvis. Der ses kun en relativ svag korrelation mellem simulerede ændringer og dybden til grundvandsspejlet, og det er fortrinsvis i områder, hvor grundvandsspejlet står tæt på terræn, at parameterusikkerheden når samme størrelse som input usikkerheden udspændt af de tre udvalgte globale og regionale klimamodeller, og der er ikke nogen entydig forskel på vstdanske sand- (Ringkøbing Fjord oplandet) og østdanske ler områder (Sjælland). I områder med dybde til grundvandsspejlet større end et par meter dominerer input usikkerheden som væsentligste kilde til usikkerhed på Klima-grundvandskort.

Det har ikke været muligt ud fra simple relationer at kvantificere usikkerheden med hensyn til parametre for de øvrige fem områder / model domæner. Det er derfor valgt indirekte at tage højde for parameterusikkerheden ved at vise resultater på Klimagrundvandskort af beregnede ændringer med 1 meter intervaller (grundvandstand) og 20 mm/år intervaller (grundvandsdannelse).

Det har ikke været muligt at kvantificere usikkerheden på de absolutte størrelser for kontrolperioden 1991-2010 (grundvandsdannelse og grundvandstand). Der foreligger ikke et tilstrækkeligt datagrundlag i form af bl.a. pejlinger til en sådan kvantificering. Det er derfor vigtigt, at man bruger resultaterne med omtanke og tjekker modellens beskrivelse af fx dybden til grundvandsspejlet, da denne variabel har stor betydning for, om modellens forudsætninger er opfyldt i et givet område. Det kan man fx gøre ved at sammenligne DK-modellens beskrivelse med lokale pejledata, såfremt disse er repræsentative for modellens skala (500 m) og i øvrigt ikke er påvirket af nærliggende indvindinger.

1.3 Kortfattet anbefaling til brugen af Klimagrundvandskort

Generelt anbefales det at bruge resultaterne med omtanke ved at søge efter helheder og tendenser, i stedet for ensidigt at fokusere på beregnede ændringer for et enkelt pixel i et enkelt temakort. Brug kortene integreret og i sammenhæng med lokal viden, inddrag pejlinger og kortlægningsresultater i det omfang sådanne foreligger. Anvend aldrig resultaterne til andet end screening.

Ved anvendelse af resultater skal man tage højde for, at hvis modellens forudsætninger ikke er opfyldte, er de simulerede ændringer som følge af klimaændringer ikke korrekte:

- Hvis dybden til grundvandsspejlet afviger fra den modellerede dybde til grundvandsspejlet for 1991-2010, vil ændringerne som følge af klimaændringer formentlig være unøjagtige
- Det er antaget at samtlige områder, hvor grundvandsspejlet står mindre end 0,5 meter under terræn er drænede. Stigningen kan derfor blive større end vurderet på Klimagrundvandskort, såfremt et område med potentielt behov, ikke er drænet
- For byområde kan resultater primært anvendes til meget grove kvalitative vurderinger af, om grundvandsspejlet vil stige eller falde
- Tæt på vandløb og havet vil der kunne forekomme opstuvning i dræn, grøfter og vandløb, som betyder, at grundvandsspejlet kortvarigt eller i takt med havstigningen kan stige op over det niveau, modellen vurderer. Denne dynamik, og havstigninger er ikke indbygget i modellen. Det er ikke indregnet at dræn evt. er sat ud af funktion som følge af opstuvning fra nedstrøms vandløb
- Tæt på større vandindvindinger kan der forekomme tidslige variationer, som ikke er beskrevet af modellen. Pejlinger her kan ikke bruges til at vurdere modellen.
- Tynde lokale ler- og sandlag, makroporer, sprækker kan lokalt give ændringer i trykniveau og grundvandsdannelse, som modellen ikke beskriver

- Geologisk heterogenitet på lokal (500 m) skala er ikke inddraget i de usikkerhedsintervaller resultater er præsenteret med, som er vurderet på regional (domæne) skala. De usikkerheder der er vurderet ud fra følsomhedsanalyser giver en god indikation af regionale forhold men kan samtidig undervurdere usikkerheder på helt lokal skala

2. Introduktion til leverancer

2.1 Formål

Det langsigtede udviklingsmål med projektet er at bidrage til udvikling af et landsdækkende risikostyringsværktøj, indeholdende information om hvordan grundvandsforhold og vandstande i vandløbssystemer kan forventes at ændre sig og blive under et fremtidigt klima.

Der har været tre projektmål. *For det første* har målet været at vurdere, hvordan den nuværende grundvandsstand og grundvandsdannelse kan forventes at ændre sig for A1B emissions scenariet for perioden 2021-2050 for hele landet, i forhold til referenceperioden 1961-1990 (Denne del er finansieret af KFT). *For det andet*, har projektmålet været at gennemføre en analyse af input og parameterusikkerheder ud fra studier i to områder (Sjælland og Midtjylland). Denne del er finansieret af GEUS og Klima- og Energiministeriet. *For det tredje*, har projektmålet været at opstille et koncept for beregning af vandstand og afstrømning i vandløb, herunder risiko for oversvømmelser af lavtliggende områder forårsaget af en kombination af høj grundvandsstand, stor vandløbsafstrømning og stigende havvandspejl. Denne del har måttet nedprioriteres af hensyn til færdiggørelsen af de to øvrige projektmål. Dele af aktiviteten videreføres i 2012 med finansiering fra KFT.

2.2 Målgruppe for projektet

Målgruppen for Klimagrundvandskort er først og fremmest vandforvaltere og planlæggere i kommuner og vandselskaber. Dernæst har folk, der arbejder med klimatilpasning i regioner, stat og blandt rådgivere, en interesse i resultaterne på områder som klimatilpasning, vandressourceforvaltning, grundvandsbeskyttelse og vandplaner. Endelig har brugere af klimatilpasningsportalen (www.klimatilpasning.dk), hvor resultaterne fra projektet sammen med metadata er tilgængelig, en interesse i resultaterne. Hensigten er anvendelse i forbindelse med screening af klimaeffekter i forhold til grundvandsstand og grundvandsdannelse med henblik på fysisk sårbarhedsvurdering.

2.3 Projektoutput: de fire leverancer

Det specifikke output fra projektet er modelberegnete værdier af grundvandsstand/grundvandsdannelse og vurderinger af deres usikkerhed præsenteret på følgende (landsdækkende) kort:

- Middel grundvandsstand for det øverste frie grundvandsspejl i det nuværende regime (1991-2010) og ændring heraf for A1B for perioden 2021-2050 i forhold til referenceperioden 1961-1990.
- En karakteristisk værdi for høj grundvandsstand (højeste 5-døgns grundvandsstand der overskrides i gennemsnit en gang hvert 10. år) i det øverste frie grundvandsspejl i det nuværende regime (1991-2010) og ændring heraf for A1B for perioden 2021-2050 i forhold til referenceperioden 1961-1990.

- Middel grundvandsdannelse i den dybde hvorfra grundvandsindvinding typisk foregår (modellag 2) i det nuværende regime (1991-2010) og ændring heraf for A1B for perioden 2021-2050 i forhold til referenceperioden 1961-1990.
- En karakteristisk værdi for lav grundvandsdannelse (laveste årlige grundvandsdannelse, der underskrides i gennemsnit hvert 10. år) i den dybde hvorfra grundvandsindvinding typisk foregår (modellag 2) i det nuværende regime (1991-2010) og ændring heraf for A1B for perioden 2021-2050 i forhold til referenceperioden 1961-1990.
- Usikkerheden på de angivne grundvandsstande og grundvandsdannelser vurderet i forhold til usikkerheder på forskellige klimamodelinput og parameterusikkerhed på *DK-model*.

2.4 Om troværdighed og usikkerhed på Klimagrundvandskort

Klimagrundvandskort belyser konsekvenser af klimaændringer og effekter på øvre grundvandsspejl og på grundvandsressourcen på screeningsniveau. Herved kan ændringer tænkes ind i klimatilpasningen og arealplanlægningen på et tidligt tidspunkt, og områder, hvor der er behov for mere detaljerede analyser, udpeges.

Klimagrundvandskort giver mulighed for at zoome ind på lokalområder og aflæse forventninger til hydrologiske konsekvenser af fremskrivninger af klimaændringer. Klimagrundvandskort præsenterer resultater fra tre forskellige kombinationer af globale og regionale klimamodeller, udvalgt blandt i alt ni modeller fra *ENSEMBLES* datasættet. Den ene af de tre modeller, våd klimamodel, er repræsentativ for de største ændringer i grundvandsforhold jf. dette datasæt. Den anden klimamodel, median klimamodel, er repræsentativ for en fremskrivning svarende til medianen af de ni modeller. Den tredje, tør klimamodel, er repræsentativ for de mindste ændringer (i visse tilfælde fald i grundvandsstanden). Klimamodelberegningerne er baseret på A1B emissionsscenariet med ændringer for 2021-2050 i forhold til referenceperioden 1961-1990. Man kan vælge, om man vil se på ændringer i middelgrundvandsstand, ændringer i en karakteristisk høj grundvandsstand, ændringer i middel grundvandsdannelse og ændringer i en karakteristisk lav grundvandsdannelse.

Med få klik på Klimagrundvandskort kan man således hente en detaljeret rapport i pdf format ned, hvor man for de enkelte pixels (500x500 meter) kan studere resultaterne. Rapporten vil omfatte simulerede hydrologiske konsekvenser for alle tre klimamodeller, tør klimamodel, median klimamodel og våd klimamodel, og samtidig indeholde oplysninger om absolute størrelser, fx dybden til grundvandsspejlet og grundvandsdannelsen i nu-perioden 1991-2010 (kontrolperioden). Det anbefales, at man ikke blot anvender median-ændringen men samtidig skeler til spændvidden på de hydrologiske konsekvenser, og dermed har et åbent øje for robustheden af vurderingerne.

Parameterusikkerheden er vurderet på basis af følsomhedsanalyser af de parametre, der har størst betydning ved simuleringen med DK-model. For to områder er der foretaget detaljerede analyser af parameterusikkerheden, henholdsvis oplandet til Ringkøbing Fjord (sandet vstdansk område) og Sjælland (leret østdansk område).

På samme måde kan man i områder, hvor der er relativt dybt til det øvre grundvandsspejl og samtidig er beregnet store ændringer i grundvandsspejlet, tjekke hvorvidt punktkildeforureninger beliggende tæt på det nuværende grundvandsspejl bliver påvirkede ved at umættede forhold skifter til mættede. Ændringerne i grundvandsspejlet er også et vigtigt input i forhold til vurderinger af indirekte effekter på grundvandskvaliteten; fx risiko for saltvandsindtrængning/optrængning, ændrede iltningsforhold og nikkelp problemer osv., som afhænger af grundvandsspejlets placering i forhold til bestemte geologiske lags beliggenhed eller i forhold til havniveauet.

Tilsvarende kan man ud fra Klimagrundvandskort for ændret grundvandsdannelse vurdere, om der vil ske en forøgelse eller en reduktion af grundvandsdannelsen. Denne ændring bør tænkes ind i klimasikringen af fx bæredygtig vandindvinding, grundvandsbeskyttelsen, vandplaner og areal- og infrastrukturplanlægningen. Ændringer i grundvandsdannelsen har desuden betydning for den kvalitetsmæssige bæredygtige ressource. Blot skal man huske, at en helhæjertet vurdering af den bæredygtige grundvandsressource samtidig forudsætter en nærmere analyse af, hvordan minimumsafstrømningen til vandløb og vådområder i sommerperioden påvirkes af klimaet. Klimagrundvandskort giver i første omgang ikke denne information. Ændringer i grundvandsdannelse og grundvandsstand kan dog give et første fingerpeg, om hvordan vandbalancen for disse magasiner bliver påvirket.

Det er vigtigt, at man bruger resultaterne med omtanke og evt. tjekker modellens beskrivelse af fx dybden til grundvandsspejlet, da denne variabel har stor betydning for, om modellens forudsætninger er opfyldt i et givet område. Det kan man gøre ved at sammenligne DK-modellens beskrivelse med evt. lokale pejledata, såfremt disse er repræsentative for modellens skala (500 m) og i øvrigt ikke er påvirket af nærliggende indvindinger. Resultater af detailkortlægningen, fx modelstudier, kan også inddrages. Det er særdeles vigtigt at erindre, at DK-modellen ikke bliver bedre end de data, den er kalibreret efter, og værdifulde data, fx pejlinger, skal derfor indberettes til GEUS til *JUPITER-databasen*, såfremt GEUS skal have mulighed for at indarbejde denne viden i næste opdatering af DK-modellen.

Klimagrundvandskort er baseret på hydrologiske modelberegninger med DK-modellen (www.vandmodel.dk). Denne model er særlig usikker i byområder, hvor forholdene er komplekse som følge af befæstede arealer, opfyldning, traceer med kloakker og regnvandsledninger, lokal afledning af regnvand osv., forhold, der ikke er detaljeret beskrevet i modellen. Varig havstigning, variationer i havvandspejl og opstuvning i de nedre vandløbsstrækninger tæt på udløb, opstuvning i dræn som følge af store afstrømninger og høje vandspejl i vandløb indgår heller ikke detaljeret i modellen. For områder tæt på kysten og tæt på vandløb kan der derfor forekomme vandspejlsændringer af kortere varighed, som Klimagrundvandskort ikke tager højde for. Resultaterne er repræsentative for et modelleret øvre grundvandsspejl med en 500 m numerisk model, og forholdene er derfor beskrevet forenklet for de øvre jordlag. I områder, hvor der forekommer lokale sekundære magasiner, der ikke er beskrevet af modellen, fx vandspejl, der opbygges i umættet zone over tynde lav-permeable lerlag, eller 'hængende vandspejl', som ikke kan beskrives af modellen, kan der lokalt forekomme afvigende resultater i forhold til beskrivelser på Klimagrundvandskort. Hvor der er stor topografisk variation indenfor et 500 m grid, bør man også have øje for, at det kan give nogle usikkerheder.

Data er vist som beregnede 'pixels' værdi fra DK-modellen uden yderligere filtrering, udjævning eller interpolation. I stedet er det valgt kun at vise data som intervalværdier (fx stigning i grundvandsstand på 1-2 meter eller stigning i grundvandsdannelse på 20-40 mm/år). De præsenterede intervaller er fastlagt ud fra usikkerhedsanalysen, dvs. afpasset de usikkerheder, der samlet er vurderet på den hydrologiske model. Generelt anbefales det at bruge resultaterne med omtanke ved at søge efter helheder og tendenser, i stedet for ensidig fokus på beregnede ændringer for et enkelt pixel i et enkelt temakort. Brug kortene integreret og i sammenhæng med lokal viden, inddrag pejlinger, og kortlægningsresultater i det omfang sådanne foreligger. Anvend aldrig resultaterne til andet end screening.

Ved anvendelse af resultater fra Klimagrundvandskort skal man tage højde for, at hvis modellens forudsætninger ikke er opfyldte, er de simulerede ændringer som følge af klimaændringer ikke korrekte og kan i så fald blot give et fingerpeg om grundvandsspejlet vil stige eller falde, hvorimod størrelsen af ændringen vil være behæftet med meget stor usikkerhed:

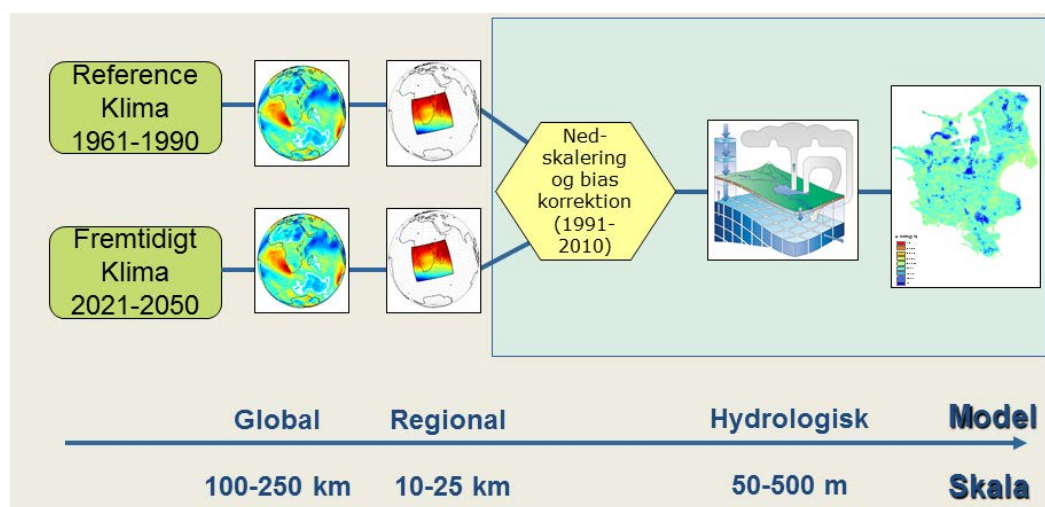
- Hvis dybden til grundvandsspejlet afviger fra den modellerede dybde til grundvandsspejlet for 1991-2010, vil ændringerne som følge af klimaændringer formentlig være unøjagtige. I så fald kan man evt. identificere nærliggende pixels, hvor dybden til grundvandsspejlet svarer bedre til fx lokale pejlinger, og inddrage den viden i en samlet vurdering (forudsat at disse pixels i øvrigt har samme arealanvendelse og jordtypeforhold).
- Hvis et område ikke er drænet (det er antaget at samtlige områder, hvor grundvandsspejlet står mindre end 0,5 meter under terræn er dræned), vil modellen evt. undervurdere en stigning i grundvandsspejlet som følge af klimaændringer, og stigningen kan derfor blive et interval højere end vurderet på Klimagrundvandskort
- Hvis man er i et byområde, vil resultater ikke kunne anvendes til andet end meget grove kvalitative vurderinger af, om grundvandsspejlet vil stige eller falde.
- Tæt på vandløb og havet vil der kunne forekomme opstuvning fx i drænsystemet og grøfter i stormflodssituationer og ved kraftige regnskyl, som betyder, at dybden til grundvandsspejlet kortvarigt kan stige op over det niveau, modellen vurderer. Denne dynamik er ikke indbygget i modellen. Modellen antager, at dræn er aktive en halv meter under terræn (på 500 meter skala).
- Tæt på større vandindvindinger kan der forekomme tidslige variationer, som ikke er beskrevet af modellen, fx i forbindelse med stop og start af pumper. Den variation er ikke beskrevet af modellen. Pejlinger her kan ikke bruges til at vurdere modellen.
- Tynde ler- og sandlag, makroporer og/eller sandvinduer i lerlag kan lokalt give ændringer i trykniveau og grundvandsdannelse, som modellen ikke beskriver. Resultater er kun troværdige, hvor den konceptuelle models forudsætninger er opfyldt.

- DK-modellen er med få undtagelser opstillet med ens parameterværdier over et helt domæne (fx den samme hydrauliske ledningsevne for moræner for hele Sjælland). Det betyder at konfidensgrænsen for en sådan parameter repræsenterer usikkerheden på gennemsnitsværdien af hydraulisk ledningsevne over hele domænet, og ikke usikkerheden på ledningsevne på lokal skal (fx 500 m grid). På grund af geologisk heterogenitet vil usikkerheden på ledningsevne, og hermed på grundvandsstand og grundvandsdannelse være betydelig større på lokal (500 m) skala end på regional (domæne) skala. Det betyder, at de usikkerheder der vurderes med ud fra følsomhedsanalyserne kan give en god indikation af regionale forhold og samtidig undervurdere usikkerheder på helt lokal skala.

3. Metodik til vurdering af klimaændringer effekter på grundvand

Klimaændringers effekter på hydrologi og grundvand baserer sig på en sammenligning mellem klimaet i en referenceperiode og et fremtidigt klima (figur 3.1). Der tages i denne rapport udgangspunkt i IPCC's A1B scenarie (2021-2050), som er et emissions scenarie. Som referenceperiode er anvendt 1961-1990 (IPCC, 2007; Christensen et al., 2009). Globale klimamodeller (General Circulation Models, GCM) kan foretage beregninger med horisontale beregningsceller på 200-300 km (fx ECHAM, ARPEGE, BCM, jf. figur 3.1). Dette beregningsnet, hvor Danmark er repræsenteret af en enkelt celle, er for grov til at sige noget meningsfuldt om andet end middeltemperaturer. Derfor benyttes resultater fra regionale klimamodeller, fra EU projektet ENSEMBLES, 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 (her benævnt DMI), der til beregninger af det danske klima opstilles, så den dækker det meste af Europa og Nordatlanten (Refsgaard, 2012).

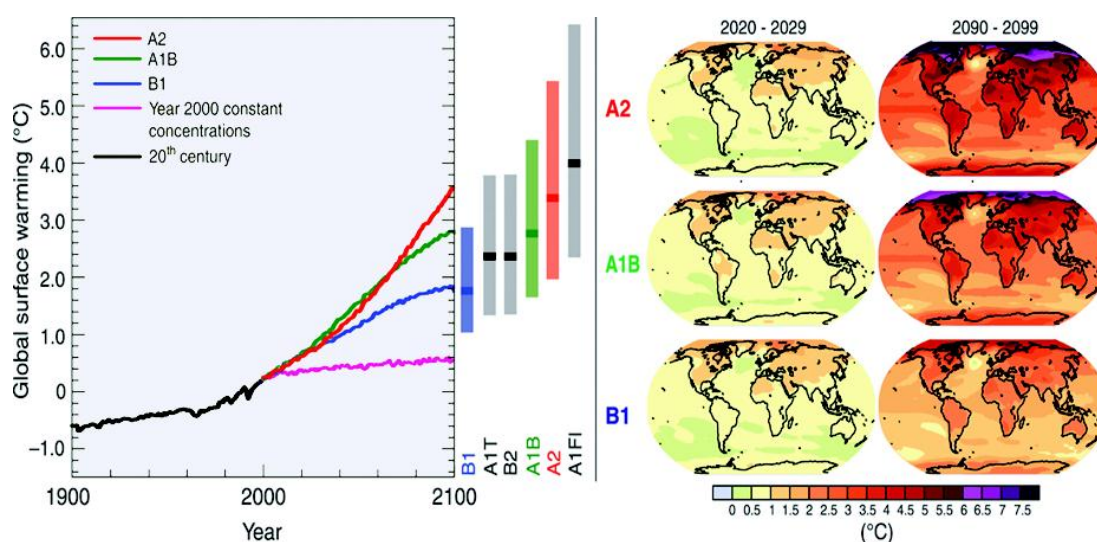
Klimamodellen sammenlignes først for kontrolperioden (1991-2010), hvor der foreligger observerede klimadata fra DMIs klimagrid (10/20 km grid data for dynamisk korrigeret nedbør, temperatur og referencefordampning). På nogle områder giver de forskellige klimamodeller ikke en særlig nøjagtig beskrivelse af kontrolperiodens klima. 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 korrektion (nedskalering og bias-korrektion), hvor det antages, at selv om de absolutte tal fra en klimamodel er fejlbehæftet, har den trods alt en vis evne til at beskrive, hvordan klimaet vil ændre sig. Vi antager, at bias korrektionen er den samme for hele den periode klimamodellen dækker. Vi kan derfor bestemme og korrigere for denne bias ud fra kontrolperiodens observerede klima for 1991-2010 hvor vi har data, og efterfølgende spole frem (til 2021-2050) og tilbage i tiden (til 1961-1990), uden systematiske afvigelser på de forskellige størrelser fx sæsonnedbør.



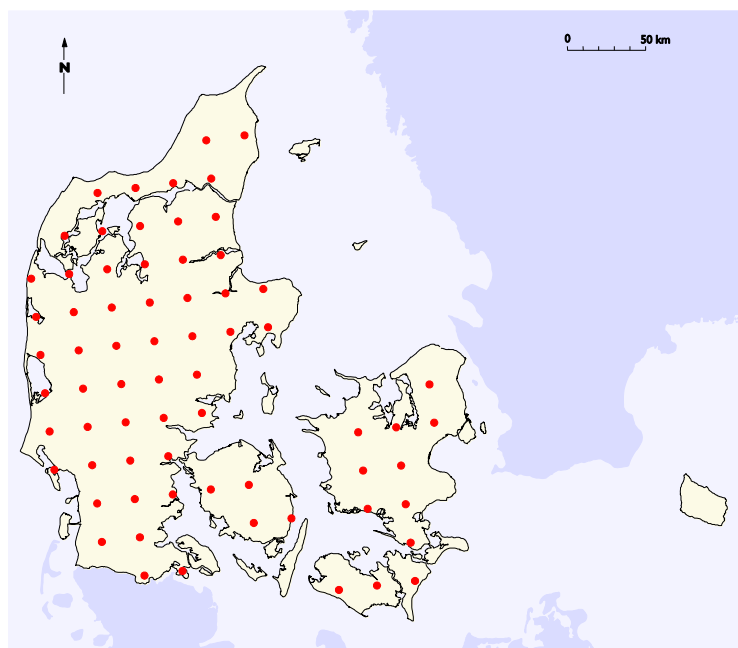
Figur 3.1 Metodik for beregning af klimaændrings effekter på hydrologi og grundvand

3.1 Klimamodel simuleringer

Det europæiske ENSEMBLES projekt blev afsluttet i 2009. Et dusin europæiske klimaforskningsinstitutioner gennemførte i et EU projekt simuleringer af klimaændringer med regionale modeller med 25 km opløsning, koblet til forskellige globalmodeller. Simuleringerne var dynamiske og dækkede perioden 1951-2100 svarende til SRES A1B scenariet, se figur 3.2 (IPCC, 2007; van der Linden and Mitchell 2009). A1B scenariet repræsenterer et mid-range scenarie for fremskrivningen af drivhusgasser jf. IPCC Special Report on Emission scenarios (SRES) (Nakicenovic et al. 2000). Så længe man kun ser frem mod 2050 giver A1B og A2 omtrent samme fremskrivning af den globale opvarmning, mens forskellene først viser sig for alvor mod dette århundredes slutning (figur 3.2).



Figur 3.2 Fremskrivning af global opvarmning (°C) er baseret på forskellige emissions scenarier. A1B er et middelhøjt scenarie med hensyn til CO₂ fremskrivning, sammenlignet med de kraftigere A2 og A1FI scenarier men mere moderat end B1, A1T og B2-scenarierne. (Kilde: van der Linden and Mitchell, 2009; IPCC, 2007)



Figur 3.3 25 km grid for Danmark (ENSEMBLES, <http://ensemblesrt3.dmi>)

Resultater fra ENSEMBLES er lagret ved DMI (<http://ensemblesrt3.dmi>). ENSEMBLES databasen indeholder omkring 130 forskellige meteorologiske oplysninger på daglig basis (eller timebasis). Data herfra er anvendt til beregning af nedbør, temperatur og fordampning på daglig basis for et 25 km grid for Danmark (se figur 3.3).

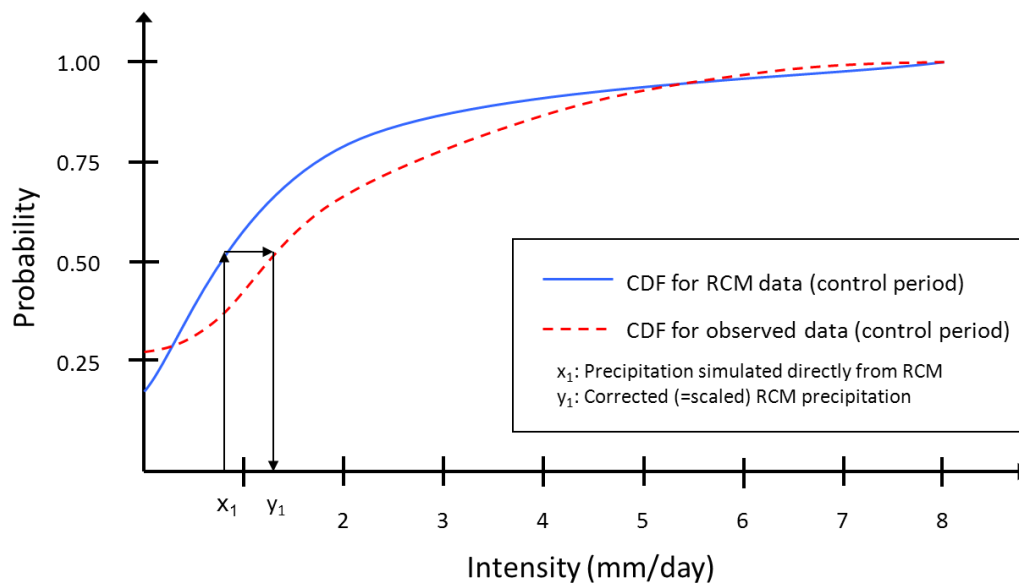
3.2 Bias korrektion

På grund af skalaforskelle og øvrige usikkerhedskilder kan resultaterne fra klimamodellerne ikke med tilstrækkelig nøjagtighed anvendes som direkte input til den hydrologiske model. Fx giver klimamodellerne en anden nedbør og temperatur end observeret såvel med hensyn til gennemsnitsværdier som med hensyn til variationer på månedsbasis (varians). Det er nødvendigt at korrigere for dette, før data anvendes som input i vandbalance-vurderinger og til vurdering af klimaeffekter på hydrologi og grundvand (Seaby et al., in prep).

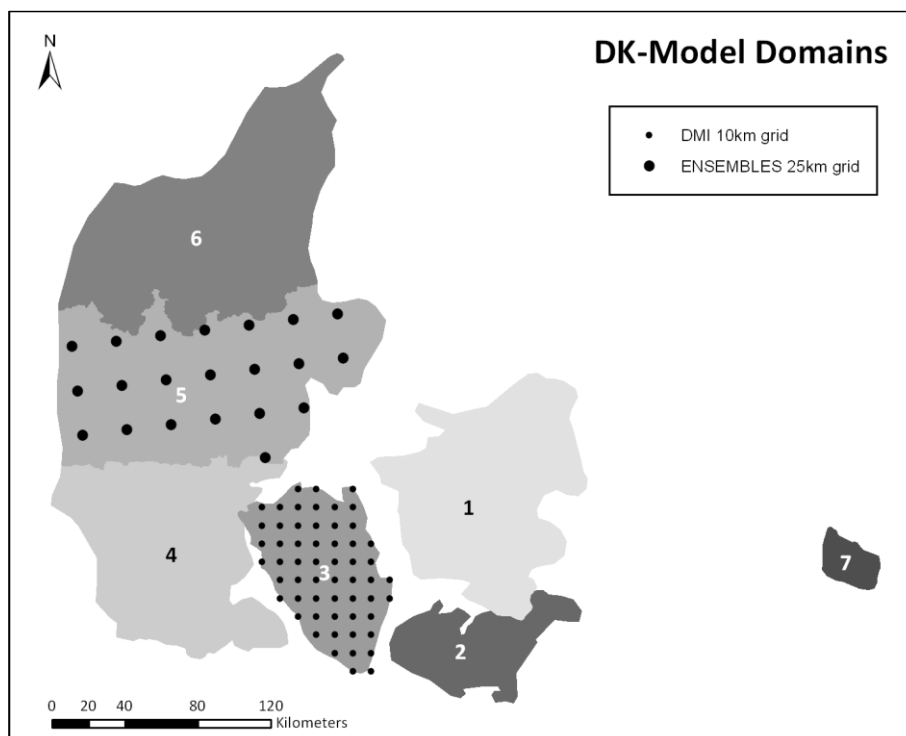
Der findes en række forskellige metoder, der kan anvendes. Typisk er anvendt 'delta-change' metoden (DC-korrektion), hvor der foretages korrektioner på månedsbasis ud fra sammenligning af klimamodel og observeret klima for kontrolperioden (Hay et al., 2000; van Roosmalen et al., 2007). For hver måned fastlægges korrektions-faktorer der multipliceres med observeret klima fra kontrolperioden med hensyn til beregning af fremtidige klimaforhold. Denne metode forudsætter imidlertid, at dynamikken i klimaet, fx sæson- og dagsvariationer og varighed af tørre perioder, er uændret, hvilket normalt er en brugbar antagelse, så længe man vurderer klimaeffekter på middel grundvandsstand og grundvandsdannelse over en flerårig periode (van Roosmalen et al., 2011).

På Klimagrundvandskort er opgaven imidlertid, udover at vurdere konsekvenser i form af middelværdier, også at give et bud på karakteristisk høj grundvandsstand (største 5-døgnsmiddel der overskrides hvert 10. år) og karakteristisk lav grundvandsdannelse (mindste årlige grundvandsdannelse der forekommer hver 10. år). I nærværende projekt er derfor anvendt en metode der 'bærer dynamikken' fra klimamodellen videre, den såkaldte 'distribution based scaling' (DBS-korrektion). Ved DBS-korrektion sikres det, at både middelværdi og spredning er bevaret (Piani et al., 2010; Yang et al., 2010; Seaby et al., in prep.). I det følgende er anvendt sæsonbestemte korrektionsfaktorer ud fra en statistisk dobbelt gamma fordelingsfunktion, der opstilles for de 7 modelområder, den hydrologiske model arbejder med, se figur 3.4 (Seaby et al., in prep).

Opstillingen af korrektionsfaktorer for DBS-korrektionen (figur 3.4 og 3.5) er foretaget ud fra kontrolperioden 1991-2010, hvor der foreligger observerede klimagriddata (10/20 km for nedbør, temperatur og fordampning) og klimamodelresultater for ni udvalgte GCM/RCM kombinationer fra ENSEMBLES datasættet. Med den derved fastlagte DBS-korrektions funktion, er der foretaget en processering af referenceperiodens (1961-1990) og den fremtidige periodes (2021-2050) klimainput ud fra ni udvalgte klimamodelkombinationer, baseret på tre GCM'ere og seks RCM'ere, se tabel 3.1.



Figur 3.4 Princippet i DBS-korrektion hvor data fra klimamodellen korrigeres i forhold til intensitetsfordeling. Figuren viser med blå kurve fordelingsfunktionen for den regionale klimamodel (RCM), og med rød stipleet linje fordelingsfunktionen for de observerede klimagrid data for kontrolperioden 1991-2010. Der benyttes dobbelt gamma funktion til at bias-korrigerer signalet fra klimamodellen (fra intensitet X_1 til intensitet Y_1) i forhold til kontrolperiodens observerede data. Denne funktion benyttes så efterfølgende for hhv. referencerperiodens RCM data (1961-1990) og fremtidsperiodens RCM data 2021-2050 (Seaby et al., in prep).



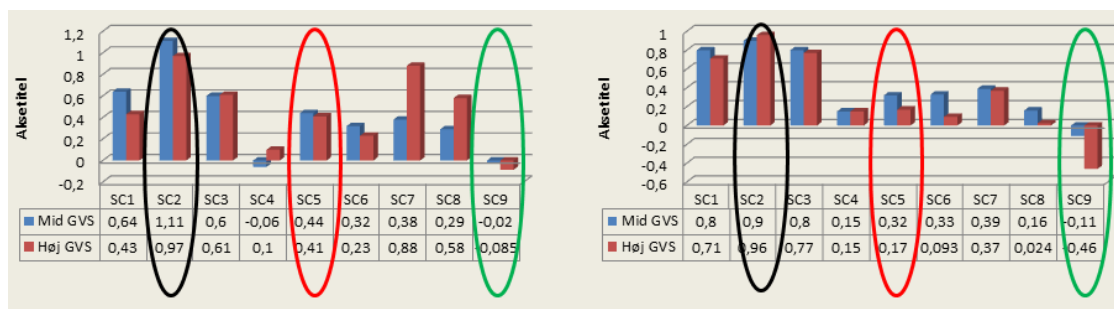
Figur 3.5 DK-model er opdelt i syv hydrologiske domæner, der anvender klimainput fra DMIs 10 km nedbørsgrid. Udfra 25 km klimamodelgrid (som vist for område 5) fra ENSEMBLES er der for hvert 10 km grid (som vist for område 3) interpoleret tidsserie-input fra de forskellige klimamodeller (Seaby et al., in prep).

Usikkerhedsanalysen for Sjælland og Midtjylland har vist, at ECHAM-DMI kombinationen repræsenterer den model af de ni udvalgte kombinationer, der generelt giver den største stigning i grundvandsstand og grundvandsdannelse. ECHAM-SMHI kombinationen ligger generelt omtrent midt i ensemblet. ARPEGE-CNRM kombinationen giver den mindste stigning i grundvandsstand og grundvandsdannelse (tabel 3.1). De tre modeller giver omtrent samme årsnedbør for referenceperioden 1961-1990, men har forskellig fremskrivning til 2021-2050 og har forskelle i årstidsvariation og ændringer på månedsbasis. ECHAM-DMI giver størst stigning i nedbøren for den fremtidige periode. ECHAM-SMHI giver en stigning svarende til medianen af de ni modeller. ARPEGE-CNRM har meget begrænset forskel på nedbøren for fremtidsperioden i forhold til referenceperioden (figur 3.6).

DBS korrektionsfaktorer (dobbel gamma funktioner) er beregnet på domæneniveau, men vurderingen af ændringer foretages ud fra interpolerede og biaskorrigerede 10 km RCM inputdata. Derved introduceres en rumlig variation, dvs. middelværdi og spredning er ikke nødvendigvis bevaret for hvert 10 km gridniveau, hvor der foreligger tidsserier med daglig bias-korrigeret nedbør, temperatur og fordampning. Det er valgt at rangordne resultaterne for de fire leverancer på baggrund af de gennemregnede ændringer på modelgridniveau (500x500 m gridniveau i den hydrologiske DK-model), inden konklusive kort for hver leverance præsenteres som hhv. 'våd klimamodel', 'median klimamodel' og 'tør klimamodel'. For de fleste grids kan resultatet for 'våd klimamodel' derfor 'stamme fra' ECHAM-DMI, men enkelte grids kan evt. være fremkommet ud fra resultatet fra enten ECHAM-SMHI eller ARPEGE-CNRM, i de tilfælde hvor en af de to modeller, på grund af rumlige variationer indenfor domænet, fx på tværs af Sjælland eller Midtjylland, lokalt giver en anden rangordning end den, der er fundet på domæneniveau.

Tabel 3.1 Anvendte kombinationer af regional og global klimamodel (Seaby et al., in prep). Ud fra en nærmere analyse af de 9 kombinationer er anvendt kombination 2, 5 og 9 der udspænder hhv. de kombinationer der har den største stigning (våd), en median stigning (median) og den laveste stigning i grundvandsstand/grundvandsdannelse (tør). Med grå skygge er de tre udvalgte klimamodeller fremhævet).

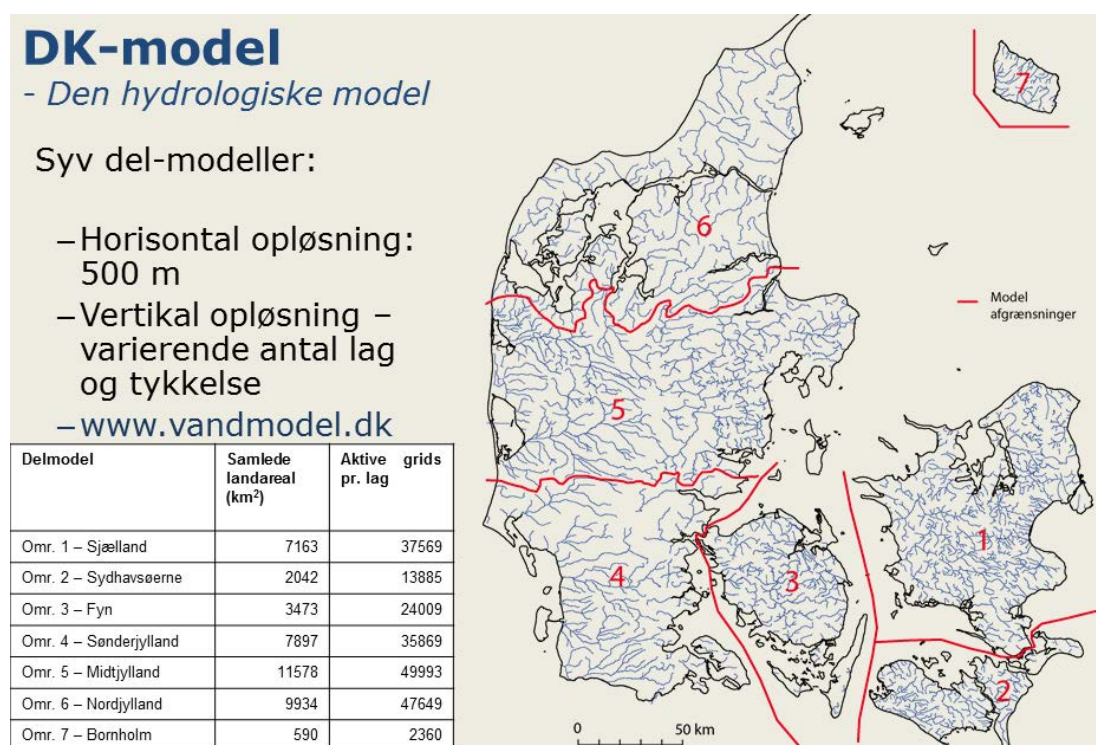
Kombination	Global klimamodel (GCM)	Regional klimamodel (RCM)	Reference
1 - BCM-SMHI	BCM2 Bjerknes CCR Norway	RCA3 SMHI Sweden	Otterå et al., 2009 Kjellström et al., 2005
2 - ECHAM-DMI (størst stigning i GVS)	ECHAM5 Max Planck Inst. Germany	HIRHAM5 DMI Denmark	Roeckner et al., 2003 Christensen et al., 2007
3 - BCM-DMI	BCM2 Bjerknes CCR Norway	HIRHAM5 DMI Denmark	Otterå et al., 2009 Christensen et al., 2007
4 - ECHAM-KNMI	ECHAM5 Max Planck Inst. Germany	RACMO2 Royal Met. Institute Netherlands	Roeckner et al., 2003 van Meijgaard et al., 2008
5 - ECHAM-SMHI (median stigning i GVS)	ECHAM5 Max Planck Inst. Germany	RCA3 SMHI Sweden	Roeckner et al., 2003 Kjellström et al., 2005
6 - ECHAM-MPI	ECHAM5 Max Planck Inst. Germany	REMO Max Planck Institute Germany	Roeckner et al., 2003 Jacob et al., 2001
7 - ECHAM-ICTP	ECHAM5 Max Planck Inst. Germany	RegCM3 Int. Centre for Theor. Phys. Italy	Roeckner et al., 2003 Pal et al., 2005
8 - ARPEGE-DMI	ARPEGE National Centre of Met. Research France	HIRHAM5 DMI Denmark	Déqué et al., 1994 Christensen et al., 2007
9 - ARPEGE-CNRM (mindst stigning i GVS)	ARPEGE National Centre of Met. Research France	RM5.1 Nat. Centre of Met Research France	Déqué et al., 1994 Radu et al., 2008



Figur 3.6 Ændringer i middel grundvandsstand (Mid GVS) og karakteristisk høj grundvandsstand (Høj GVS) i gennemsnit (m) for Sjælland (område 1) og Ringkøbing Fjord oplandet (del af område 5). Kombination 2 (SC2-sort: ECHAM-DMI, våd) giver størst stigning. Kombination 5 (SC5-rød: ECHAM-SMHI, median) giver en medianstigning. Kombination 9 (SC9 – grøn: ARPEGE-CRNM) giver mindst stigning i grundvandsstand for begge områder (der ses et begrænset fald i grundvandsstanden for Sjælland og Ringkøbing Fjord med kombination 9, tør). Tilsvarende analyse er gennemført for grundvandsdannelse.

3.3 Hydrologisk modelanvendelse

DK-modellen blev oprindeligt udviklet af GEUS i perioden 1996-2001 (Henriksen et al., 2003; Henriksen et al., 2009). I perioden 2005-2009 har GEUS foretaget en omfattende opdatering af DK-modellen (Højberg et al., 2010; Højberg et al., 2012), med bl.a. en opdatering af den geologiske model på baggrund af nye data fra grundvandskortlægningen (fx geofysiske kortlægning og modellering på mindre skala). Den geologiske model ligger i 2011 versionen i 100x100 meters opløsning, med en opløsning på den hydrologiske model med 500 m grids. I figur 3.7 er vist de syv modelområder, der arbejdes med i DK-model version 2011.



Figur 3.7 DK-modellens syv delområder/domæner (www.vandmodel.dk)

DK-model er baseret på MIKE SHE/MIKE 11 og beskriver det hydrologiske kredsløb med 3D grundvandsstrømning, 2D overfladisk afstrømning og drænastrømning, 1D vandløbsafstrømning og 1D umættet zone strømning baseret på Two-layer modellen (se nedenfor). Typisk opererer DK-model med en vertikal opdeling af mættet zone med ca. 10 beregningsslag i hvert modelområde (Højberg et al., 2012; www.dkmodel.dk).

Aktuel fordampning er i DK-modellen beskrevet ved et simpelt vandbalance modul "Two-layer" (Stisen et al., 2012). Two-layer opdeler umættet zone i to lag, hvor fordampning foregår fra det øverste lag (rodzonen). Two-layer kan simulere højere fordampning i tilfælde, hvor grundvandsstanden står højt, hvilket er vigtigt for nærværende Klimagrundvandskort. Fordampningen fra rodzonen kontrolleres af jordtype- og vegetationsforhold samt af interaktionen med grundvandsstanden, der beskrives i MIKE SHE. I Tabel 3.2 er beskrevet de vegetationstyper og jordtyper der indgår i DK-modellen (Højberg et al, 2012).

Tabel 3.2 Vegetationstyper og jordtyper (JB1-JB10) i DK-model (Højberg et al.,2012; Stisen et al., 2012)

Areal anvendelse		Max rodzone dybde (m)	Areal (km ²)	Arealdækning (%)
Vedvarende græs		0,70	3009	7
Løvskov		1,00	1855	4
Nåleskov		0,85	3410	8
Hede/lav vegetation		0,30	1024	2
Bebygget område		0,10	3933	9
Landbrug, vinterhvede	JB1	0,60	1346	3
	JB2	0,90	632	1
	JB3-JB4	1,20	2976	7
	JB5-JB10	1,50	6565	15
Landbrug forårsbyg	JB1	0,60	1401	3
	JB2	0,80	494	1
	JB3-JB4	1,10	2324	5
	JB5-JB10	1,40	3781	9
Landbrug, græs	JB1	0,60	1328	3
	JB2	0,70	526	1
	JB3-JB4	0,80	2432	6
	JB5-JB10	0,90	3120	7
Landbrug, majs	JB1	0,60	491	1
	JB2	0,90	145	0
	JB3-JB4	1,20	770	2
	JB5-JB10	1,50	1194	3

3.4 Vandbalance vurdering

I 2011 er DK-modellen opdateret med de nye anbefalinger fra vandbalanceprojektet (Refsgaard et al., 2011) og kalibreret for hele landet ved invers modellering (PEST). Det er vur-

deret, at dynamisk nedbørskorrektion 10/20 km klimagrid giver bedre resultater og mere realistiske parametre for rodzonedybden (Stisen et al., 2012; Refsgaard et al., 2011). DK-modellen er derfor justeret, og der er opsat en ny Two-layer opsætning for hele landet jf. de nye anbefalinger. Følgende generelle anbefalinger er indarbejdet:

- Dynamisk nedbørskorrektion med korrektionsværdier, der varierer på daglig basis
- Referencefordampning baseret på Makkink (korrigeret med 0,95 for Jylland) og med afgrødekoefficienter på 0,95 for fuld vækst
- Parameteroptimering (invers modellering) der sikrer troværdig vandbalance, dynamik i vandløbsafstrømning, simuleringer af trykniveau og realistiske parametre
- Setup af øverste beregningslag, der er ført et par meter under øvre grundvandspejl

3.5 Model setup og kalibrering

PEST er en gradientbaseret, ikke-lineær invers optimeringsrutine (Doherty et al., 2004). PEST er anvendelig til DK-modellen, da man allerede har et fornuftigt startgæt på parameterværdier fra tidligere versioner (Henriksen et al., 2009; Henriksen et al., 2003). Modellen er i kalibreringen kørt for perioden 1990-2010 med kalibreringsperiode 2000-2003 og valideringsperiode 2004-2007, hvilket giver en solid 10-årig opvarmningsperiode (Stisen et al., 2012; Højberg et al., 2012).

Som kalibreringsparametre i den inverse optimering indgår typisk rodtybden, hydraulisk ledningsevne for smeltevandssand, moræneler, prækvartært sand og prækvartært ler, dræn tidskonstant, vandløbslækage. Parametrene har typisk forventede variationsrammer på +/- en dekade eller mere (rodtybde +/- 20 cm gældende for landbrugsafgrøder på JB1, øvrige landbrugsafgrøder på JB'ere er linket til JB1), Stisen et al. (2012).

Den kalibrerede DK modelles vandbalancefejl (%) og kvadratsummen af trykniveau afvigelser (RMS - m) er ved kalibreringen og validering af DK model version 2011 vurderet til omkring 10 % på vandbalancefejlen bedømt ud fra knap 200 vandføringsstationer i Danmark (median fejl). For ca. 25 % af stationerne er vandbalancefejlen over 20 %. Vandbalancefejlen siger indirekte noget om modellens troværdighed i forhold til simulering af grundvandsdannelse, herunder ændringer i grundvandsdannelsen. Tilsvarende er median fejlen for RMSE bedømt ud fra de syv modelleres kalibrering og validering for de enkelte modellag i størrelsesordenen 3-5 meter, med ca. 25 % af 'lagene' overskridende en RMSE på 6 m (Stisen et al., 2012).

DK-modellen er i stand til at simulere år til år variationer i grundvandsstanden tilfredsstillende (Højberg og Juhler, 2011), hvor det fx er dokumenteret, at variationen for Sjælland for 1993 til 2005 er velbeskrevet. Der er i denne periode observeret en generelt stigende grundvandsstand, som DK-modellen beskriver ganske tilfredsstillende, hvorfor det kan antages, at modellen vil kunne beskrive langsigtede klimagenererede variationer med næsten samme nøjagtighed. Tæt på vandindvindinger kan der imidlertid være væsentlige afvigelser, idet mange pejleobservationer her er direkte påvirkede af variationer i den nærliggende indvinding over tid eller på mindre skala, som 500 m grid ikke kan repræsentere.

Som tidligere nævnt, er modellens performance i forhold til dybden til det øvre grundvandspejl og grundvandsdannelsen er praktisk taget ukendt, da der stort set ikke foreligger pejleobservationer i JUPITER, der kan dokumentere Klimagrundvandskort for dybden til grundvandsspejlet fx for perioden 1991-2010. Da man heller ikke kan observere grundvandsdannelsen og dens fordeling i tid og sted, er det heller ikke muligt at vurdere usikkerheden nærmere på middel grundvandsdannelse (eller karakteristisk lav grundvandsdannelse). Man kan alene dokumentere modellens performance ud fra de vandføringsmålinger og pejlinger, der har været tilgængelige. Man kan imidlertid ikke uden videre antage, at selvom modellen kan beskrive det dybere grundvand tilfredsstillende, vil den også give et tilsvarende retvisende billede for det øvre grundvand. Det er derfor vigtigt, at man søger at inddrage lokal viden og lokale data (fx terrænnære pejlinger) og bruger Klimagrundvandskort med omtanke i forbindelse med screening.

3.6 Simuleringer og dataudtræk for produktionskørsler

Med de DBS-korrigerede klimadata fra de tre modelkombinationer, der udspænder henholdsvis den største stigning (ECHAM-DMI), den mindste stigning (ARPEGE-CNRM) og en median stigning (ECHAM-SMHI), er der gennemført beregninger af ændringer for de fire leverancer, ud fra kørsler for henholdsvis 1961-90 og 2021-2050 for hver af de syv modeldomæner. Desuden er der foretaget simuleringer af absolutte størrelser for de fire leverancer fx dybde til grundvandsspejl og grundvandsdannelse ud fra input fra observeret klima for perioden 1991-2010.

Fremgangsmåden er mere detaljeret beskrevet i Appendix 1, inkl. de nødvendige supplerende opvarmningskørsler for henholdsvis referenceperiode (1961-1990), kontrol/nuperiode (1991-2010) og fremtidig periode (2021-2050).

3.7 Usikkerhedsvurdering

Resultaterne af klimafremskrivningerne for Danmark frem mod 2050 viser som nævnt betydelig usikkerhed med store variationer mellem de forskellige klimamodeller. Hvor der er en rimelig klar tendens med hensyn til udviklingen i temperatur, er der stor usikkerhed på hvordan forskellige globale og regionale klimamodeller vurderer klimaændringernes effekt på nedbøren. Usikkerheden på nedbøren frem mod 2050 er central for vurderinger af hydrologi og grundvand, men er kun i mere begrænset grad et spørgsmål om valg af emissionsscenario (fx A1B eller A2). De forskellige emissionsscenarier er nemlig ret enige om temperaturfremskrivning frem til 2050, hvorfor anvendelsen af A2 eller A1B ikke har afgørende betydning (Refsgaard, 2012). Der er større usikkerhed med hensyn til høj grundvandsstand (største 5 døgns værdi pr. år) for et punkt (et pixel på 500 x 500 m) end for et domæne fx Sjælland, ligesom der er større usikkerhed for ekstremværdierne (typisk høj grundvandsstand og typisk lav grundvandsdannelse) end for middelværdierne. Klimaet indeholder i øvrigt store naturlige variationer, som også vil afspejles i fremskrivningerne fra klimamodellerne. Vi kan fx sagtens få nogle tørre vintre i en årrække, selvom den langsigtede tendens går i retning af mere våde vintre. Den naturlige klimavariation er grundlæggende uforudsigelig og noget, vi må leve med (Refsgaard, 2012).

Første del af usikkerhedsvurderingen tager højde for usikkerheden på klimamodellernes fremskrivning i udviklingen af nedbør, temperatur og fordampning frem til 2021-2050 og hvad det betyder for forskelle på beskrivelsen af ændringer for grundvandet i forhold til referenceperioden 1961-1990. Denne del benævnes i det følgende *analyse af inputusikkerhed* og er baseret på gennemregninger med samtlige ni udvalgte GCM/RCM kombinationer (Tabel 3.1) for Sjælland (overvejende østdansk lerjord) og Ringkøbing Fjord oplandet (overvejende vstdansk sandjord).

En anden usikkerhedskilde er usikkerheden på den hydrologiske model, der omsætter klimændringer til ændringer på vandkredsløb og grundvandsstand (DK-modellen). De sædvanlige usikkerheder på inputdata, parameterværdier og procesligninger for en hydrologisk model vil her blive forstærket, fordi modellen benyttes til at lave fremskrivninger til situationer, der er forskellige fra den situation, modellerne er kalibreret for dvs. perioden 1991-2010. Det er usikkert, hvordan vandindvinding og drænforhold vil se ud omkring år 2050, men det er antaget, at der sker en dræning i samtlige områder, hvor der er behov for det. Indvinding til husholdning og industri afhænger af andet end klima og er også et spørgsmål om forsyningsstruktur, befolkningstilvækst, industriudvikling osv., men det er antaget at denne indvinding vil være fordelt som i dag og vil have samme størrelse som nu. Indvinding til landbrugsvanding afhænger af både klima og afgrødeforhold, og sidstnævnte afhænger af såvel fødevarerpriser som energipolitiske (biomasse) spørgsmål. Alligevel er det antaget, at vegetationsforhold er uændrede i forhold til i dag, men klimaets betydning er dog inddraget på de lette jorde ved at beregne vandingsmængder styret af vandindhold i rodzonen henover vækstsæsonen med DK-model (altså noget der simuleres med modellen, se også Tabel 3.2).

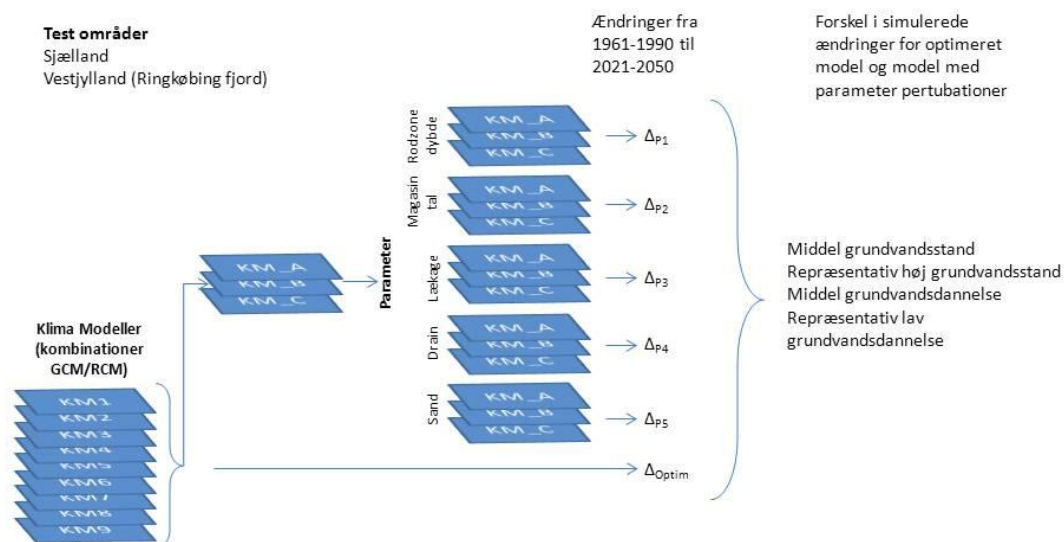
Usikkerhederne på den hydrologiske model spiller ind både i forhold til simulerede ændringer (2021-2050 i forhold til 1961-1990) og i forhold til simulerede absolutte værdier (1991-2010). I det følgende vil der primært blive fokuseret på den betydning, parameterusikkerheden har på modellens ændringer som følge af klimændringer. Oprindeligt var det planlagt at gennemføre Monte Carlo analyser af prædiktionsusikkerhed, men på grund af MIKE SHE, det anvendte PC netværk hos GEUS og kørselstider med DK-model, var det ikke praktisk muligt indenfor projektets rammer at gennemføre denne oprindelige plan.

I stedet er parameterusikkerheden analyseret ved følsomhedsanalyser. En følsomhedsanalyse er en metode til at analysere simuleringsresultaternes følsomhed overfor ændringer i kalibreringsparametre og andre modelantagelser. Fokus har i nærværende projekt været på parameterusikkerhed, mens den konceptuelle usikkerhed (Seifert et al., 2012) ikke er belyst. Ved en følsomhedsanalyse analyseres modelresultaternes følsomhed over for de enkelte usikkerhedskilder (fx hydraulisk ledningsevne for sand, roddybde, drænkostant osv.) enkeltvis. Da fokus er på ændringer mellem referenceperioden og fremtiden, er følsomhedsanalysen ligeledes udført på basis af de beregnede ændringer i de fire leverancer. Denne del benævnes i det følgende *analyse af parameterusikkerhed*, og er baseret på gennemregninger med de tre udvalgte GCM/RCM kombinationer for Sjælland (overvejende lerjord) og for Ringkøbing Fjord oplandet (overvejende sandjord) for udvalgte parametre. Figur 3.8 illustrerer den metodik, der har været anvendt i usikkerhedsanalyse i forbindelse med Klimagrundvandskort.

De grundlæggende hypoteser i usikkerhedsanalysen har været følgende:

- Parameterusikkerhed har lille betydning på de simulerede ændringer i forhold til usikkerheden ved anvendelse af alternative klimascenarier (hypotese I)
- Det er muligt at ekstrapolere betydningen af parameterusikkerheden på baggrund af andre let tilgængelige variable dybde til grundvandsspejlet eller sand/ler områder (hypotese II)

Strategien har været at udsække det samlede usikkerhedsbånd, jf. inputusikkerheden, ved hjælp af tre udvalgte kombinationer, der repræsenterer den største, en median og den mindste ændring for alle fire leverancer. Det er efterfølgende testet, om rangordningen bestemt ud fra middelværdier for Sjælland og vist i figur 3.6 også gælder, når man kigger nærmere på henholdsvis Sjælland og Ringkøbing Fjord oplandet og de rumlige fordelinger for hver af de fire leverancer. Herefter er betydningen af inputusikkerheden i forhold til parameterusikkerheden vurderet. Relationer mellem parameterusikkerheden og dybde til grundvand samt vurdering af parameterusikkerhedens forskellige betydninger for hhv. sandet og lerede jorde er dernæst undersøgt, idet sådanne relationer vil gøre det muligt at ekstrapolere betydningen af parameterusikkerheden til de øvrige dele af landet (figur 3.8).



Figur 3.8 Usikkerhedsvurdering. Først gennemregnes simulerede ændringer for de fire leverancer i to testområder med de ni GCM/CRM kombinationer (KM1 – KM9 for Sjælland og Ringkøbing Fjord oplandet). Herefter udvælges de tre kombinationer der giver våd, median og tør fremskrivning og udsækker inputusikkerheden (KM_A - våd, KM_B - median og KM_C – tør). For de udvalgte parametre er der ud fra bestemte konfidensgrænser for Sjælland med PEST gennemført en perturbation jf. nedre konfidensgrænse (med bestemmelse af Δ_{p1} , Δ_{p2} ... Δ_{p5}) med henblik på sammenligning med betydning af inputusikkerhed (Δ_{Optim})

Endelig har strategien været, at bruge resultaterne af parameterusikkerheden som input til fastlæggelse af interval grænser, der anvendes for de fire leverancer på Klimagrundvandskort.

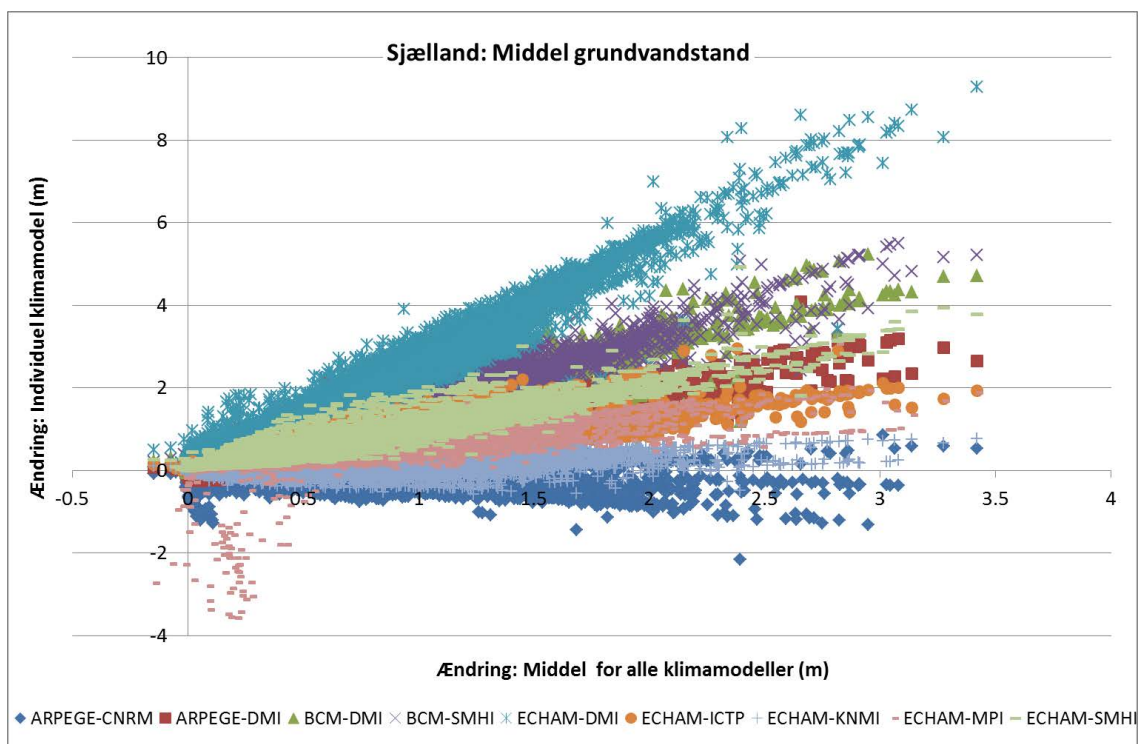
4. Resultater

I nærværende afsnit gennemgås først resultaterne af usikkerhedsanalysen med hensyn til *inputusikkerhed* og *parameterusikkerhed*. Dernæst præsenteres modelberegninger med kort for hele landet.

4.1 Resultater af usikkerhedsanalyser

4.1.1 Inputusikkerheder

På figur 4.1 er vist et eksempel på resultater fra analysen af inputusikkerheder for Ringkøbing Fjord oplandet (område 5) og Sjælland (område 1). Ved analysen er afbildet ændringer på gridniveau (samtlige beregningsgrid for hvert domæne) for hver af de ni udvalgte GCM/RCM'ere (y-aksen) i forhold til middelværdien fra alle ni klimamodeller (x-aksen). Herved fremkommer den usikkerhed, der er på prædiktionen af ændringen i middel grundvandsstand for hvert af de to områder som følge af inputusikkerheder og klimaændringer (ændret nedbør, fordampning og temperatur).



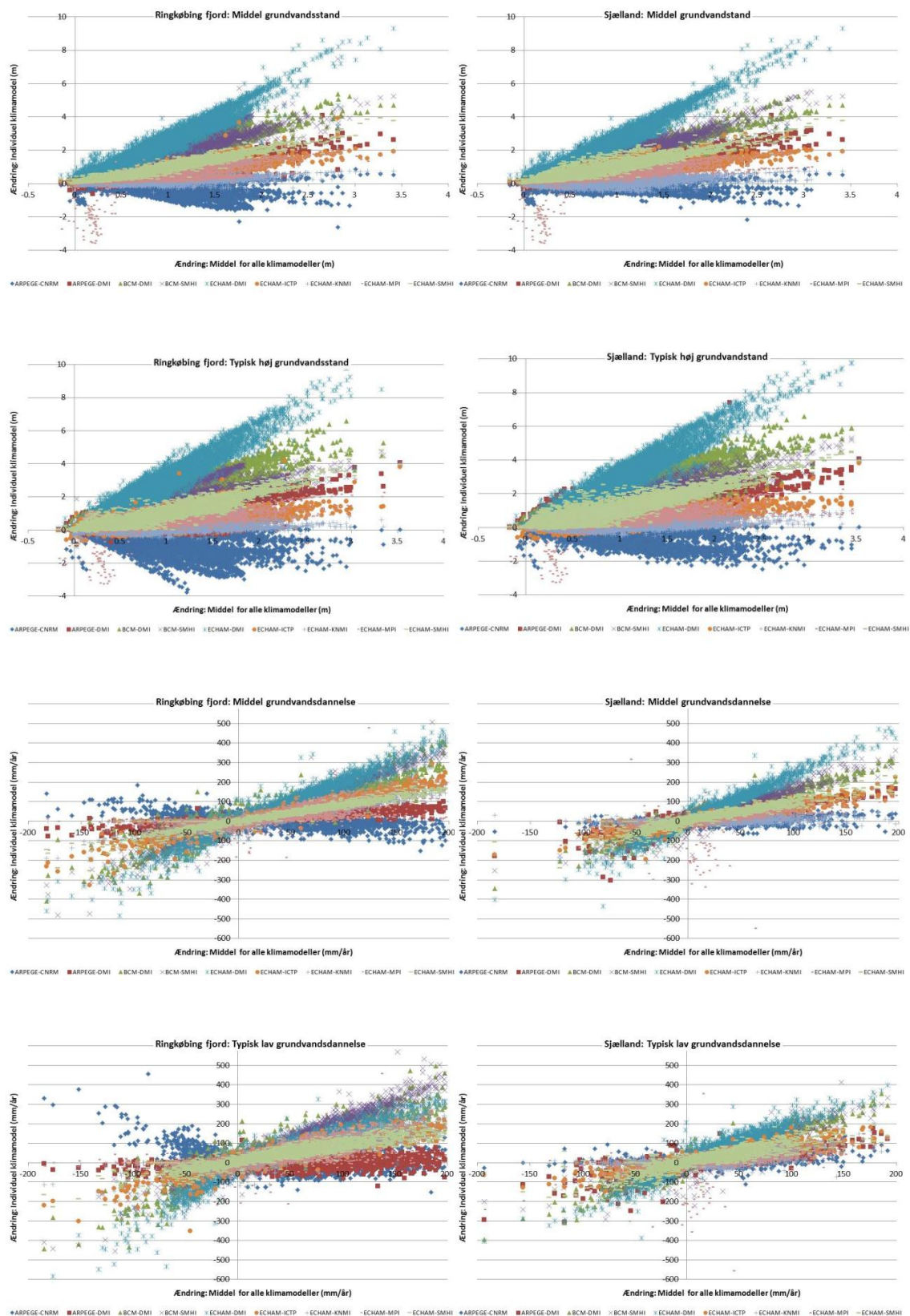
Figur 4.1 Resultater for Sjælland af ændringer i middel grundvandsstand (m) for 2021-2050 i forhold til 1961-1990. Det fremgår, at tør klimamodel (ARPEGE-CNRM, gråblå) udspænder de laveste fremskrivning i middel grundvandstand af de ni modeller. Median model (ECHAM-SMHI, vissengrøn) er beliggende omtrent midt i ensemblet. Våd klimamodel (ECHAM-DMI, grønblå) har de største stigninger af de ni

Analysen for de to områder er gennemført for samtlige fire leverancer. Middel grundvandsstand, typisk høj grundvandsstand, middel grundvandsdannelse og typisk lav grundvandsdannelse er alle analyseret. Resultater er vist i Appendix 2. Overordnet set viser analysen, at ECHAM-SMHI median modellen ligger centralt blandt de ni udvalgte ENSEMBLES modeller, tæt på middelværdien altså svarende til 'en median fremskrivning'. ECHAM-DMI våd, er den klimamodel, der giver den største stigning i grundvandsstand og grundvandsdannelse. ARPEGE-CNRM tør er den model, der giver den mindste stigning, faktisk et fald for størstedelen af 'pixels'. Dermed har rangordningen kunnet verificeres, og en kvalitativ gennemgang af ændringernes fordeling på kort for de to områder, understøtter rangfølgen.

De øvrige leverancer viser i store træk lignende resultater og tendenser som figur 4.1, se figur 4.2, dog med generelt lidt større spredning på ændringer i typisk høj grundvandsdannelse. Ændret middel grundvandsdannelse følger resultaterne for grundvandsstand. Det bemærkes, at hvor ændring i middel grundvandsstand og typisk høj grundvandsstand for ECHAM-DMI (størst stigning) langt overvejende giver stigninger, så er der et antal grids (om end ikke en dominerende del), der giver et fald i grundvandsdannelsen. Det skyldes, at disse grid repræsenterer områder, hvor fordampningen lokalt ændres væsentligt, eller drænastrømningen og/eller strømningsforhold ændres, når man kigger på ændringer for enkelte grid.

Figur 4.2 viser, at resultaterne for typisk lav grundvandsdannelse afviger noget i forhold til øvrige leverancer. ECHAM-DMI er fortsat repræsentativ for max. stigning i typisk lav grundvandsdannelse for Sjælland, og ARPEGE-CNRM er rimeligt repræsentation for lav stigning i begge områder, om end flere GCM-RCM'ere konkurrerer om at give 'tørreste' fremskrivning. Når det gælder max. stigning for Ringkøbing Fjord oplandet, er det desuden de to BCM modeller, der giver de største max. stigninger. Medianen er imidlertid fortsat vel repræsenteret af ECHAM-SMHI for begge områder. Bemærk, at de større usikkerhedsbånd på typisk lav grundvandsdannelse i forhold til middel fremkommer for median scenariet (ECHAM-SMHI).

På grundlag af resultaterne for Ringkøbing Fjord oplandet og Sjælland, der repræsenterer henholdsvis et vestdansk sandområde og et østdansk ler område, er der grundlag for at antage at ECHAM-DMI, ECHAM-SMHI og ARPEGE-CNRM udspænder det samlede udfaldsrum for samtlige fire leverancer og derfor antages også at gøre det for de øvrige fem domæner (DK model områder). I det følgende har GEUS derfor valgt at begrænse antallet af kørsler til de tre repræsentative modeller for de resterende fem områder. Herved er max, mid og min ændring i grundvandsstand og grundvandsdannelse repræsenteret.



Figur 4.2 Resultater for Ringkøbing Fjord (venstre) og Sjælland (højre) af ændringer i mid-del grundvandstand (øverst, i meter), typisk høj grundvandsstand (næstøverst, i meter), middel grundvandsdannelse (næstnederst) og typisk lav grundvandsdannelse (nederst) i mm/år, 2021-2050 i forhold til 1961-1990.

4.1.2 Parameterusikkerhed

Et hovedspørgsmål i analysen af resultater vedrørende parameterusikkerheden er, hvorvidt parameterusikkerheden har stor eller lille betydning på de simulerede ændringer i forhold til inputusikkerheden. Inputusikkerheden har som beskrevet ovenfor stor betydning og giver et markant usikkerhedsbånd på adskillige meter på fx ændringer i grundvandsstanden. Som det fremgik af figur 4.1- 4.2, er der proportionalitet mellem inputusikkerhed og simuleret ændring; det vil sige at usikkerhedsbåndet øges, jo større ændringer der er simuleret. Den første hovedopgave er derfor at afklare, om hypotese I er en holdbar antagelse, dvs. om "parameterusikkerheden har lille betydning på de simulerede ændringer i forhold til usikkerheden ved anvendelse af hhv. ECHAM-DMI, ECHAM-SMHI eller ARPEGE-CRNM" (hypotese I).

Den anden hovedopgave går ud på at undersøge hypotese II: "er det muligt at ekstrapolere betydningen af parameterusikkerheden på baggrund af andre (let tilgængelige) variable: f.eks Ler: Sjælland; Sand: Vestjylland, eller dybde til grundvandet" (hypotese II).

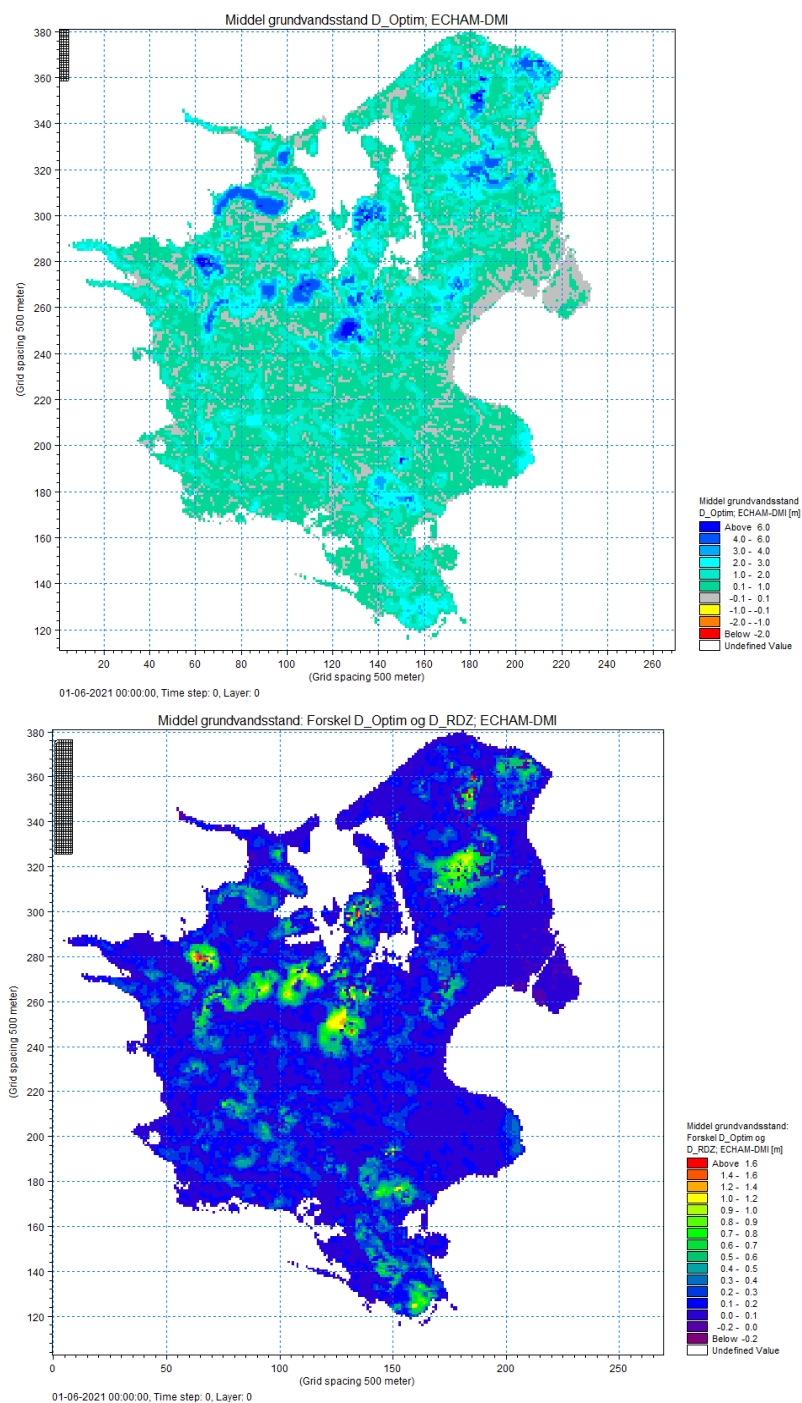
Til parameter følsomhedsanalysen er der udvalgt fem parametre der variere mht. betydning for beskrivelsen af forskellige forhold af det hydrologiske system: 1) Hydraulisk ledningsevne for sand, 2) Dræn tidskonstanten, 3) Magasintal, 4) Vandløbslækagekoefficienten og 5) rodzonedybden. Parameter-perturbationerne (parameterændringen) blev indledningsvist sat lig med de nedre 95% konfidensintervaller, estimeret i forbindelse med den inverse optimering af modellerne og betydningen af parameterusikkerheden blev undersøgt for hver af de tre udvalgt klimamodeller. Resultaterne viste, at forskellen mellem resultaterne fra den optimerede og de pertuberede modeller er størst for ECHAM-DMI klimamodellen, hvilket var forventeligt, da denne har den største ændring i klimaet mellem de betragtede perioder. På baggrund heraf, er det valgt kun at vise resultaterne fra ECHAM-DMI klimamodellen.

Den indledende analyse viste ligeledes, at usikkerheden på den hydrauliske ledningsevne for sand samt rodzonedybden, har de største betydninger for simulering af ændringen i de fire leverancer. For de to modeller var der imidlertid væsentlig forskel på de estimerede konfidensintervaller, hvorfor der ligeledes var væsentlig forskel på hvor meget disse parametre blev varieret for de to områder. For at opnå et mere sammenligneligt grundlag for de to områder, blev der efterfølgende gennemført simuleringer, hvor de to parametre procentuelt blev varieret ens for de to områder. Her blev der valgt en 14 % variation for den hydrauliske ledningsevne for sand og 10 % variation for rodzonedybden. Der er kun medtaget resultater, hvor sand og rodzone parametrene er varieret som beskrevet ovenover. Følsomhedsanalysen er gennemført ved at se på én parameter ad gangen. Den samlede parameterusikkerhed kan derfor være større hvis flere parametre samtidigt antager en værdi forskelligt fra den optimerede værdi. For at vurdere betydning heraf, er der lavet en model beregning, hvor både sand og rodzonen er varieret samtidigt.

I Appendix 2 er vist udtræk for samtlige følsomhedsanalyser for udvalgte parametre og for de fire leverancer. I det følgende gennemgås et udvalg af disse resultater med eksempler på det usikkerhedsbånd, der er knyttet til parameter perturbation svarende til nedre konfidensgrænse.

4.1.3 Resultater af følsomhedsanalyser

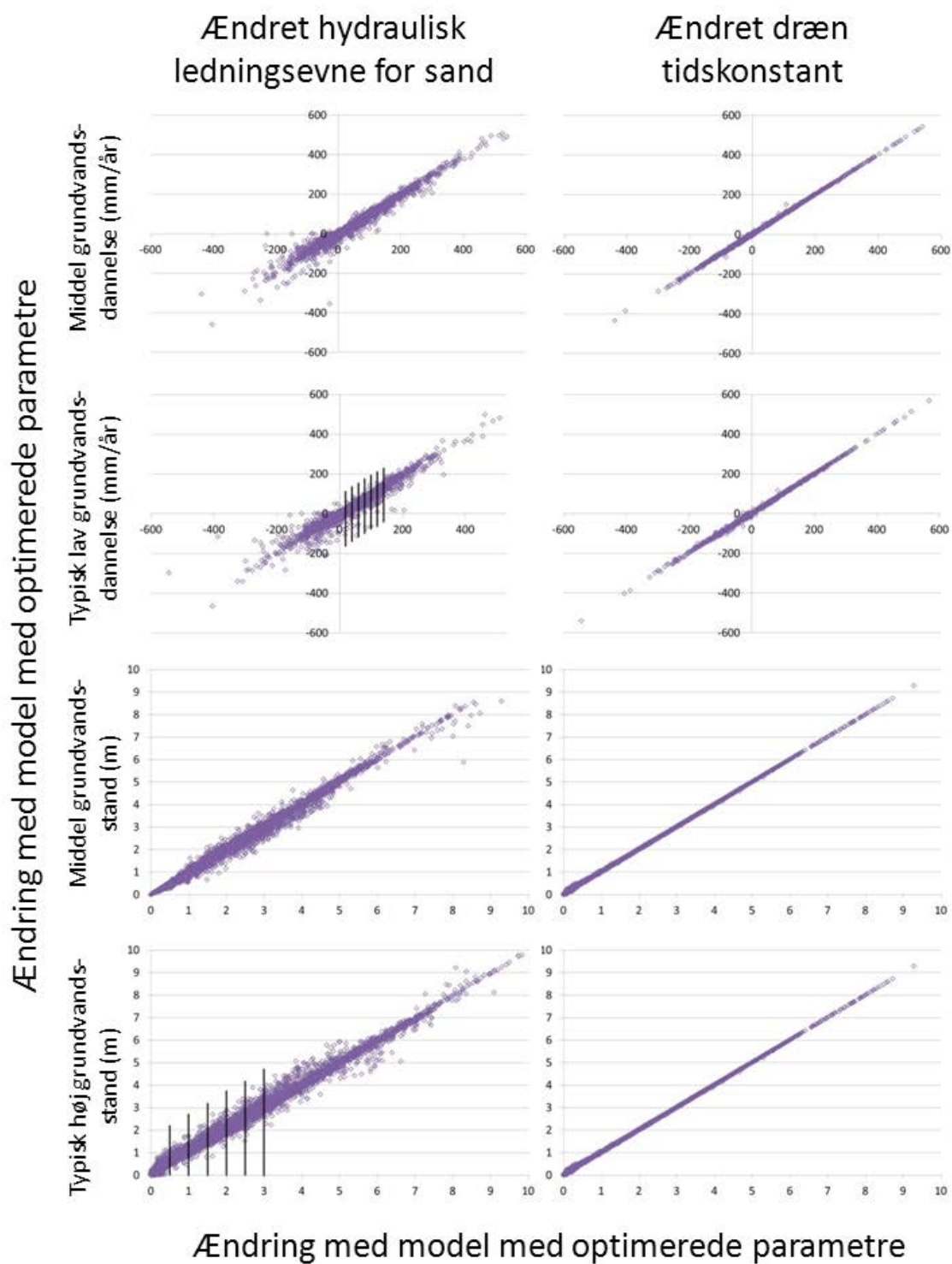
I figur 4.3 er først vist ændringen i grundvandsstanden for Sjælland med den optimerede hydrologiske model. Desuden er vist de ændringer i grundvandsstanden, der fremkommer som følge af parameterusikkerheden. På figuren er vist forskellen mellem simuleret trykniveau med optimeret model og pertuberet model (svarende til roddebyde jf. lav konfidensgrænse). Overordnet set ses de største ændringer og dermed den største parameterusikkerhed i områder, hvor der simuleres store stigninger i grundvandsstanden med den optimerede model.



Figur 4.3 Resultater for Sjælland. I figuren øverst er vist ændring i middel grundvandsstand med den optimerede model. Nederste figur viser forskel som følge af "pertuberet" roddebyde (lav konfidensgrænse fra PEST kalibreringen).

Figur 4.4 viser simulerede ændringer for de fire leverancer for to udvalgte parametre: hydraulisk ledningsevne for sand og dræntidskonstanten. Ud af x-aksen er ændringen som den optimerede model giver, mens ændringen med den pertuberede model af afbildet op ad y-aksen. Des tættere punkterne ligger på 1:1 linjen, des mindre forskel er der mellem de simulerede ændringer for de to modeller. Der ses generelt et forholdsvis konstant parameterusikkerhedsbånd, som er væsentligt større for roddybden. Det er imidlertid vanskeligt med de mange datapunkter at kvantificere betydningen af parameterusikkerheden. Det er derfor valgt at analysere resultaterne videre ved at opdele resultaterne for den optimerede model i intervaller som angivet på figur 4.4 og beregne middelværdi samt standardafvigelse for de tilhørende værdier for modellen med pertuberede parametre. For grundvandsstanden er værdierne opdelt i 0,5 m intervaller, mens der er anvendt et interval på 20 mm/år for grundvandsdannelsen.

Resultaterne er vist på figur 4.5, hvor nederste graf viser antallet af gridpunkter indenfor de respektive intervaller, angivet ved interval midtpunktet, 0,25 m dækker således intervallet [0 m; 0,5 m]. Bemærk at den tilhørende y-akse er til højre og er i logaritmisk skala. Den midterste graf viser middel forskellen mellem den optimerede model og modellen med parameter-perturbationen, og er således udtryk for en bias ved en ændret parameterværdi. Øverste graf viser standardafvigelse af forskellen hhv. optimeret og pertuberet model. Resultatet af følsomhedsanalysen viser, at de mest følsomme parametre er den hydrauliske ledningsevne for sand samt roddybden. Ved kombination af disse to parametre er usikkerheden større end for de to parametre alene, men ikke lig summen af usikkerhederne for de to parametre enkeltvist. Parameterusikkerheden er i modsætning til inputusikkerheden ved de større ændringer, ikke proportional med ændringen, men tenderer nærmere til at være svagt omvendt proportional eller rimeligt konstant. Det bemærkes, at der for hovedparten af griddene simuleres en begrænset ændring af såvel grundvandsstand som grundvandsdannelsen.



Figur 4.4 Resultater for Sjælland. I figuren til venstre er vist parameterusikkerheder, hvor x-aksen viser ændringer jf. optimeret DK-model for Sjælland og y-aksen viser ændringer jf. perturberet hydraulisk ledningsevne for sand (svarende til nedre konfidensgrænse). Ovenfra og ned er i venstre kolonne vist ændring i middel grundvandsdannelse, typisk lav grundvandsdannelse, middel grundvandsstand og typisk høj grundvandsstand ud fra domænets samtlige grid. Tilsvarende er i højre kolonne vist de samme udtræk men for parameteren 'dræntidskonstant'.

Figur 4.5 viser at der for størstedelen af modellens grids sker en begrænset ændring fra referenceperioden (1961-1990) til fremtiden (2021-2050) for både grundvandsstanden og grundvandsdannelsen. For ændringen i middelgrundvandsstand er det mere end 90% af model griddene, der har en ændring på mindre end 2 m (de fire første intervaller). Tilsvarende har 90 % af griddene en ændring i middelgrundvandsdannelsen på maksimalt 50 mm/år. Endvidere træder det tydeligt frem, at den hydrauliske ledningsevne for sand, rodzone dybden samt kombinationen heraf er de simuleringer, der giver størst forskel i forhold til den optimerede model. I det følgende baseres betragtningerne alene for disse modeller. For grundvandsstanden ses, at model biasen er stort set uafhængig af de simulerede ændringer og ligger på omkring 20 cm. For de mindste ændringer er den dog ned til 5 cm. Et tilsvarende billede ses for standard afvigelsen, som er mindst for de mindste ændringer (5-10 cm), men stiger til omkring 25 cm, som er relativt konstant med undtagelse af de største stigninger, som kun repræsenterer meget få modelceller. Parameterusikkerheden betyder således omkring 45 cm mht. simulering af grundvandsstanden. For de mindste ændringer er usikkerheden på den simulerede ændring lidt mindre. De mindste ændringer sker imidlertid primært hvor grundvandsstanden er tæt på terræn, og erfaringer viser, at modellen generelt er dårligere til at beskrive det øvre grundvand. Den beregnede ændring i grundvandsstanden vil i nogen grad afhænge af udgangsniveauet, dvs. den simulerede grundvandsstand i referenceperioden (1961-1990), den samlede usikkerhed på de mindste ændringer må derfor vurderes at være større end udtrykt alene ved middelfvigelsen mellem den optimerede og pertuberede model.

I områder med en tilvækst i grundvandsdannelsen ses ligeledes en relativ konstant forskel mellem den optimerede og pertuberede model på ca. 5 mm/år, dog lidt mindre for de mindste ændringer. Standardafvigelsen er ligeledes konstant på 10-15 mm/år. I områder med reduceret grundvandsdannelsen har parameterusikkerheden en større betydning, når reduktionen er mere end 100 mm/år. Det er dog under 0,5 % af modelcellerne der har en reduktion på mere 100 mm/år.

For karakteristisk høj grundvandsstand og karakteristisk lav grundvandsdannelse ses lignende resultater og spænd. Typisk lav grundvandsdannelse har generelt større middel- og standardafvigelse end middel grundvandsdannelse. Typisk høj grundvandsstand har lidt højere middelfvigelse i det lave og i mellem området. For ændringer i middelgrundvandsdannelse er de tilsvarende resultater for Ringkøbing fjord oplandet meget lig resultaterne for Sjælland, mens parameterusikkerheden har en lidt mindre betydning i Ringkøbing fjord oplandet mht. beregning af typisk lav grundvandsdannelse. For beregning af grundvandsdannelsen har parameterusikkerheden næsten samme betydning for de to oplande, dog er Ringkøbing fjord lidt mindre følsom overfor parameterændringer ved simulering af ændringer i middelgrundvandsstand.

I Appendix 2 er vist ændringer for samtlige fire leverencer for Sjælland og Ringkøbing Fjord oplandet, som vist nedenfor for middel grundvandsstand og grundvandsdannelse i Fig. 4.5.

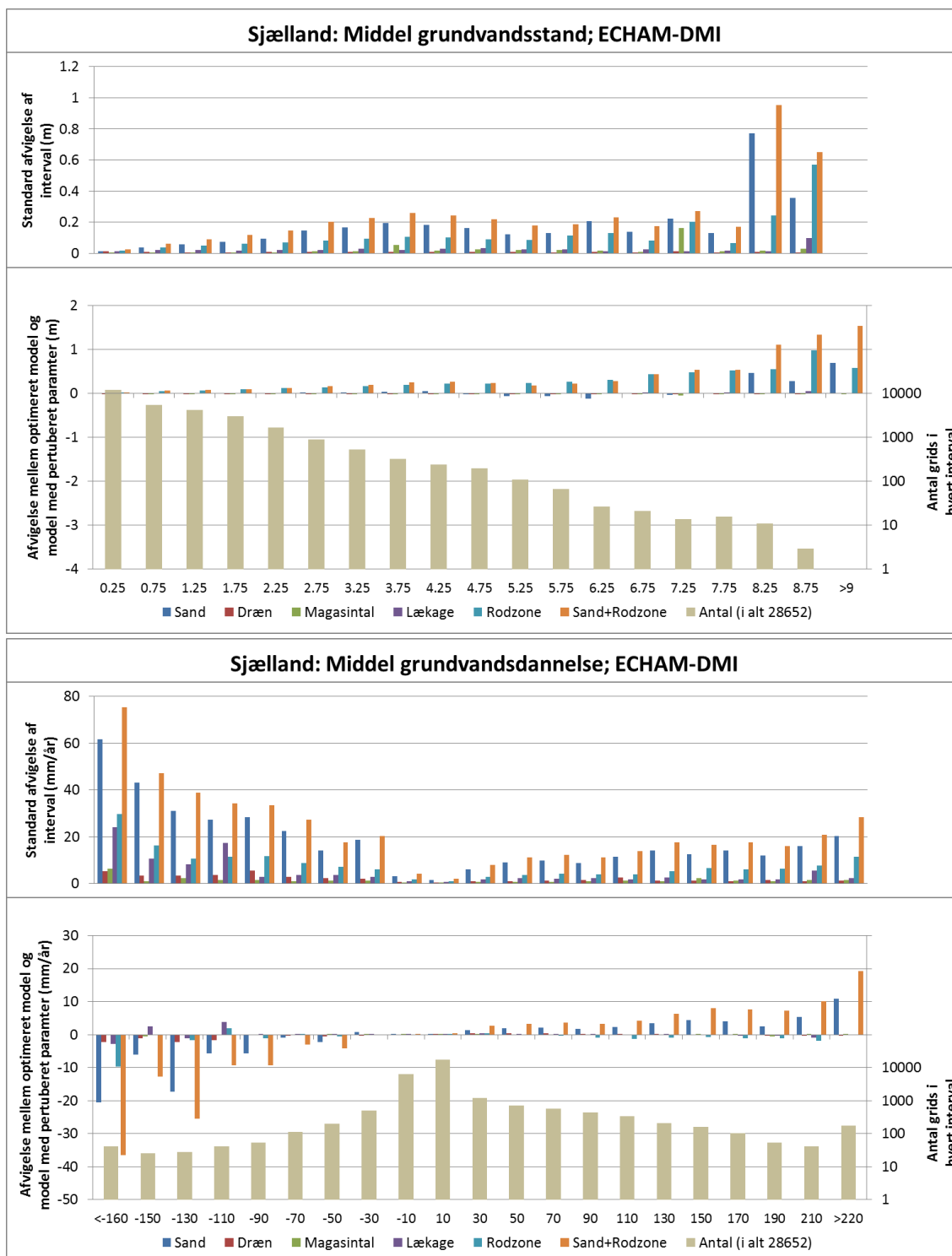


Fig. 4.5 Resultater for simulerede ændringer i middel grundvandsstand og middel grundvandsdannelse for Sjælland. Nederst er antal af grids i hvert interval angivet, bemærk højre akse er logaritmisk (data på x-akse referer til intervalmidtpunkter hvor fx 30 referer til en grundvandsdannelse mellem 20 og 40 mm/år). Forskel i simulerede ændringer med optimeret model og perturberede parametre er angivet i midten, mens øverste figur angiver middelværdi og standardafvigelse af forskellen mellem optimeret og perturberet model. Alle simuleringer er baseret på ECHAM-DMI modellen (våd klimamodel).

4.1.4 Parameterusikkerhed og afhængighed af dybden til grundvandsspejlet

I det følgende analyseres sammenhænge mellem ændringer i grundvandsspejl/grundvandsdannelsen og dybden til grundvandsspejlet. Formålet er at undersøge, hvorvidt denne afledte parameter kan bruges til at vurdere usikkerheden også for de områder, hvor der ikke foreligger resultater for alle ni GCM/RCM kombinationer og følsomhedsanalyser som for Sjælland og Ringkøbing Fjord oplandet.

Figur 4.6 viser et ekstrakt for ændring i middel grundvandsstand for Sjælland og Ringkøbing Fjord oplandet med ECHAM-DMI (Våd klimamodel).

Figur 4.6 viser, at der kun ses en relativ svag korrelation mellem simulerede ændringer og dybde til grundvandsspejlet. Middelværdier følger dog en kurve, her vist med firkanter. Stiplede røde kurver viser spredning udtrykt ved en standardafvigelse, og optrukne kurver to standardafvigelser.

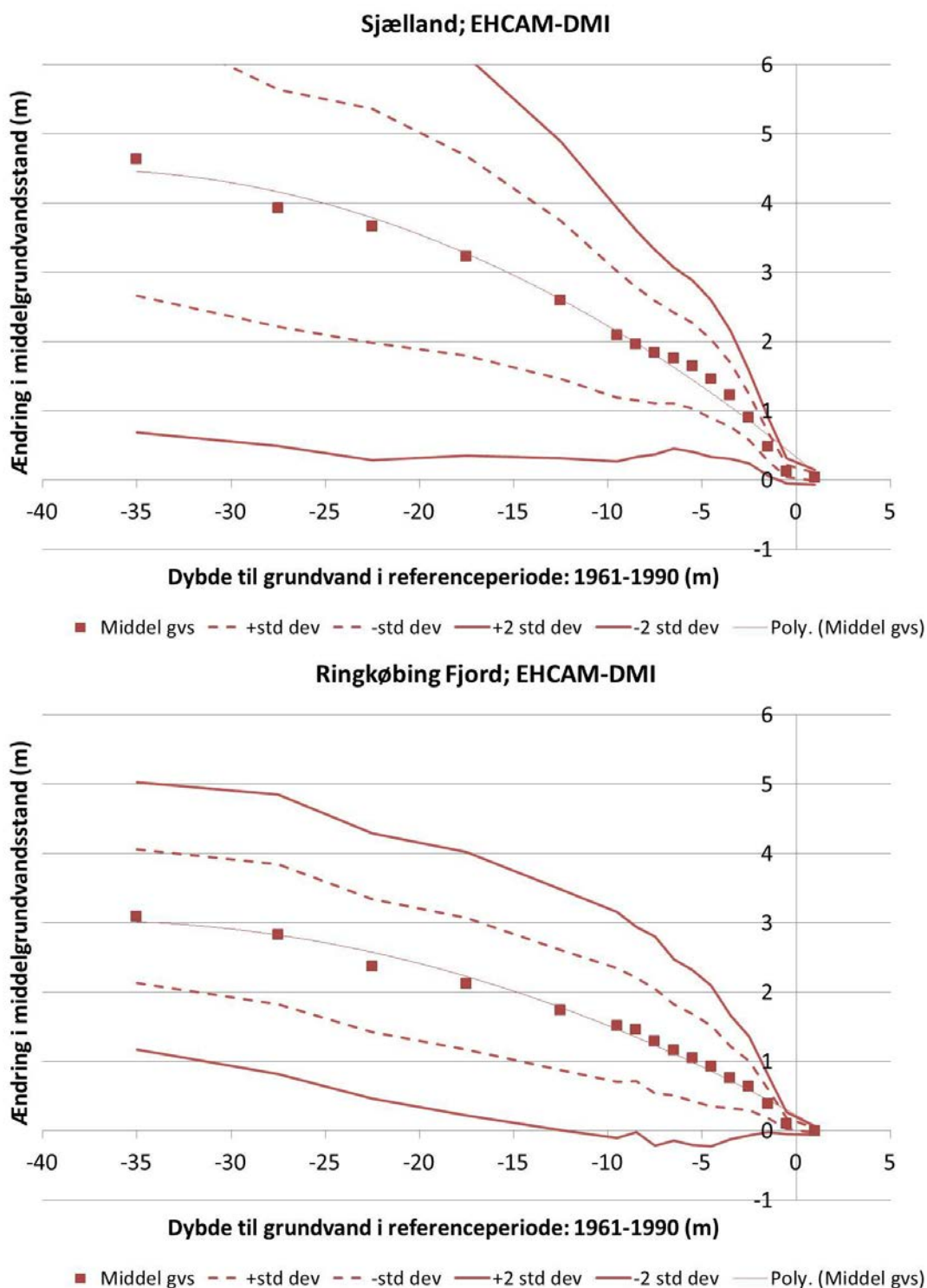
Man kan sammenfatte resultatet på følgende måde (på basis af figur 4.3 og 4.6):

- Svag korrelation mellem simulerede ændringer og dybde til grundvand
- Ingen eller meget ringe korrelation mellem dybde til grundvand og betydningen af parameterusikkerheden. Dette fremgår ikke direkte af figurer, men er undersøgt, uden at der blev fundet nogen korrelation
- Parameterusikkerheden er væsentlig mindre end usikkerheden forårsaget af de forskellige klimascenarier
- Parameterusikkerheden har en størrelse, der er betydende når et enkelt klimascenarium betragtes
- Der er væsentlig forskel på relationen mellem ændringer i grundvandsstand og dybden til grundvandsspejlet. For Sjælland (moræner) er korrelationen ringe pga. stor varians på data, mens den for det sandede Ringkøbing Fjord opland er bedre bestemt
- Roddybden giver størst parameterusikkerhed (middelfvigelse og standardafvigelse) af de undersøgte parametre

Den samlede usikkerhed for ændringer indenfor et interval kan opsummeres med tre størrelser (de to første fra Fig. 4.5/Appendix 2 og den sidste fra Fig. 4.6):

- Afvigelse mellem optimeret model og følsomhedskørsel med perturberet parameter
- Standardafvigelse af interval
- Betydningen af evt. fejlagtig dybde til grundvandsspejlet / grundvandsdannelse dvs. afvigelse i forhold til observationsperiode/data; idet der er en svag sammenhæng mellem fx ændringer og dybden til grundvandsspejlet, se Fig. 4.6

Typisk er afvigelsen for ændret grundvandsstand i størrelsesordenen 0,25 m for ændringer op til 5 meter. Standardafvigelsen er typisk i størrelsesordenen 0,25 m for ændringer op til fem meter. Endelig vurderes betydning af fejlagtig dybde til grundvandsspejlet at bidrage med en usikkerhed på op til 0,5 m i forhold. I alt et usikkerhedsbånd på en meter på simulerede ændringer på grundvandsstanden.



Figur 4.6 Resultater for Sjælland og Ringkøbing Fjord oplandet. Ændring i middel grundvandsstand for Våd klimamodel (EHCAM/DMI) som funktion af dybden til det øvre (regionale) grundvandsspejl. Øverst Sjælland, Nederst Ringkøbing Fjord opland

Samlet giver det et usikkerhedsbånd på grundvandsspejl på en meter. På tilsvarende vis er vurderet et usikkerhedsbånd på grundvandsdannelse på ca. 20 mm, ud fra del bidrag på hhv. 10 mm/år, 5 mm/år og 5 mm/år, i alt 20 mm/år. Det skal understreges at dette skøn er subjektivt vurderet og et bedste bud på usikkerheden på de simulerede ændringer. Som tidligere omtalt, er det ikke på samme måde muligt at kvantificere eller vurdere usikkerhe-

den på dybden til grundvandsspejlet eller grundvandsdannelsen for observationsperioden 1991-2010. Der vil kræves indsamlet ny eller eksisterende lokale pejlinger, da der ikke foreligger et tilstrækkeligt datagrundlag i JUPITER databasen for det øvre grundvandsspejl.

På dette grundlag er det valgt på Klimagrundvandskort at afbilde beregnede ændringer i grundvandsstanden for 2021-2050 i forhold til 1961-1990 med 1 meter's intervaller (< -5 m, -5 til -4 m, -4 til -3 m, -3 til -2 m, -2 til -1 m, -1 til 0 m, 0 – 1 m, 1 – 2 m, 2 – 3 m, 3 – 4 m, 4 – 5 m og > 5 m) og resultater af ændringer i grundvandsdannelsen med 20 mm's intervaller (< -40 mm, - 40 til – 20 mm, - 20 til 0 mm, 0 til 20 mm, 20 til 40 mm, 40 til 60 mm, 60 til 80 mm, 80 til 100 mm pr. år).

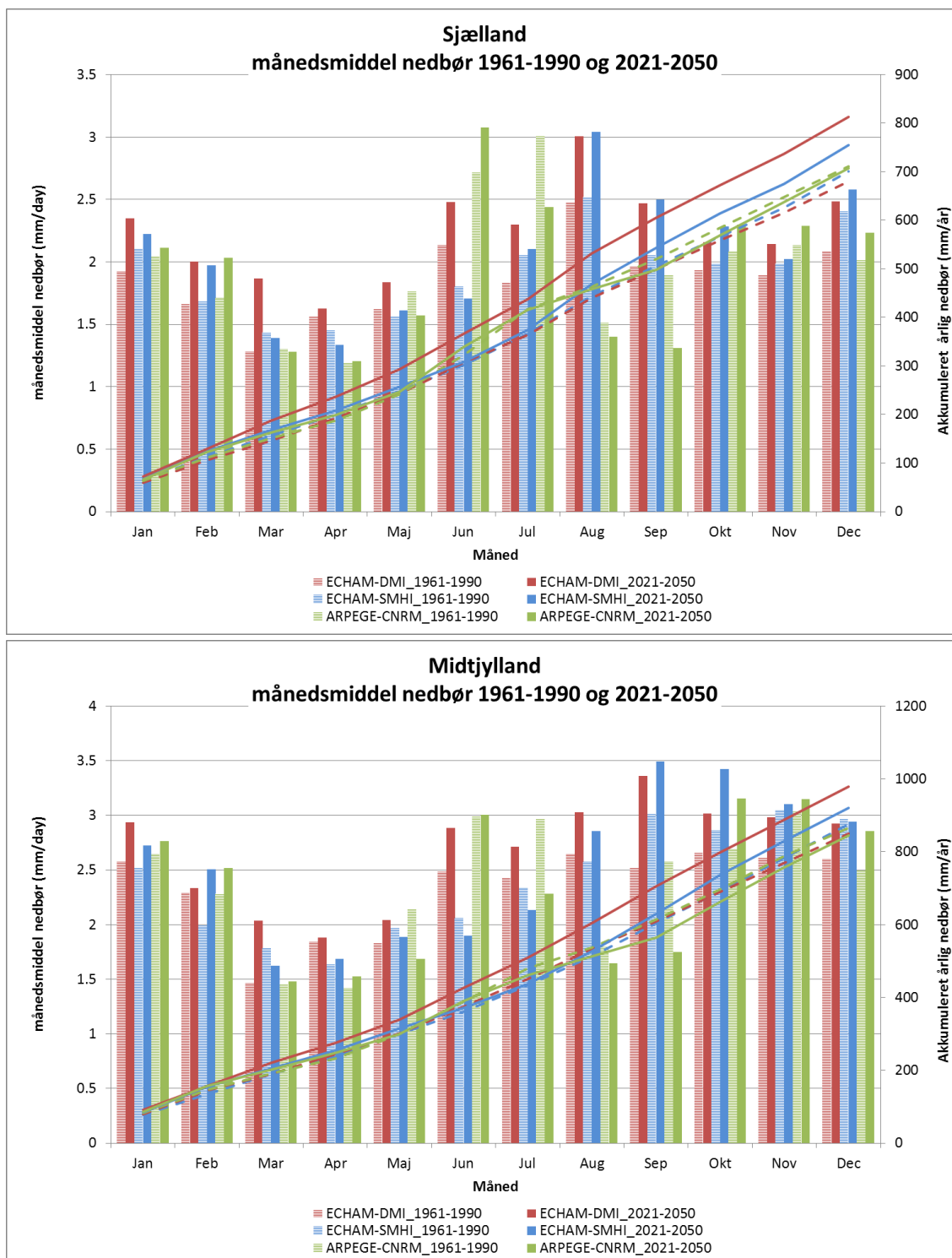
4.2 Bag om forskelle i nedbørsændringer for tør, median og våd klimamodel

I figur 4.8 er vist ændringer i nedbøren for Sjælland og Midtjylland for de tre udvalgte klimamodeller, efter at data er DBS-korrigerede:

- ECHAM-DMI (største stigninger i grundvandsdannelse/grundvandsstand)
- ECHAM-SMHI (median/middel stigning i grundvandsdannelse/grundvandsstand)
- ARPEGE-CNRM (mindste stigning/fald i grundvandsdannelse/grundvandsstand)

Det fremgår af figur 4.7, at de tre udvalgte modeller giver omtrent samme nedbørsmængde for referenceperioden hhv. ca. 700 mm/år for Sjælland og ca. 850 mm/år for Midtjylland. Fordelingen over året er imidlertid ret forskellig for de tre modeller. ARPEGE-CNRM har væsentlig større nedbør i juni og juli for referenceperioden, men mindre nedbør i august og september i forhold til de to øvrige modeller. Samlet set for vinterhalvåret er der ikke den store forskel på de tre modeller. ECHAM-SMHI har lidt større nedbør for perioden oktober-marts end ECHAM-DMI, hvorimod ECHAM-DMI har større nedbør end ECHAM-SMHI for april-juni.

Ser man på ændringerne har ECHAM-DMI den største stigning af de tre modeller i nedbøren på årsbasis med en tilvækst på knap 150 mm/år for både Sjælland og Midtjylland. ECHAM-SMHI har stigninger på omtrent det halve. ARPEGE-CNRM har et lille fald i årsnedbøren. Når man kigger på ændringer fra de forskellige globalmodeller helt frem mod slutningen af det 21. årh. (2071-2100 i forhold til 1961-1990) grupperet og midlet for tilhørende globalmodeller, er der generelt lidt forskellige udviklinger med hensyn til ændringer i nedbøren på månedsbasis (Seaby et al., in prep). ARPEGE (ARPEGE-CNRM og ARPEGE-DMI) er klimamodeller, der forudser et fald i nedbøren faktisk for samtlige måneder lige bortset fra december, hvor alle modeller er enige om en stigning i nedbøren. Det største fald i nedbøren ifølge ARPEGE modellerne er for perioden marts til oktober med juli-august som de måneder, der har de allerstørste fald. ECHAM model familien giver i modsætning til ARPEGE markante stigninger i nedbøren i perioden november til januar, og igen i perioden marts-maj. For juni og august viser ECHAM et fald i nedbøren. Det har hydrologisk set den betydning, at grundvandsdannelsen med ECHAM modellerne, bl.a. ECHAM-SMHI og ECHAM-DMI øges væsentligt, samtidig med at sommerperioden bliver mere tør.



Figur 4.7 Ændringer i månedsnedbør for de tre udvalgte klimamodeller (ECHAM-DMI, ECHAM-SMHI og ARPEGE_CNRM) for referenceperioden 1961-1990 (tonede søjler) og fremtidsperioden 2021-2050 (udfyldte søjler). Desuden er vist akkumulerede værdier på stiplede kurver (1961-1990) og optrukne linjer (2021-2050).

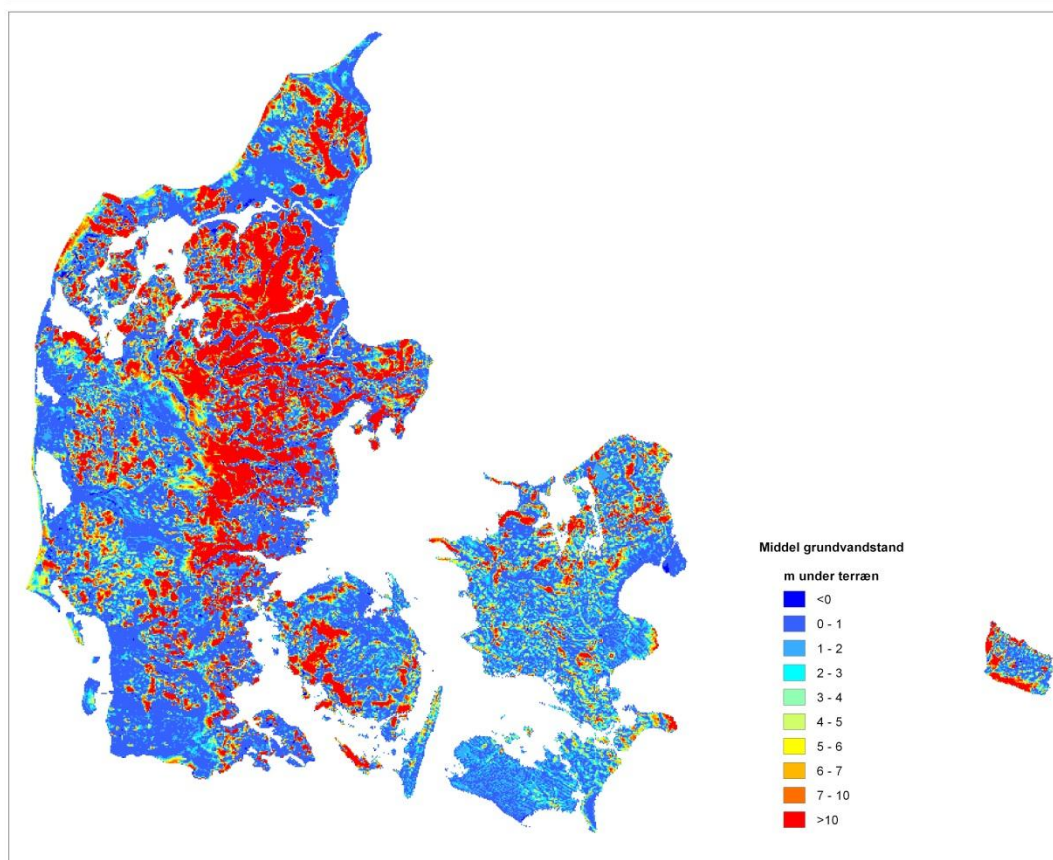
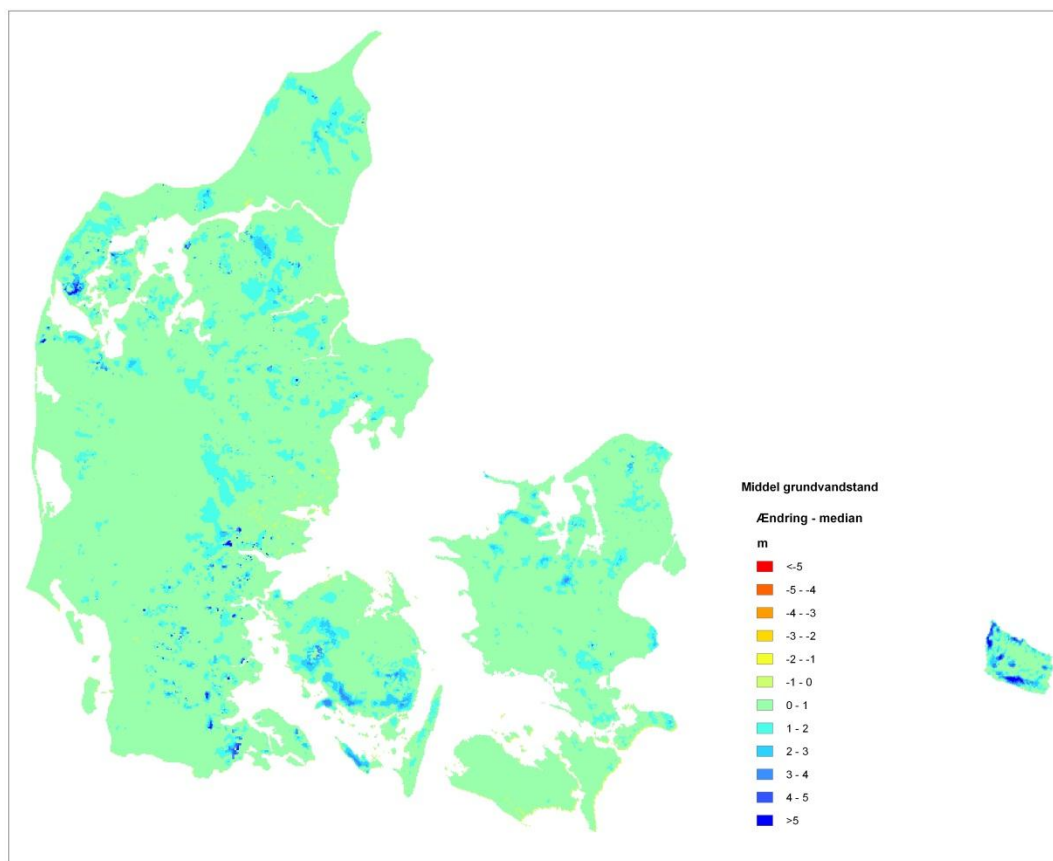
De fleste modeller i ENSEMBLES forudser stigninger i årsnedbøren for Danmark på mellem 1,08 og 1,18 for 2071-2100 i forhold til 1961-1990. En undtagelse er de to ARPEGE modellerne, som forudser et fald i årsnedbøren med faktor 0,84 og 0,89 (Seaby et al., in

prep). På tværs af samtlige modeller ses fald i nedbøren fra juni til oktober (0,85-0,98), og stigninger for perioden november til maj (1,04-1,24), hvor ECHAM-DMI udgør den 'vådeste' model (faktor for årsnedbøren = 1,19). Fremskrivningerne vist i figur 4.7 følger i store træk den langsigtede fremskrivning. ARPEGE-CRNM har fx stort set uændret nedbør på årsbasis for den nære fremtid, og udviser stigninger for vinterhalvåret, der ikke forventes at holde frem mod 2071-2100. Det samme har ECHAM-DMI med hensyn til sommerperioden, hvor der ses stigninger for nær fremtid, men et fald på det længere sigt.

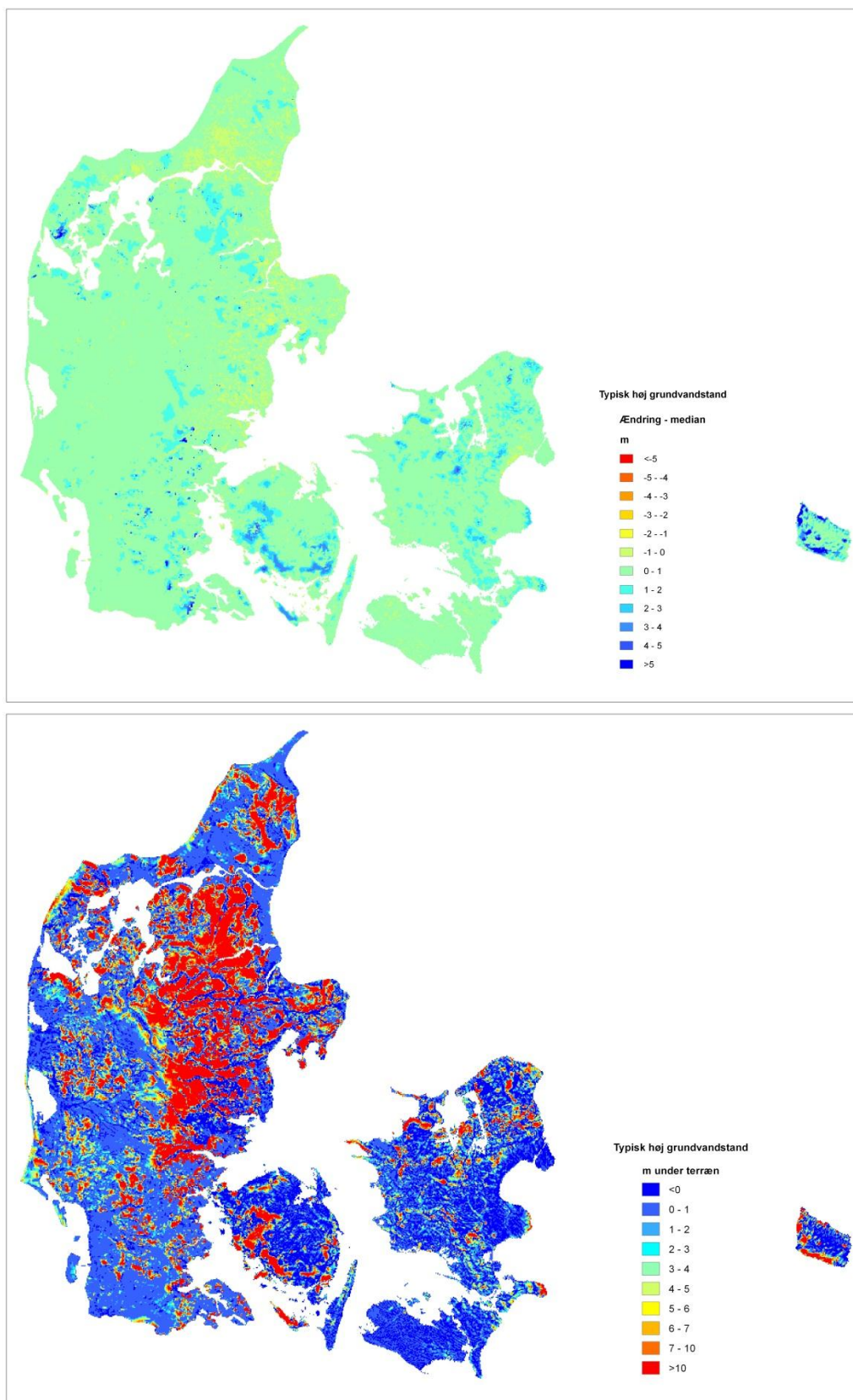
4.3 Resultater for de fire leverancer

I det følgende vises resultater for de fire leverancer, fremkommet ved rangordning af resultater fra de tre udvalgte GCM/RCMs og ved at anvende de intervaller, der fremkom under parameteranalysen. I figur 4.8 – 4.11 er vist resultater for samtlige fire leverancer. Samtlige kort er medtaget i lidt større format i Appendix 3. Ændringen i middel grundvandsstand (figur 4.8) for "median modellen" ligger generelt i intervallet 0 – 1 meters stigning i grundvandsspejlet. Lokalt ses sammenhængende områder med større stigninger fra over 1 meter og enkelte steder til over 5 meter som følge af klimaændringer frem mod 2021-2050. Typisk forekommer de største stigninger der, hvor der er stor dybde til grundvandsspejlet, men omvendt er der områder med stor dybde til grundvandsspejlet, hvor der ikke er simuleret store stigninger af grundvandsspejlet fx i Midt- og Vestjylland. Øget vandindvinding til markvanding, som er medregnet i fremskrivningen, kan være en del af forklaringen. Sammenholder man median ændringer med resultater fra 'største stigning' (våd) og 'mindste stigning' (tør) vist i Appendix 3, kan man se, at den våde fremskrivning udpeger mange flere områder fx med stigninger over 1 meter, og at selv den tørre fremskrivning giver stigninger i middel grundvandsspejlet fra 0-1 meter for den østlige del af Sjælland og dele af Nord- og Vestjylland. For en stor del af landet viser tør klimamodel et fald i grundvandsspejlet, visse steder på mere end to meter i dele af Midt- og Østjylland og på dele af Fyn.

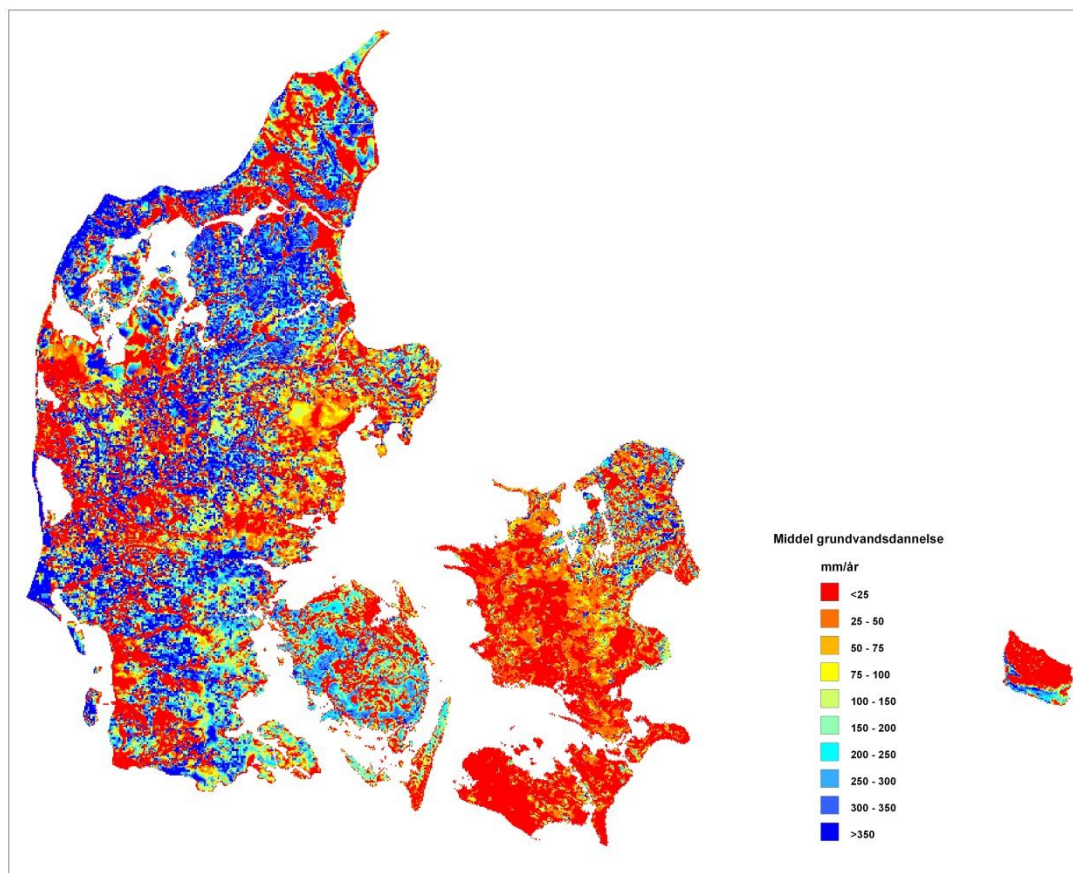
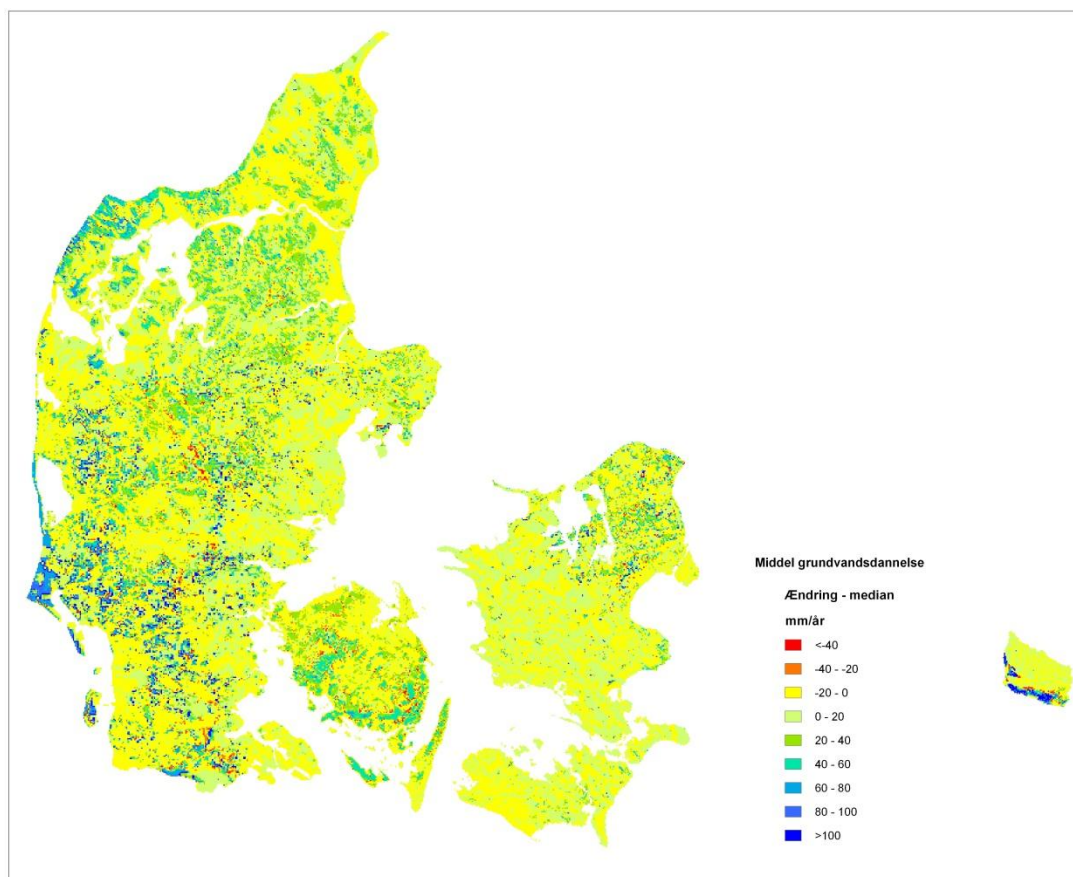
Ændringer i typisk høj grundvandsstand (figur 4.9) følger kun i nogen grad middel grundvandsstandens ændringer. Der er en række områder, som udviser et fald i typisk høj grundvandsstand (mellem 0 og 1 meters fald) fx i Køge bugt området og i dele af Østjylland og Nordjylland med median klimafremskrivningen. Forskellen i ændringer mellem typisk høj og middel grundvandsstand træder dog tydeligt frem i våd og tør klimamodel (Appendiks 3). Selv i tør klimamodel ses stigninger i typisk høj grundvandsspejl på 0 til en meter i den vestlige og sydlige del af landet og for områder i nordlige og østlige del af Sjælland. Ændringer i middel grundvandsdannelse (figur 4.10) viser typisk et fald på mellem 0 og 20 mm/år typisk i områder med lav grundvandsdannelse (0-25 mm/år). I øvrige områder ses typisk en stigning på mellem 0 og 20 mm i median scenariet. Våd klimamodel (Appendiks 3) har markante stigninger i grundvandsdannelsen på over 40-100 mm/år (en del steder over 100 mm/år), mens tørt scenarie har faldende grundvandsdannelse i hovedparten af landet, enkelte steder med op til et fald på over 40 mm/år. Ændring i typisk lav grundvandsdannelse (figur 4.11) følger i store træk ændringen i middel grundvandsdannelse for median klimamodel. Det gælder også i nogen grad for våd og tør klimamodel.



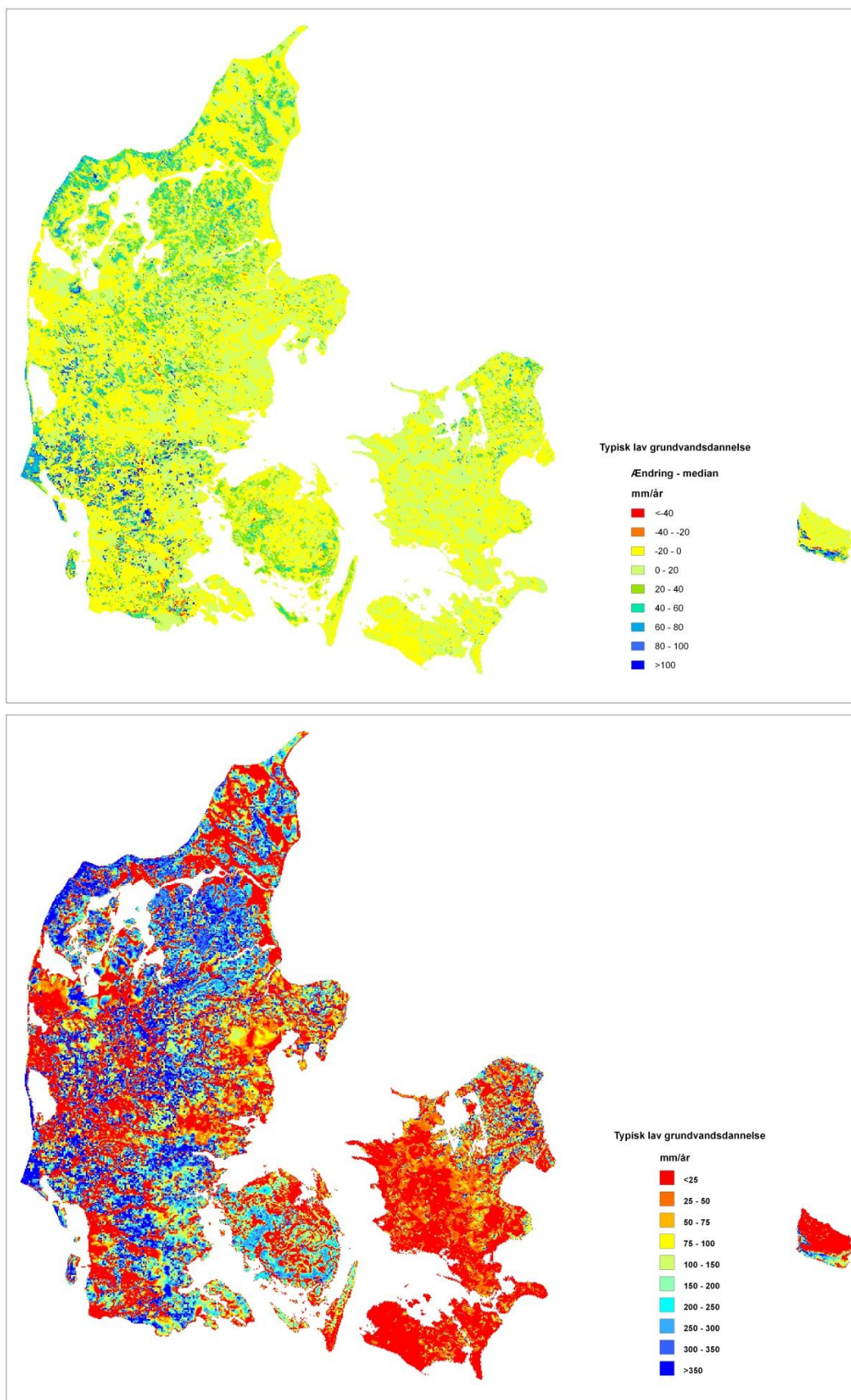
Figur 4.8 Ændring i middel grundvandsstand for "median klimamodel" 2021-2050 i forhold til 1961-1990. Nederst dybde til middel grundvandsspejl for kontrolperioden 1991-2010. Negative værdier for ændringer betyder et fald i forhold til referenceperioden 1961-1990.



Figur 4.9 Ændring i typisk høj grundvandsstand for "median klimamodel" 2021-2050 i forhold til 1961-1990. Nederst dybde til typisk høj grundvandsspejl for kontrolperioden 1991-2010.



Figur 4.10 Ændring i middel grundvandsdannelse for "median klimamodel" 2021-2050 i forhold til 1961-1990. Nederst middel grundvandsdannelse for kontrolperioden 1991-2010.

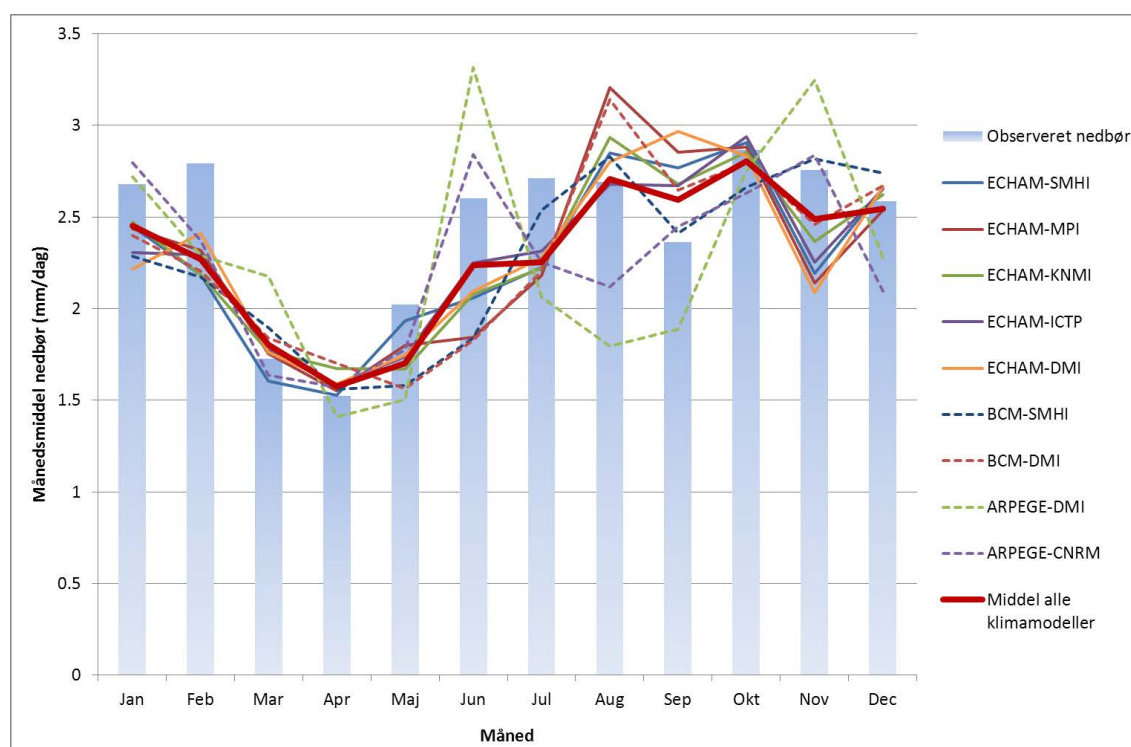


Figur 4.11 Ændring i typisk lav grundvandsdannelse "median klimamodel" 2021-2050 i forhold til 1961-1990. Nederst typisk lav grundvandsdannelse for kontrolperioden 1991-2010.

4.4 Vurdering af ændringer i klimainputs signifikans

DBS-korrektionen for kontrolperioden 1991-2010 for nedbør, temperatur og fordampning har median og standardafvigelse der er velbestemt for samtlige syv domæner ved DBS-korrektionen (Seaby et al., in prep). Selvom middelværdi og varians dermed er opfyldt for hvert af de syv domæner (DK-modeller) og for hver årstid, indeholder de ni udvalgte klimamodeller dog en variabilitet med hensyn til tidlige ændringer fra måned til måned som vist i figur 4.12, ligesom den rumlige fordeling af klimavariabel varierer lokalt mellem klimamodellerne. Det betyder, at de også vil give forskelle i beskrivelsen af hydrologiske forhold for kontrolperioden, altså fx forskelle i grundvandsstand og grundvandsdannelse. Det samme gælder for referenceperioden, så ændringer er dermed i forskellige delområder af domænet simuleret ud fra lidt forskellige starttrykniveau betingelser, der er fremkommet ved tilbagespilingen. Da der er en afhængighed, omend svag, mellem fx ændringer i grundvandsstand og dybden til grundvandsspejlet, kan det give lidt ekstra støj på resultaterne, at der er denne rumlige variabilitet, som træder ind som en yderligere usikkerhedskilde som følge af DBS-korrektionen på domæneniveau.

Når man sammenligner ændringer i grundvandsspejlet (2021-2050 i forhold til 1961-1990) kan det være relevant at vide om ændringerne i ifølge klimamodellerne har været signifikante for fx nedbør, temperatur og fordampning for perioderne 1961-1990 og 2021-2050 i forhold til 1991-2010 hvor DBS-korrektionen er fastlagt i forhold til observationsdata (se figur 4.12).



Figur 4.12 Sammenligning af DBS-korrigeret nedbør (mm/dag) på månedsbasis for kontrolperioden 1991-2010 (kurver) med observeret nedbør

For de tre valgte model viser en sådan analyse for hele landet (Seaby et al., in prep), at ARPEGE-CRNM ikke udviser nogen signifikant udvikling i nedbøren, hverken når man spoler tilbage fra kontrolperioden 1991-2010 til 1961-1990, eller når man spoler frem til en senere periode. ARPEGE-CRNM udviser først en signifikant ændring af nedbøren, når man

kommer helt frem til slutningen af det 21. årh. for perioden 2071-2100 i forhold til 1991-2010.

ECHAM-DMI udviser en signifikant ændret nedbør, når man spoler tilbage, og når man spoler frem til 2041-2070. ECHAM-SMHI er ikke signifikant, hverken når man spoler tilbage eller frem til 2041-2070. Her viser signalet fra klimamodellen, at referenceperioden og nutidsperioden har nogenlunde sammen nedbør, og at der ikke er signifikante ændringer i middelnedbør.

Når det gælder temperatur er alle tre modeller signifikante ved tilbage- og fremspoling. Referencefordampning viser imidlertid ikke nogen signifikant udvikling.

5. Referencer

- Christensen, J.H., Rummukainen, M. and Lenderink, G. 2009. Formulation of very-high-resolution regional climate model ensembles for Europe [Research Theme 3]. ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, UK, 47-58 pp
- Christensen, J.H., Carter, T.R., 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, Dreveton C, Braun A, Cariolle D (1994) The ARPEGEIFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling. *Clim Dyn* 10: 249–266
- Doherty, J., 2004. PEST: Model-independent Parameter Estimation.
- Hay et al., 2000. A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. Source: JOURNAL OF THE AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION Volume: 36 Issue: 2 Pages: 387-397 DOI: 10.1111/j.1752-1688.2000.tb04276.x Published: APR 2000
- Henriksen, H.J. et al., 2003. Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark. *Journal of Hydrology*, 280(1-4): 52-71.
- Henriksen, HJ, Troldborg, L, Højberg, AL and Refsgaard, JC (2008) Assessment of exploitable groundwater resources of Denmark by use of ensemble resource indicators and numerical groundwater-surface water model. *Journal of Hydrology*. 348 (1-2) 224-240.
- Højberg, A.L, Troldborg, L., Stisen, S., Christensen, B. and Henriksen, H.J., 2012. Maintenance of a national water resources model as a participatory modelling task. *Environmental Modelling & Software* (submitted)
- Højberg A.L, Troldborg L., Nyegaard P., Ondracek M., Stisen S. & Christensen B.S.B. 2010. DK-model2009 - Sammenfatning af opdateringen 2005 - 2009. GEUS report 2010/81, 39 pp.
- Højberg, A.L. and Juhler, R.K. 2011. Preliminary analysis of network of groundwater level monitoring. GEUS report 2011/140. 56 pp.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland.
www.ipcc.ch/publications_anddata/ar4/syr/en/contents.html
- Jacob, D., U. Andrae, G. Elgered, C. Fortelius, L. P. Graham, S. D. Jackson, U. Karstens, Chr. Koepken, R. Lindau, R. Podzun, B. Rockel, F. Rubel, H.B. Sass, R.N.D. Smith, B.J.J.M. Van den Hurk, X. Yang, 2001: A Comprehensive Model Intercomparison Study Investigating the Water Budget during the BALTEX-PIDCAP Period. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol.77, Issue 1-4, 19-43.
- Kjellström, E., Bärring, L., Gollvik, S., Hansson, U., Jones, C., Samuelsson, P., Rummukainen, M., Ullerstig, A., Willén U. and Wyser, K., 2005. A 140-year simulation of European climate with the new version of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3). *Reports Meteorology and Climatology*, 108, SMHI, SE-60176 Norrköping, Sweden, 54 pp.
- van der Linden, P and Mitchell, JFB (eds) ENSEMBLES: climate change and its impacts. Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met. Office Hadley Centre, Exeter. 2009
- van Meijgaard, E., L.H. van Uift, W.J. van de Berg, F.C. Bosveld, B.J.J.M. van den Hurk, G.

- Lenderink, A.P. Siebesma, 2008: The KNMI regional atmospheric climate model RACMO, version 2.1. KNMI Technical Report 302, 43 pp. Available from KNMI, Postbus 201, 3730 AE, De Bilt, The Netherlands.
- Nakićenović, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler et al., (2000). Emission scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 599 pp.
- Otterå, O. H., M. Bentsen, I. Bethke and N.G. Kvamstø (2009): Simulated pre-industrial climate in Bergen Climate Model (version 2): model description and large- scale circulation features, *Geosci. Model Dev.*, 2, 197- 212, 2009.
- Pal, J.S., F. Giorgi, X. Bi, N. Elguindi, F. Solmon, X.J. Gao, R. Francisco, A. Zaakey, J. Winter, M. Ashfaq, F. Syed, J. Bell, N. Diffenbaugh, J. Karmacharya, A. Konare, D. Martinez-Castro, R. Porfirio da Rocha, L. Sloan and A. Steiner, 2007: Regional climate modeling for the developing world: The ICTP RegCM3 and RegCNET. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 1395-1409.
- Piani, C., Haerter, J.O., Coppola, E. (2010), Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theor. Appl. Climatol.* 99:187–192. Rummukainen, M., 2010. State-of-the-art with regional climate models.
- Radu, R., Déqué, M., Somot, S., 2008. Spectral nudging in a spectral regional climate model. *Tellus* 60A, 898–910. doi:10.1111/j.1600-0870.2008.00341.x.
- Refsgaard, J.C., 2012. Det fremtidige klima i Danmark. I: IDA, 2012. Klimatilpasning af Danmark – IDAs klimatilpasningsstrategi. Marts 2012. p. 11-17.
- Refsgaard, J.C., Stisen, S., Højberg, A.L., Olsen, M., Henriksen, H.J., Børgesen, C.D., Vejjen, F., Kern-Hansen, C. og Blicher-Mathiesen, G., 2011. Vejledning i opgørelse af vandbalancen ud fra hydrologiske data for perioden 1990-2010. GEUS rapport 2011/77.
- Roeckner, E., G. Bäuml, L. Bonaventura, R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Hagemann, I. Kirchner, L. Kornblüeh, E. Manzini, A. Rhodin, U. Schlese, U. Schulzweida, and A. Tompkins, 2003: The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: Model description. Max Planck Institute for Meteorology Rep. 349, 127 pp. [available from MPI for Meteorology,
- van Roosmalen, L., T.O. Sonnenborg, and K.H. Jensen, 2009. The impact of climate and land-use changes on the hydrology of a large-scale agricultural catchment, *Water Resources Research*, 45, 1-18, doi:10.1029/2007WR006760.
- van Roosmalen, L., T.O. Sonnenborg, K.H. Jensen, and J.H. Christensen (2011), Comparison of hydrological simulations of climate change using perturbation of observations and distribution based scaling, *Vadose Zone Journal*, 10, 136-150, doi:10.2136/vzj2010.0112.
- Seaby, L.P., Refsgaard, J.C., Sonnenborg, T.O., Stisen, S., Christensen, J.H. and Jensen, K.H. (in prep.) Downscaling and uncertainty in climate projections for Denmark.
- Seifert, D., T.O. Sonnenborg, J.C. Refsgaard, A.L. Højberg, and L. Trolborg (2012), Assessment of hydrological model predictive ability given multiple conceptual geological models, Accepted for publication in *Water Resources Research*.
- Stisen, S., Anker L. Højberg, Lars Trolborg, Jens Christian Refsgaard, Britt S.B. Christensen, Martin Olsen and Hans Jørgen Henriksen, 2012. On the importance of appropriate rain-gauge catch correction for hydrological modelling at mid to high latitudes. Submitted.

Appendix 1- Beskrivelse af produktionskørsler

Produktionsmål

- Referenceklima (1961-1990)
- Middel grundvandsstand
- Typisk høj grundvandsstand
- Middel grundvandsdannelse
- Typisk lav grundvandsdannelse
- Fremtidsklima (2021-2050)
- Ændring i middel grundvandsstand
- Ændring i typisk høj grundvandsstand
- Ændring i middel grundvandsdannelse
- Ændring i typisk lav grundvandsdannelse
- Usikkerhed
- Tre alternative kørsler til beskrivelse af input usikkerhed (jf. ECHAM-DMI, ECHAM-SMHI og ARPEGE-CNRM som repræsentative for største, middel og mindste stigning ud fra ENSEMBLE klimamodel input fra ni kombinationer)

Med referenceklima forstås DBS-korrigerede data for perioden 1961-1990.

Med fremtidsscenario klima forstås DBS-korrigerede data for perioden 2021-2050.

Med middel grundvandsstand forstås dybde til (øverste) frie grundvandsspejl, midlet over hele 30 års perioden for referenceklima (1961-1990) og 30 års periode for fremtidsklima (2021-2050).

Typisk høj grundvandsstand oversættes til den højeste grundvandsstand på (middel af) 5 dages varighed, der optræder i mindst 3 års opgørelser ud af hele 30 års perioden for hhv. reference, 1961-1990 og fremtidsperioden 2021-2050 (svarende til at den overskrides i gennemsnit hver 10. år).

Middel grundvandsdannelse oversættes til grundvandsdannelse til model 2 (fra modellag 1, dvs. perkolat) midlet over hele 30 årsperioden (reference, 1961-1990 og fremtid, 2021-2050).

Typisk lav grundvandsdannelse oversættes til den laveste grundvandsdannelse som midlet på årsniveau underskrides tre gange i 30 års perioden (reference, 1961-1990 og fremtid, 2021-2050) til beregningslag 2 (svarende til en '10 års hændelse' i lav grundvandsdannelse til beregningslag 2).

Ændringer oversættes til forskel i udregnedeleverancer for 2021-2050 klima og referenceklima (1961-1990) for pågældende leverance / valgte klimamodel (MIN, MEAN, MAX)

Temakort over dybder til grundvandsstand og grundvandsdannelse baseres på nutids- observeret klima 1991-2010. Ifølge klimamodeller er der kun begrænset forskel på 1961-90 og 1991-2010 i forhold til nedbøren.

Model protokol

Der gennemføres en generel opvarmnings-kørsel (hotstart) med udgangspunkt i den inverse optimering af de enkelte områder og med den inverse optimering som hotstart. Hotstarten anvender historiske klimadata fra DMI 1990-2010. Kørslen navngives DKX_Hot, hotstart- og griddata gemmes med tidskridt på 365 dage (8760 timer) - det er ikke nødvendigt at gemme vandbalancedata. Denne hotstarts-kørsel anvendes til samtlige produktionsspecifikke hotstart-kørsler.

For hver produktionskørsel gennemføres først (med udgangspunkt i den generelle hotstarts-kørsel) en produktionsspecifik hotstarts-kørsel, hvor hotstart- og griddata gemmes med tidskridt på 365 dage (8760 timer) - det er ikke nødvendigt at gemme vandbalancedata.

Hver produktionskørsel gennemføres med udgangspunkt i den produktionsspecifikke hotstarts-kørsel. Produktionskørslen opsættes, så grid- og vandbalance data på 5 dages niveau (120 timer) kan udtrækkes.

Der anvendes DBS-korrigerede fremtidsscenario klimamodeldata for såvel fremtidsperioden som referenceperioden. Med fremtidsperiode forstås 2021 - 2050 og med referenceperiode forstås 1961 - 1990.

Der anvendes middelindvinding for år 2000-2005 i samtlige produktions- og hotstartskørsler. Der anvendes følgende nummerering for biaskorrigerede klimainput: 1: BCM-SMHI, 2: ECHAM-DMI, 3: BCM-DMI, 4: ECHAM-KNMI, 5: ECHAM-SMHI, 6: ECHAM-MPI, 7: ECHAM-ICTP, 8: ARPEGE-DMI, 9: ARPEGE-CNRM.

Antal og navngivning af produktionskørsler er (eksempel fra område 1): (max= ECHAM-DMI, mid= ECHAM-SMHI, min= ARPEGE-CNRM).

Simulation name	Climate data	Periode	Storage interval	note	Run
DK1_HOT	Historical data	1990-2010	8760 h	General hotstart file	yes
DK_1991-2010_OBS	Historical data	1991-2010	120 h	Production file for generating reference level	yes
DK1_DBS_ECHAM-DMI_1961-1990_HOT	DBS-ECHAM-DMI	1961-1990	8760 h	Production specific hotstart file	yes
DK1_DBS_ECHAM-DMI_1961-1990	DBS-ECHAM-DMI	1961-1990	120 h	Production file for max dH/dT climate reference period (MIN)	yes
DK1_DBS_ECHAM-SMHI_1961-1990_HOT	DBS-ECHAM-SMHI	1961-1990	8760 h	Production specific hotstart file	yes
DK1_DBS_ECHAM-SMHI_1961-1990	DBS-ECHAM-SMHI	1961-1990	120 h	Production file for mean dH/dT climate reference period (MEAN)	yes
DK1_DBS_ARPEGE-CNRM_1961-1990_HOT	DBS-ARPEGE-CNRM	1961-1990	8760 h	Production specific hotstart file	yes
DK1_DBS_ARPEGE-CNRM_1961-1990_HOT	DBS-ARPEGE-CNRM	1961-1990	120 h	Production file for min dH/dT climate reference period (MIN)	yes
DK1_DBS_ECHAM-DMI_2021-2050_HOT	DBS-ECHAM-DMI	2021-2050	8760 h	Production specific hotstart file	yes
DK1_DBS_ECHAM-DMI_2021-2050	DBS-ECHAM-DMI	2021-2050	120 h	Production file for max dH/dT climate near future period (MAX)	yes
DK1_DBS_ECHAM-SMHI_2021-2050_HOT	DBS-ECHAM-SMHI	2021-2050	8760 h	Production specific hotstart file	yes
DK1_DBS_ECHAM-SMHI_2021-2050	DBS-ECHAM-SMHI	2021-2050	120 h	Production file for mean dH/dT climate near future period (MEAN)	yes
DK1_DBS_ARPEGE-CNRM_2021-2050_HOT	DBS-ARPEGE-CNRM	2021-2050	8760 h	Production specific hotstart file	yes
DK1_DBS_ARPEGE-CNRM_2021-2050_HOT	DBS-ARPEGE-CNRM	2021-2050	120 h	Production file for min dH/dT climate near future period (MIN)	yes

Middel grundvandsstand udtrækkes via komponenten "depth to phreatic surface" som midles for hele perioden - for hver af perioderne (1961-1990 og 2021-2050). Der er indarbejdet en omprogrammeret rutine i gridtool, idet der er identificeret uhensigtsmæssigheder i de udtræk, der kan foretages jf. MIKE SHE standardrutine, afhængigt af om man 'springer' fra lag 1 til lag 2, når vand-spejl i øverste lag ændres fra at stå over halvdelen af lagtykkelsen, til at stå under.

Typisk høj grundvandsstand udtrækkes via komponenten "depth to phreatic surface" (målt i meter under terræn). Først dannes der års maksima via gridtools, og herefter tages 93.1% fraktilen af denne fil (svarende til tredje højeste værdi indenfor perioden – jf. 10 års hændelse).

Middel grundvandsdannelse udtrækkes som nedadrettet strømning til lag 2, data midles og vendes på årsniveau via gridtool (omregnes til mm/år ganges med -365.25). Efterfølgende nulstilles gridceller med opadrettet strømning.

Typisk lav grundvandsdannelse udtrækkes som nedadrettet strømning til lag 2, først midles og vendes data på årsniveau via gridtool (omregnes til mm/år ganges med -365.25), herefter tages 6.897% fraktilen af denne fil (svarende til tredje laveste værdi indenfor perioden – 10 års hændelse). Efterfølgende nulstilles alt opadrettet strømning.

Ændringerne i grundvandsstand og grundvandsdannelse for de enkelte scenarier udregnes som fremtid 2021-2050 grid (pkt. 8-11) minus referencegrid 1961-1990 (pkt. 8-11) for de enkelte scenarier

GIS bearbejdning

Alle raster data hentes ind i ArcGIS pr område som dfs2 filer. Herefter laves en samling af data, så der dannes et tema pr datatype (produktionsmål 1.a, 1.b, 2.a, 2.b) for Jylland, Fyn, Sjælland og små øerne, samt en fil for Bornholm. Herefter slettes hav og fjord områder fra de landsdækkende raster filer. Data eksporteres til KFT protalen som geo-refererede tiff filer, hvor hvert grid er tildelt et interval, der er dimensioneret ud fra usikkerhedsanalysens resultater.

Datahåndtering

Data organiseres efter områder og datatyper. Af data gemmes primært:

- a. Modelopsætninger inkl. .she filer
- b. Udtræksrutiner
- c. Produktionsresultater minus hotstarts kørselsdata
- d. GIS resultater

Appendix 2 Usikkerhedsanalyser

Inputusikkerheder

På de følgende 4 sider (Fig. A2.1- A2.8) vises først en række resultater af usikkerhedsanalysen for Ringkøbing fjord oplandet og for Sjælland.

Først vises resultater af ændringer for de fire leverancer som følge af inputusikkerheden baseret på beregninger med alle ni kombinationer af GCM og RCM for hhv. Ringkøbing oplandet (typisk sandet område i Vestjylland) og Sjælland (typisk leret område i Østdanmark). Graferne er fremstillet ved for hver modelcelle at beregne en middel af ændringerne på tværs af de ni forskellige GCM/RCM for hver af de fire leverancer. Herefter er resultaterne for de ni GCM/RCM kombinationer afbildet op ad y-aksen som funktion af middelværdien (x-aksen). Var det valgt at anvende en simpel midling af de ni klimamodeller ville resultaterne falde på linjen $y=x$. Spredningen omkring 1:1 linjen angiver den spredning der er på resultater ved anvendelse af de ni kombinationer af GCM/RCM'ere. Figuren illustrerer derfor det udfaldsrum, som input usikkerheden udspænder.

Der ses generelt en markant usikkerhed på valg af GCM/RCM input, typisk med de valgte repræsentative modeller som det valg, der giver størst stigning, median stigning (tæt på $y=x$ altså middelværdien) og mindst stigning (evt. lille fald). Dermed er det godt gjort, at man ved valg af ECHAM-DMI, ECHAM-SMHI og ARPEGE-CNRM udspænder det samlede udfaldsrum for samtlige fire leverancer, og derfor kan nøjes med at køre de tre modeller for de resterende fem områder.

Parameterusikkerheder

På de følgende figurer (Fig. A2.9 – A2.12) er vist resultater af parameter perturbationerne, dvs. følsomhedsanalyser, for de analyserede parametre. Figurerne er fremkommet ved at opstille faste intervaller for de beregnede ændringer for de fire leverancer, hvor der for grundvandsstanden er anvendt intervaller svarende til 0.5 m, mens der for grundvandsdannelsen er anvendt et interval på 20 mm/år. For hvert interval er modelceller med en ændring i det pågældende interval identificeret i modellen med de optimerede parametre. For disse modelceller er der beregnet en middel samt standardafvigelse for de beregnede ændringer i modellen med den pertuberede parameter. Disse er afbildet med interval midtpunkterne ud af x-aksen, mens middelforskellen mellem ændringen beregnet med den optimerede og pertuberede model er angivet på op ad y-aksen (venstre y-akse). Øverst i figurerne er de tilsvarende standardafvigelser afbildet. Den nederste del af figurerne viser antallet af modelceller, hvor ændringen beregnet med modellen med de optimerede parametre falder indenfor det pågældende interval. Des tættere middelforskellen ligger på 0, jo mindre betyder parameter-perturbationen for bestemmelse af middelændringen indenfor intervallet. Ved positive middelforskelle giver den anvendte reduktion af parameterværdien en generel reduktion af den beregnede ændring fra 1961-1990 til 2021-2050, og vice versa.

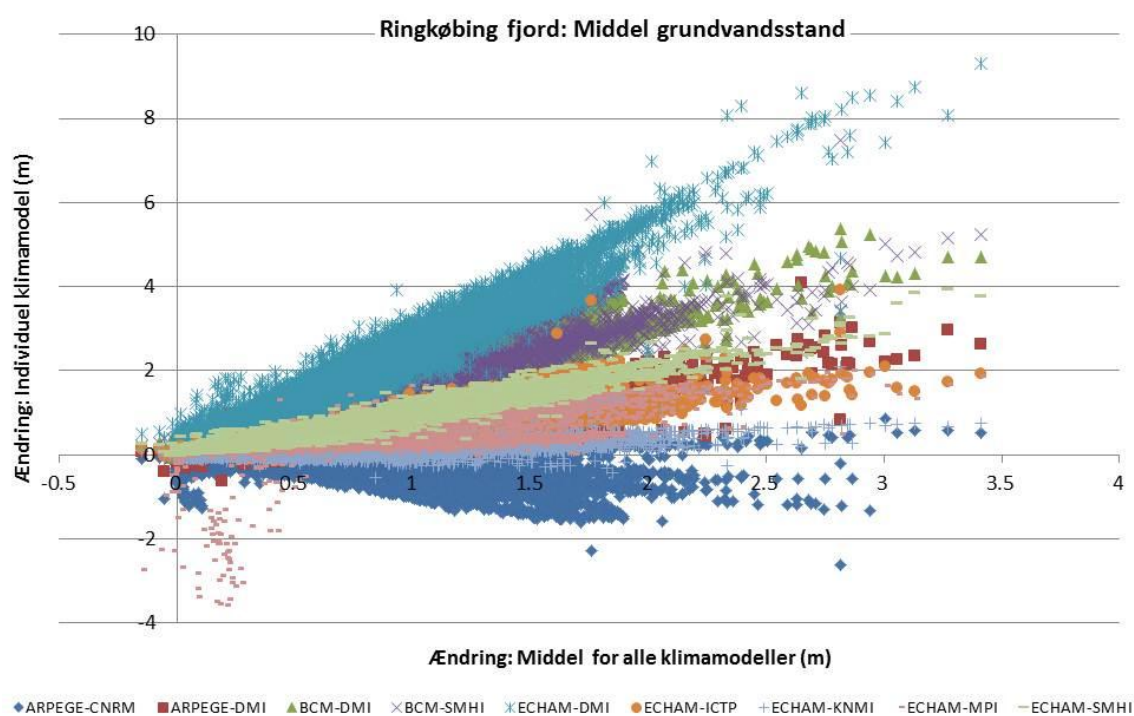


Fig. A2.1 Resultater for Ringkøbing fjord inputusikkerheder: ændring i middel grundvandsstand, m, 2021-2050 i forhold til 1961-1990.

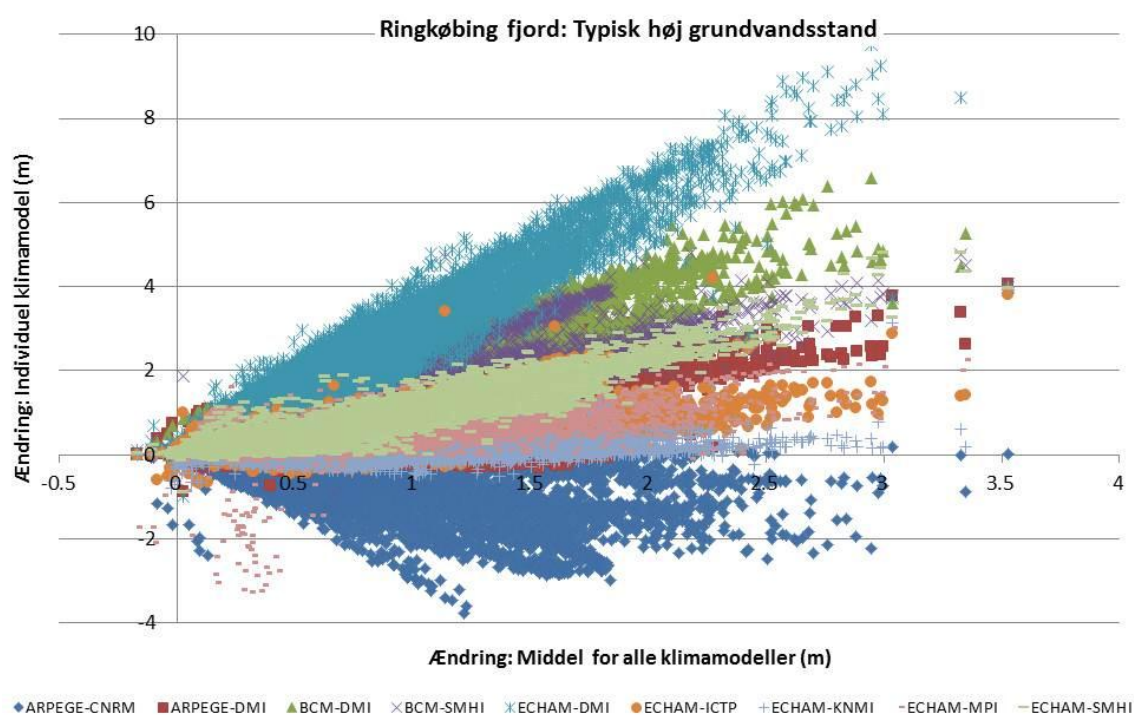


Fig. A2.2 Resultater for Ringkøbing fjord inputusikkerheder: ændring i typisk høj grundvandsstand, m, 2021-2050 i forhold til 1961-1990.

Det fremgår at ARPEGE-CNRM giver de mindste ændringer for Ringkøbing (et fald), mens ECHAM-DMI giver de største ændringer. ECHAM-SMHI ligger midt i de 9 for begge grundvandsstande (middel og typisk høj)

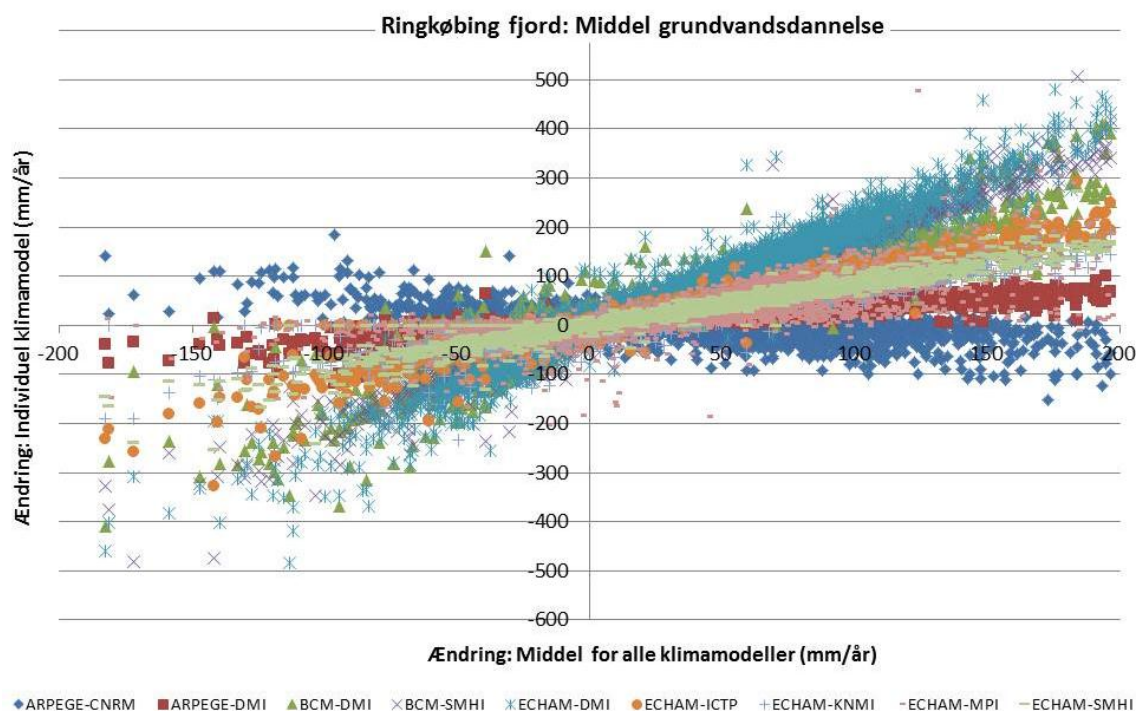


Fig. A2.3 Resultater for Ringkøbing fjord inputusikkerheder: ændring i middel grundvandsdannelse, i mm/år, 2021-2050 i forhold til 1961-1990.

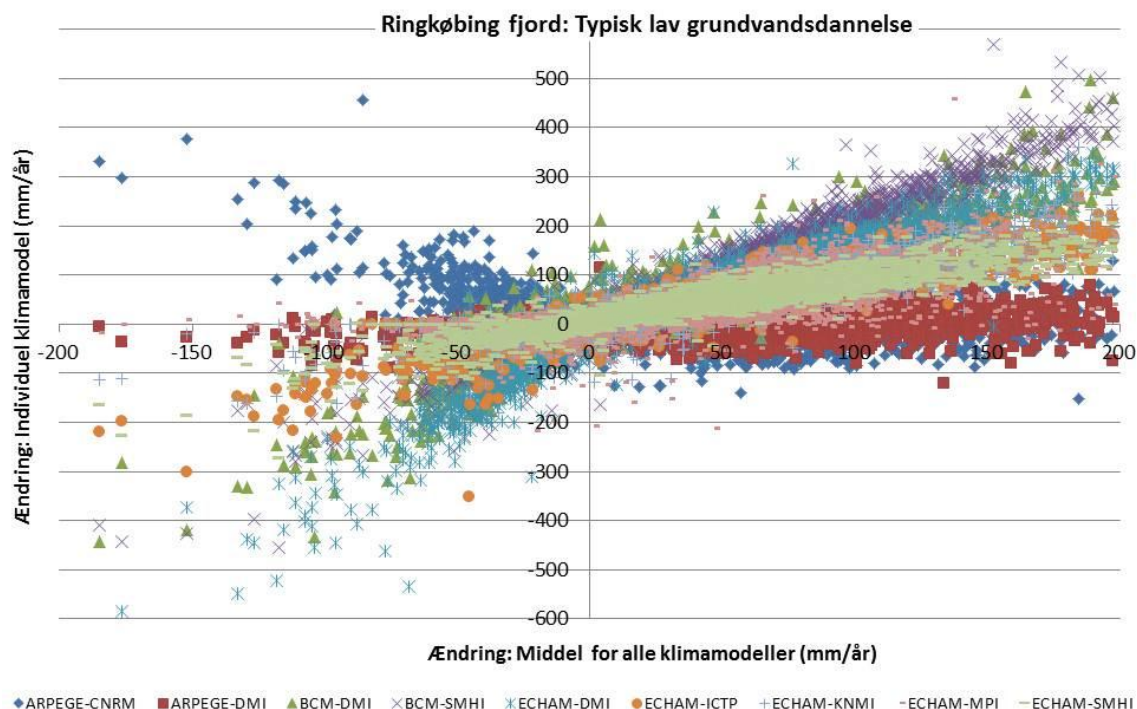


Fig. A2.4 Resultater for Ringkøbing fjord inputusikkerheder: ændring i typisk lav grundvandsdannelse, i mm/år, 2021-2050 i forhold til 1961-1990.

Det fremgår at ARPEGE-CNRM giver mindste ændringer (fald) for middel for Ringkøbing, mens ECHAM-DMI giver de største ændringer. ECHAM-SMHI ligger midt i de 9 for begge.

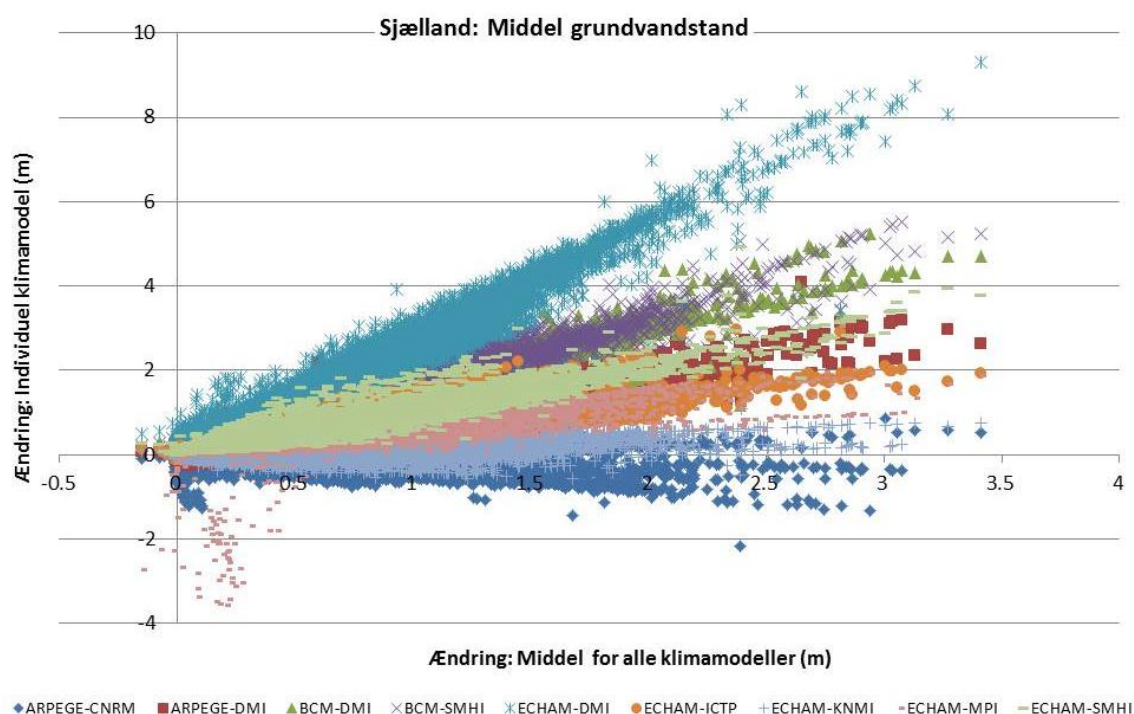


Fig. A2.5 Resultater for Sjælland inputusikkerheder: ændring i middel grundvandsstand, m, 2021-2050 i forhold til 1961-1990.

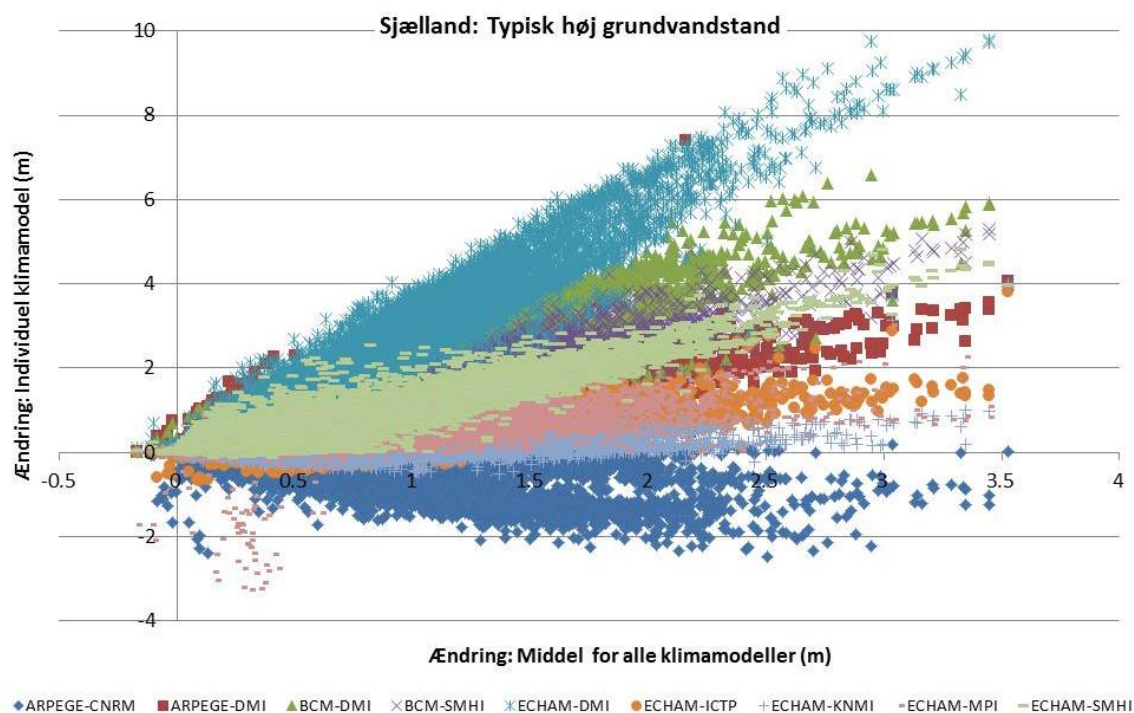


Fig. A2.6 Resultater for Sjælland inputusikkerheder: ændring i typisk høj grundvandsstand, m, 2021-2050 i forhold til 1961-1990.

Det fremgår at ARPEGE-CNRM giver mindste ændringer (et fald) for Sjælland, mens ECHAM-DMI giver de største ændringer. ECHAM-SMHI ligger midt i de 9 for begge GVS.

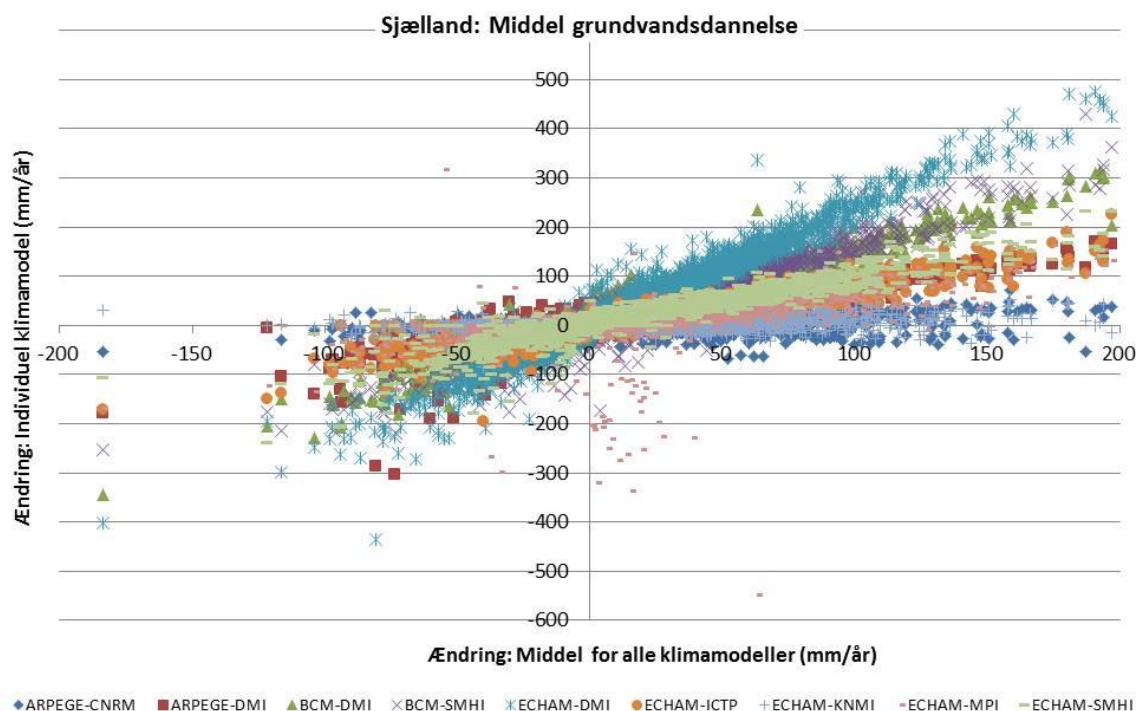


Fig. A2.7 Resultater for Sjælland inputusikkerheder: ændring i middel grundvandsdannelse, i mm/år, 2021-2050 i forhold til 1961-1990.

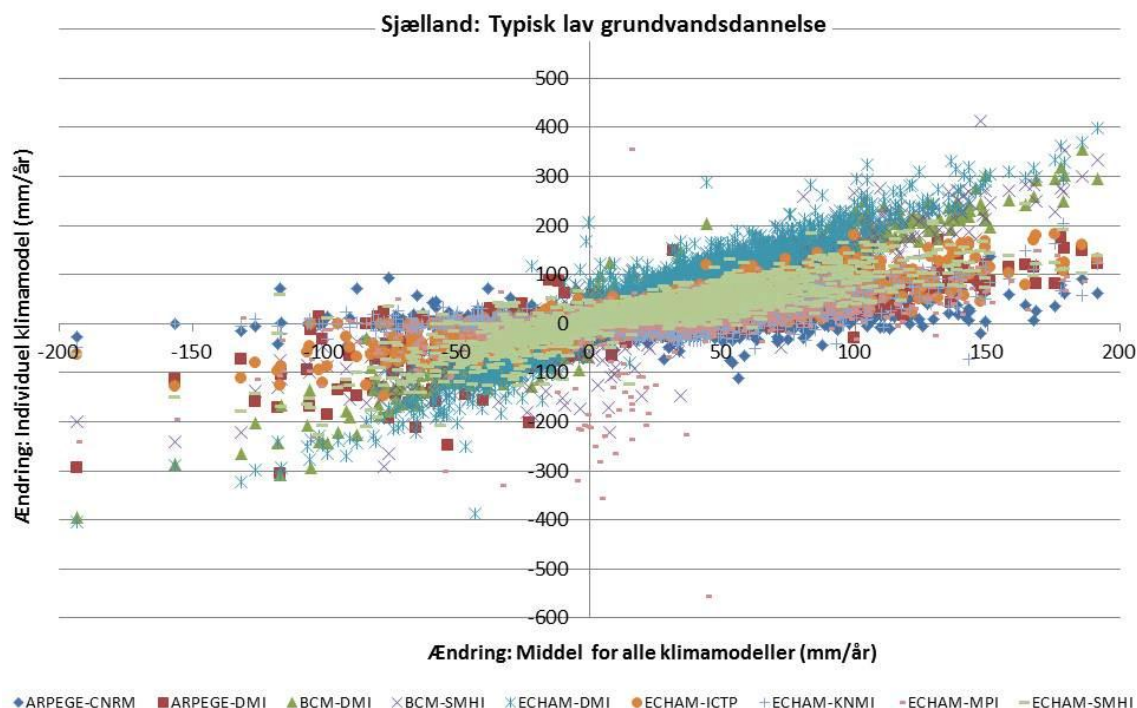


Fig. A2.8 Resultater for Sjælland inputusikkerheder: ændring i typisk lav grundvandsdannelse, i mm/år, 2021-2050 i forhold til 1961-1990.

Det fremgår at ARPEGE-CNRM giver de mindste ændringer i middel (et fald) for Sjælland, mens ECHAM-DMI giver de største ændringer. ECHAM-SMHI ligger midt i de ni for begge.

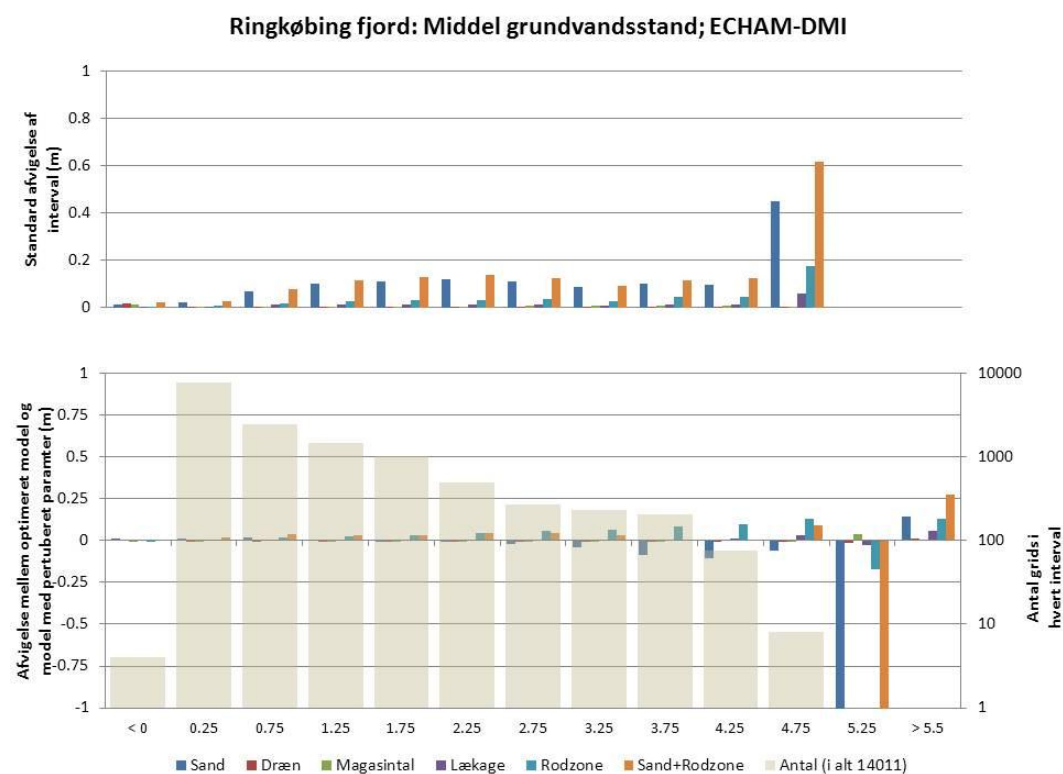


Fig. A2.9 Resultater for Ringkøbing fjord parameterusikkerheder: Ændring i middel grundvandsstand i m, 2021-2050 i forhold til 1961-1990.

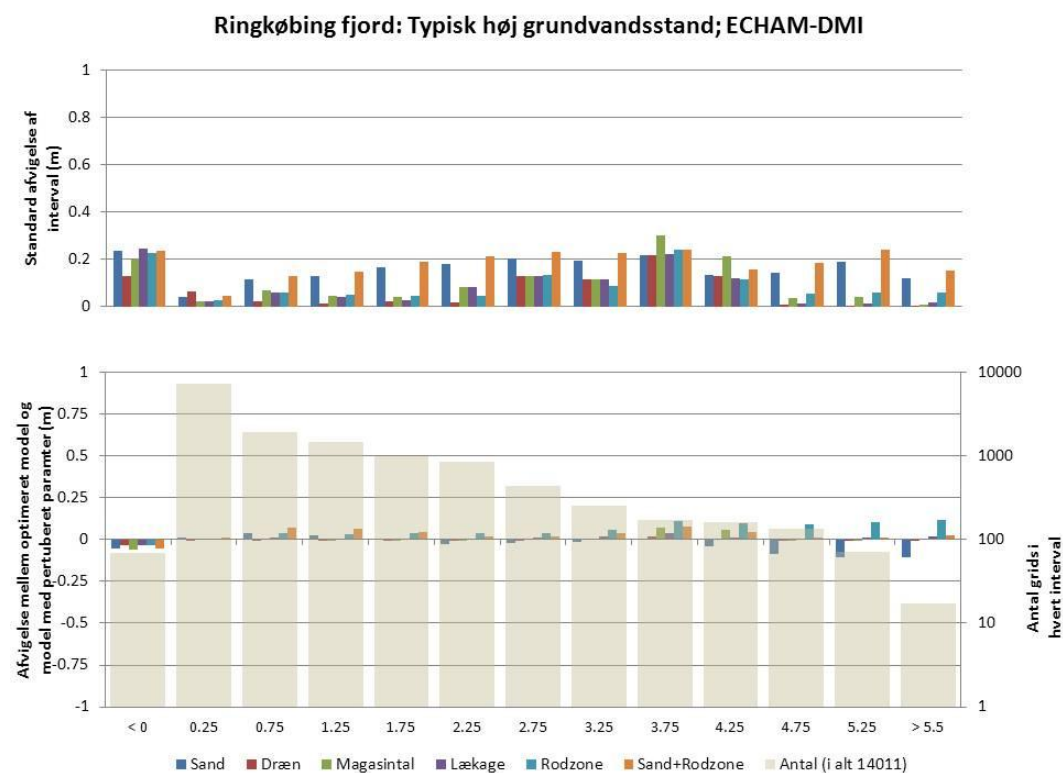


Fig. A2.10 Resultater for Ringkøbing fjord parameterusikkerheder: Ændring i typisk høj grundvandsstand i m, 2021-2050 i forhold til 1961-1990.

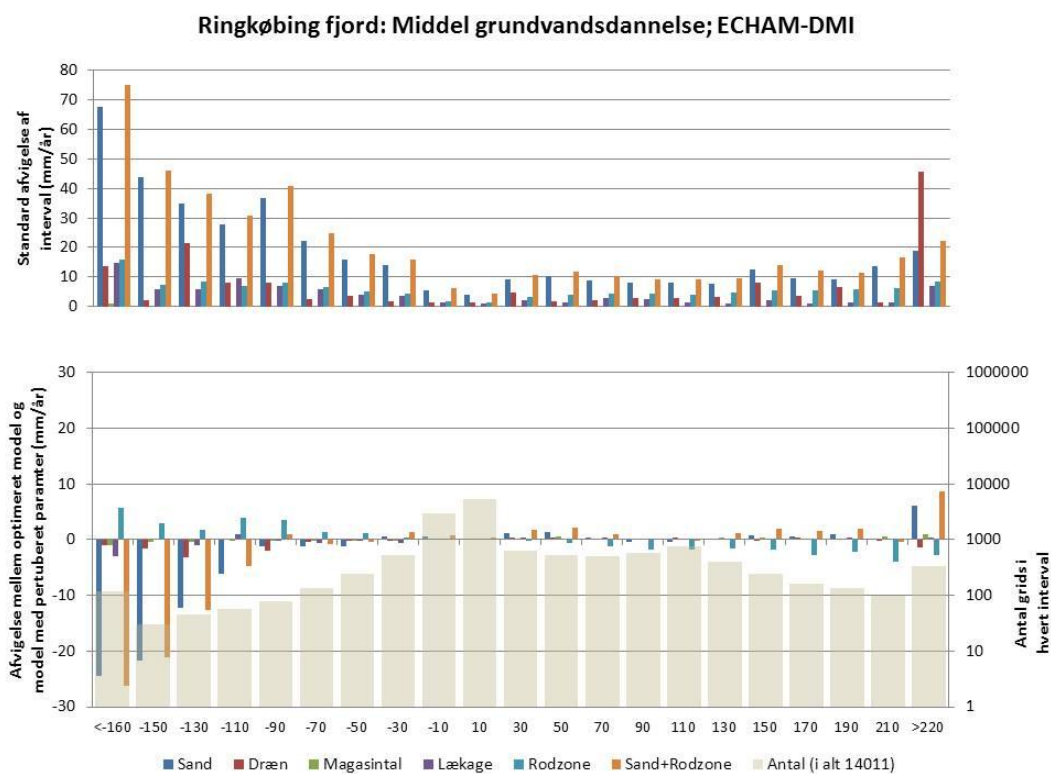


Fig. A2.11 Resultater for Ringkøbing fjord parameterusikkerheder: Ændring i middel grundvandsdannelse i mm/år, 2021-2050 i forhold til 1961-1990.

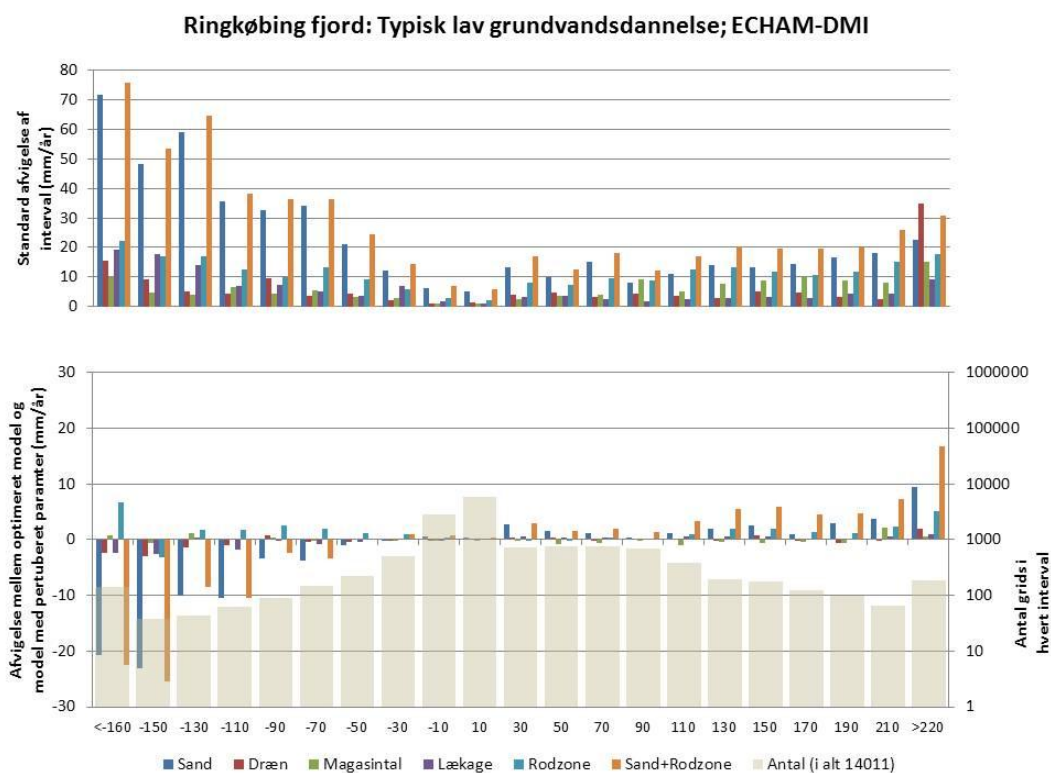


Fig. A2.12 Resultater for Ringkøbing fjord parameterusikkerheder: Ændring i typisk lav grundvandsdannelse i mm/år, 2021-2050 i forhold til 1961-1990.

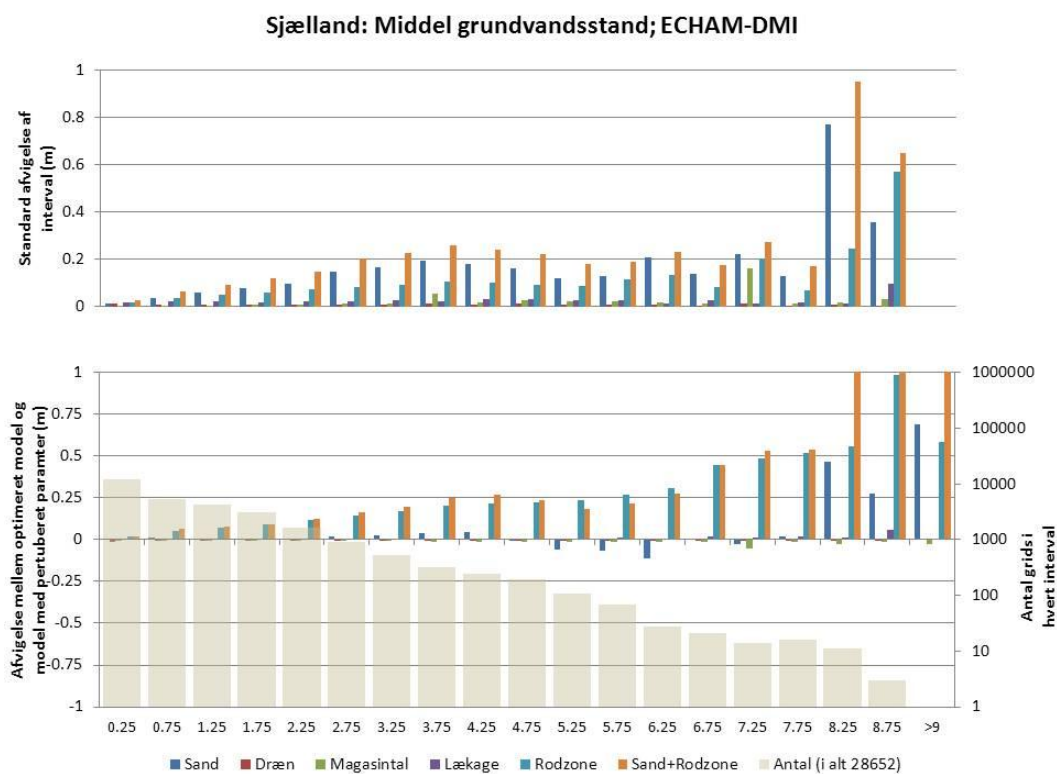


Fig. A2.13 Resultater for Sjælland parameterusikkerheder: Ændring i middel grundvandsstand i m, 2021-2050 i forhold til 1961-1990.

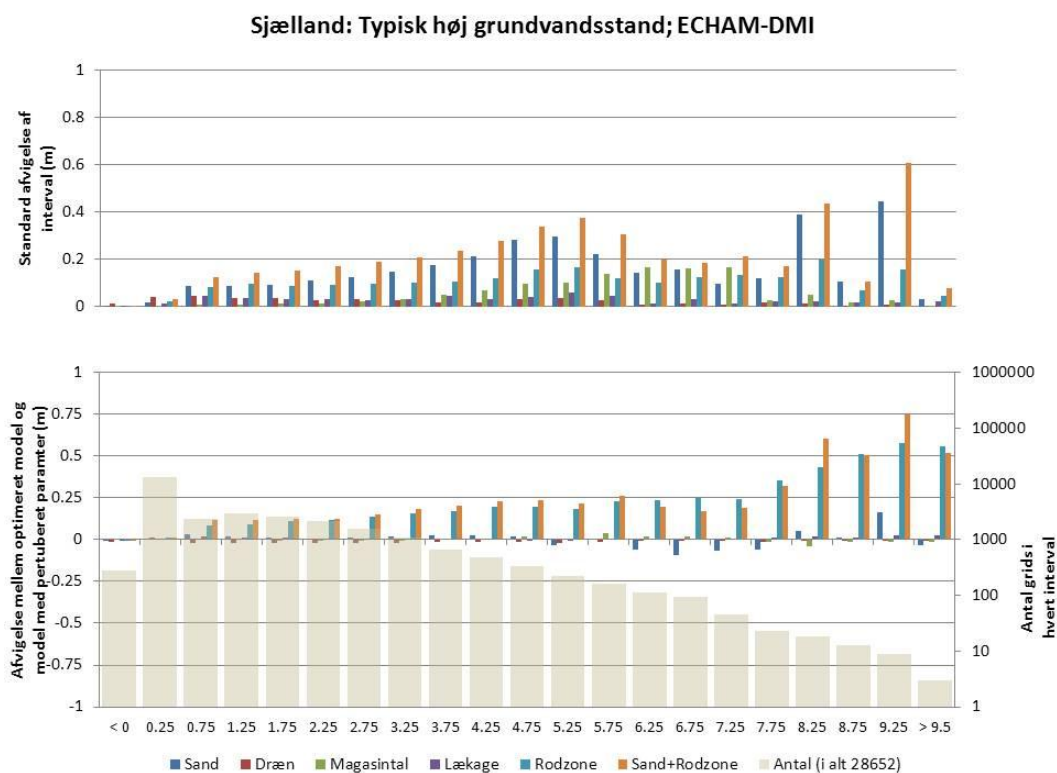


Fig. A2.14 Resultater for Sjælland parameterusikkerheder: Ændring i typisk højgrundvandsstand i m, 2021-2050 i forhold til 1961-1990.

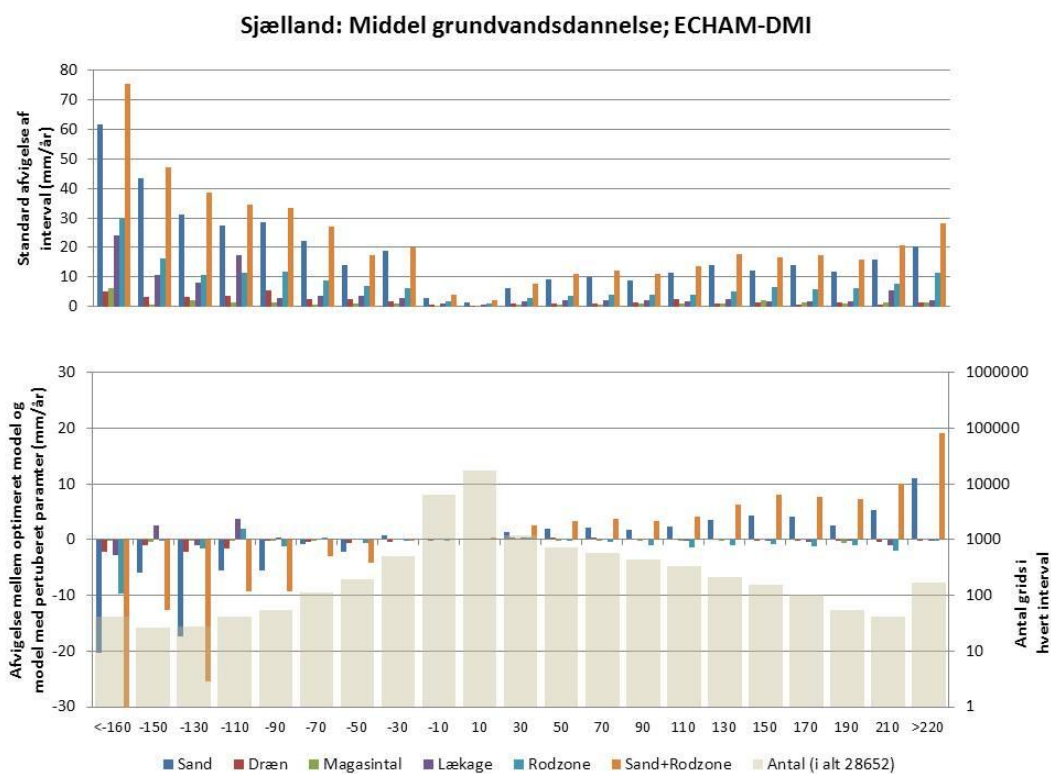


Fig. A2.15 Resultater for Sjælland parameterusikkerheder: Ændring i middel grundvandsdannelse i mm/år, 2021-2050 i forhold til 1961-1990.

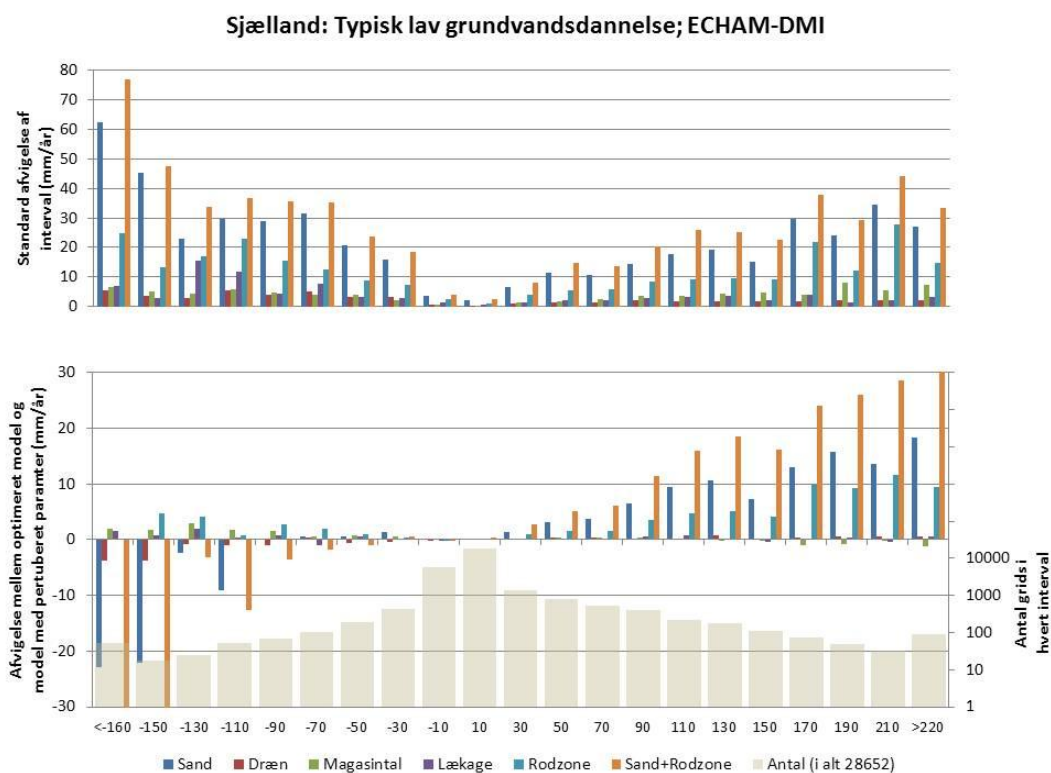
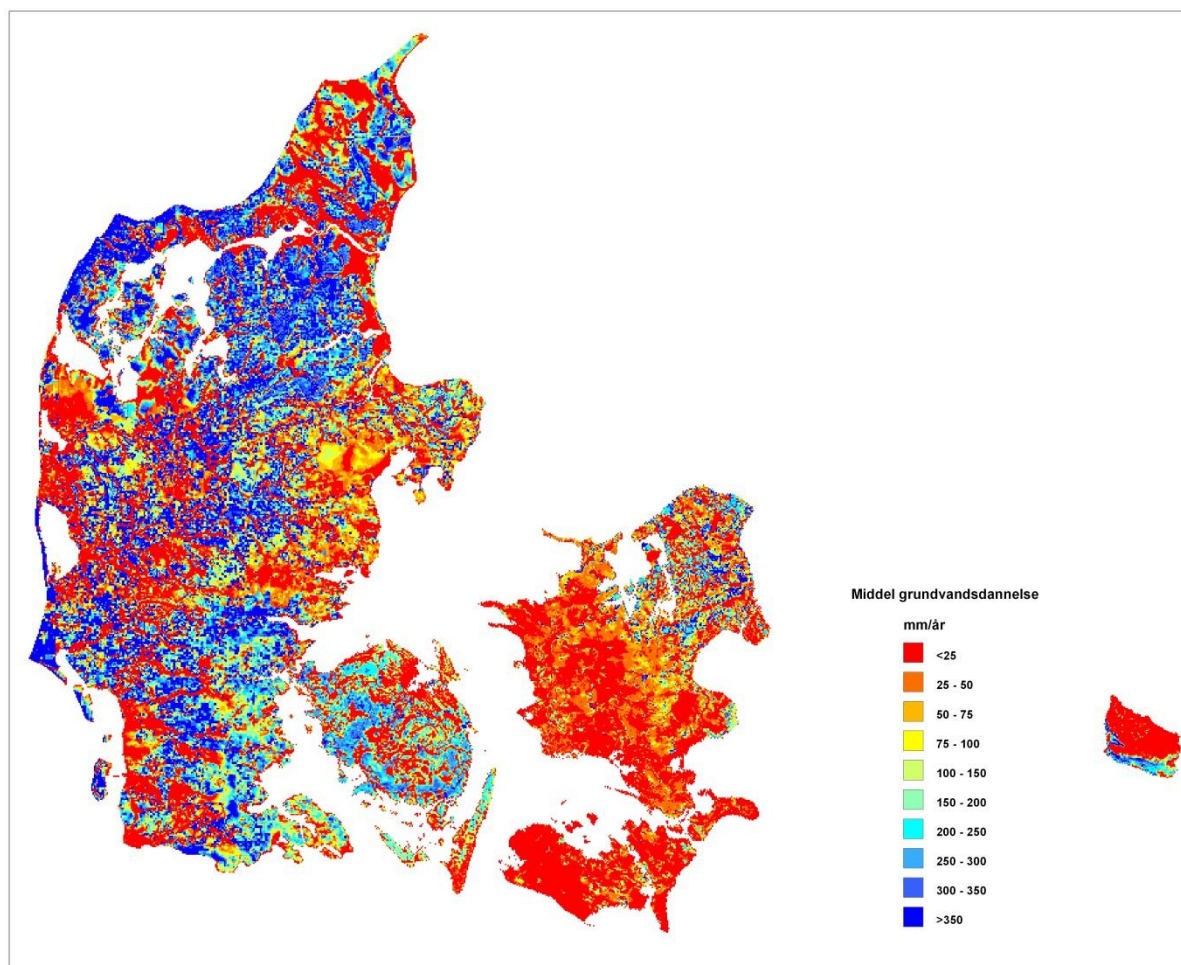
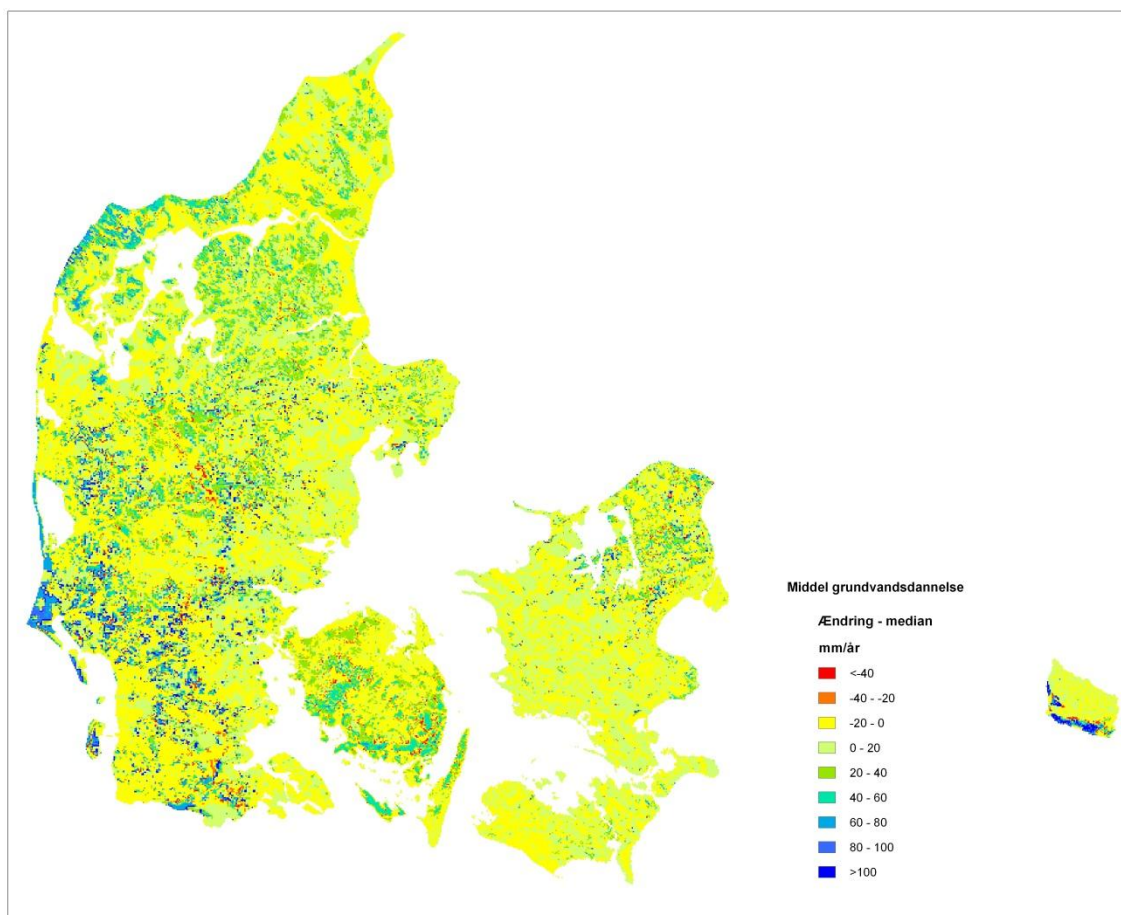


Fig. A2.12 Resultater for Sjælland parameterusikkerheder: Ændring i typisk lav grundvandsdannelse i mm/år, 2021-2050 i forhold til 1961-1990.

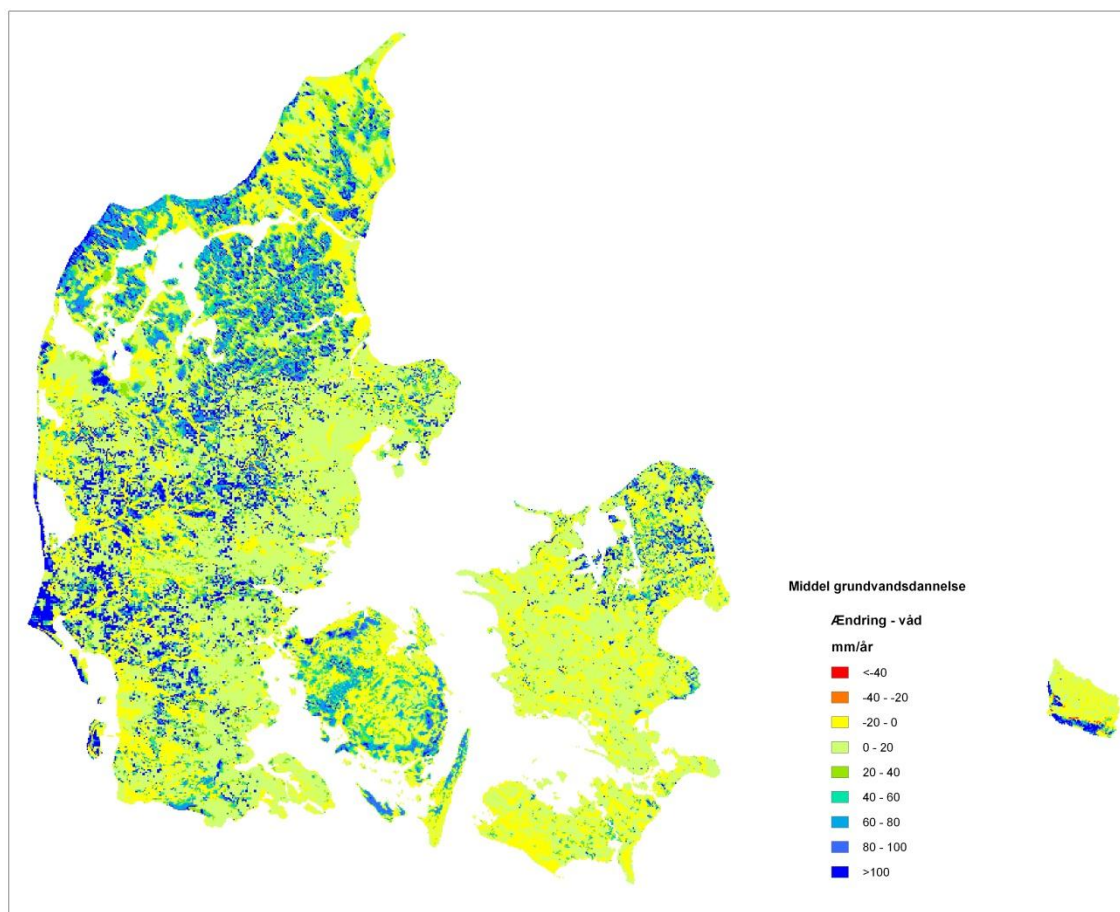
Appendix 3 Resultater for hele landet af de fire leverancer



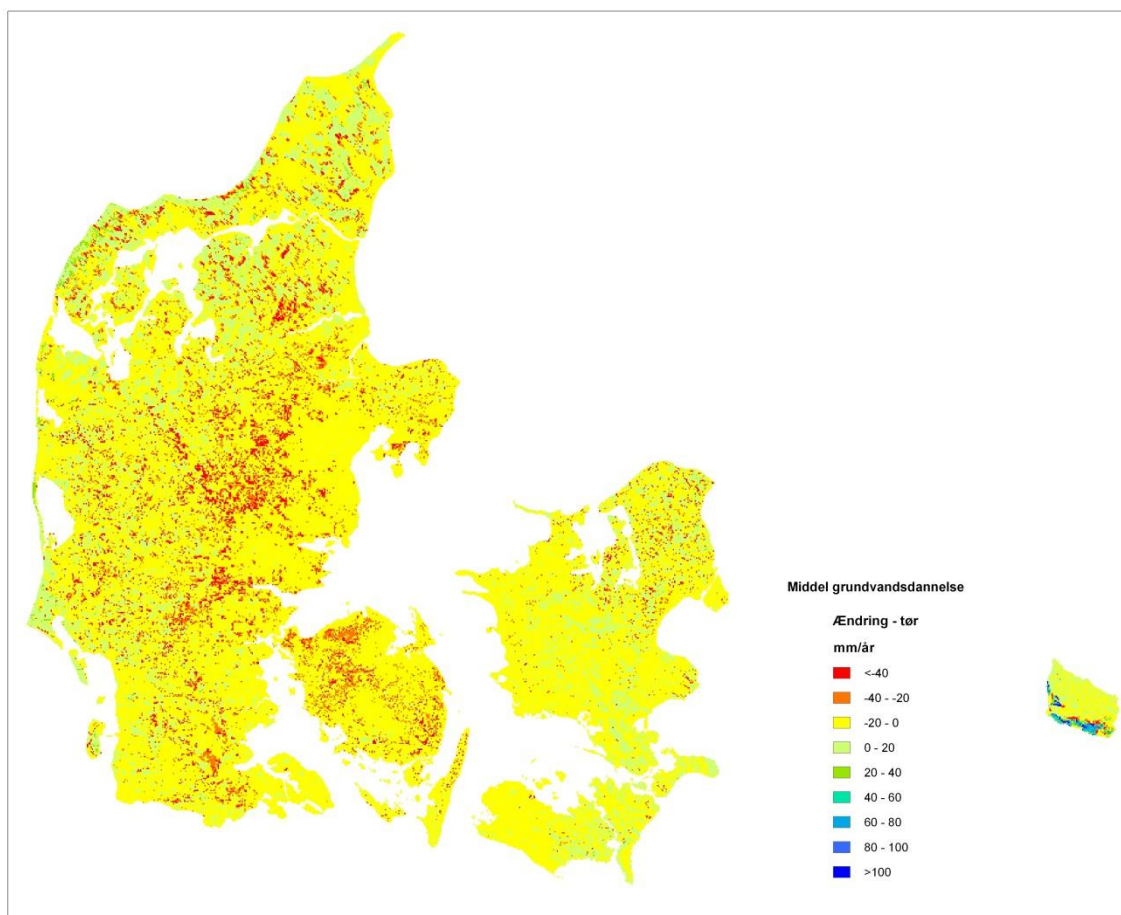
Nuværende grundvandsdannelse 1991-2010 mm/år



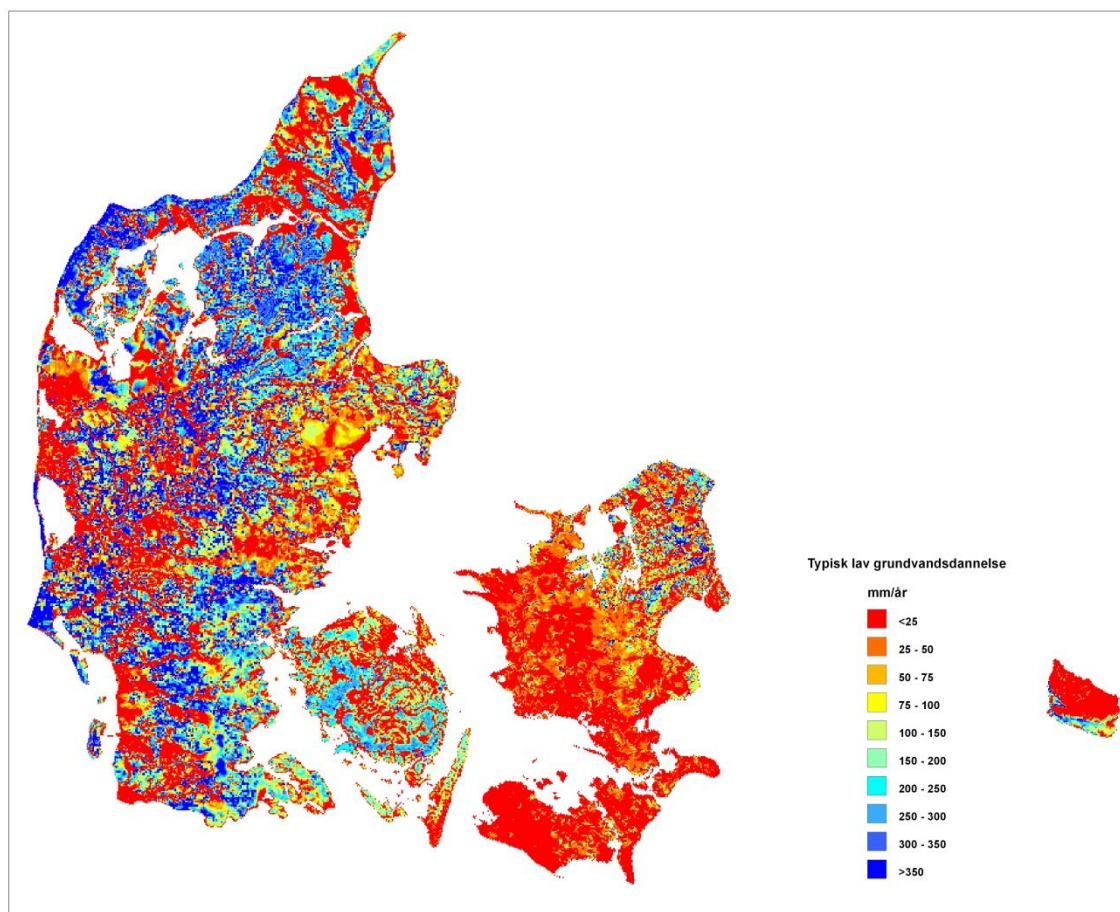
Median ændring i middel grundvandsdannelse 2021-2050 i forhold til 1961-1990 (mm/år)



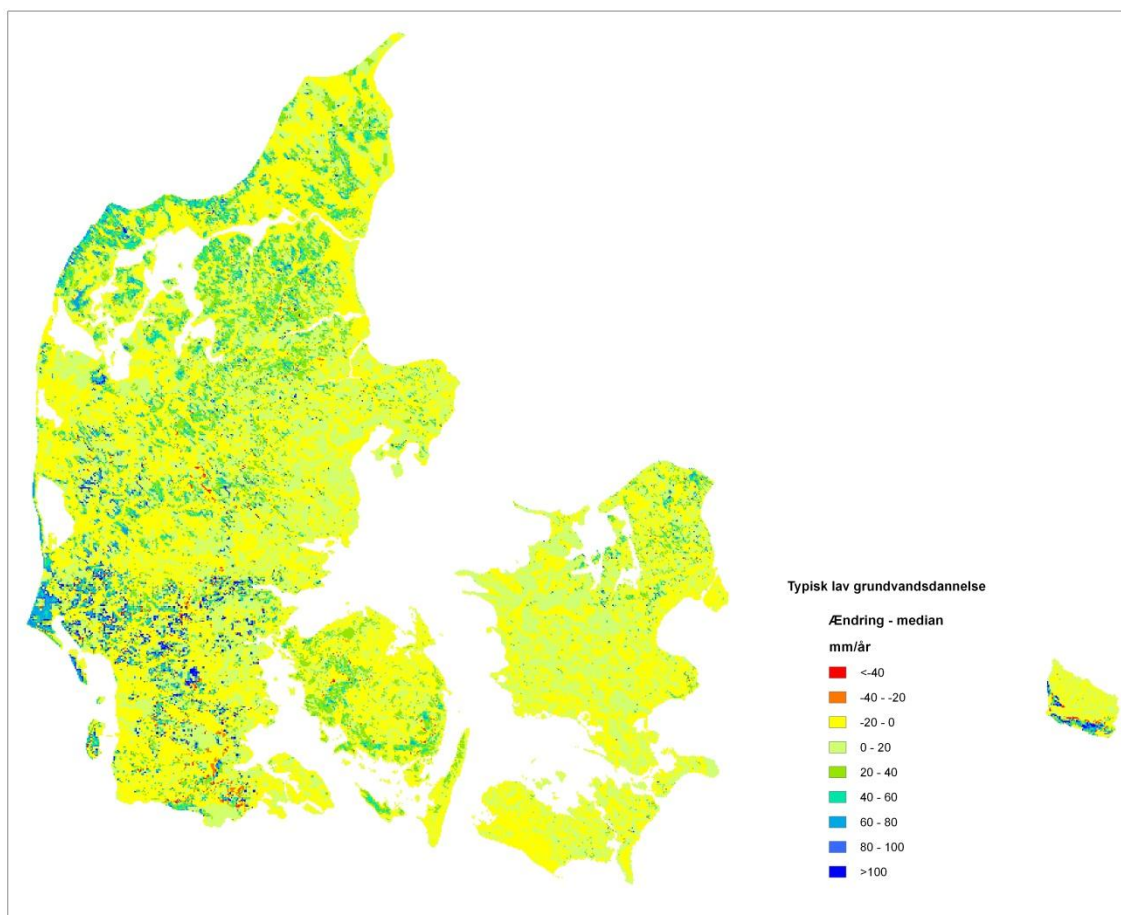
Max. ændring i middel grundvandsdannelse 2021-2050 i forhold til 1961-1990 (våd klimamodel, mm/år)



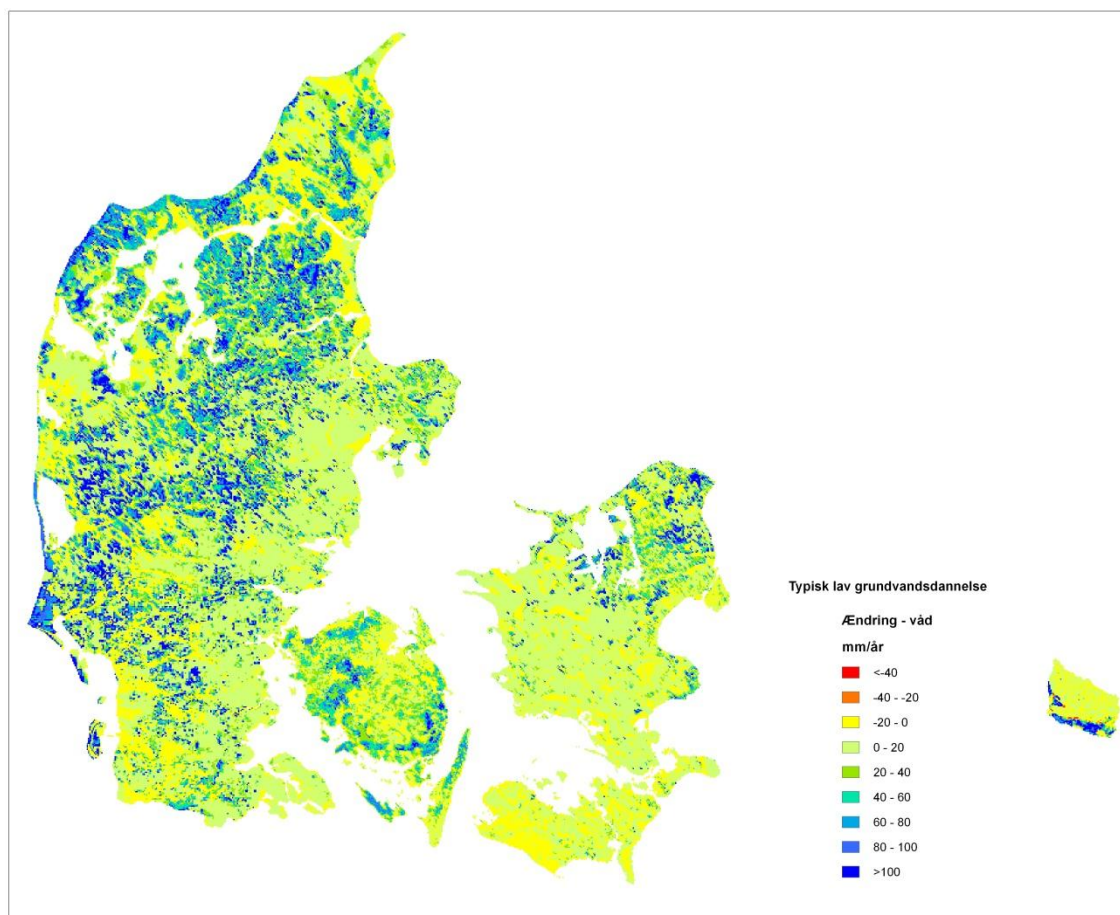
Min. ændring i middel grundvandsdannelse 2021-2050 i forhold til 1961-1990 (tør klimamodel, mm/år)



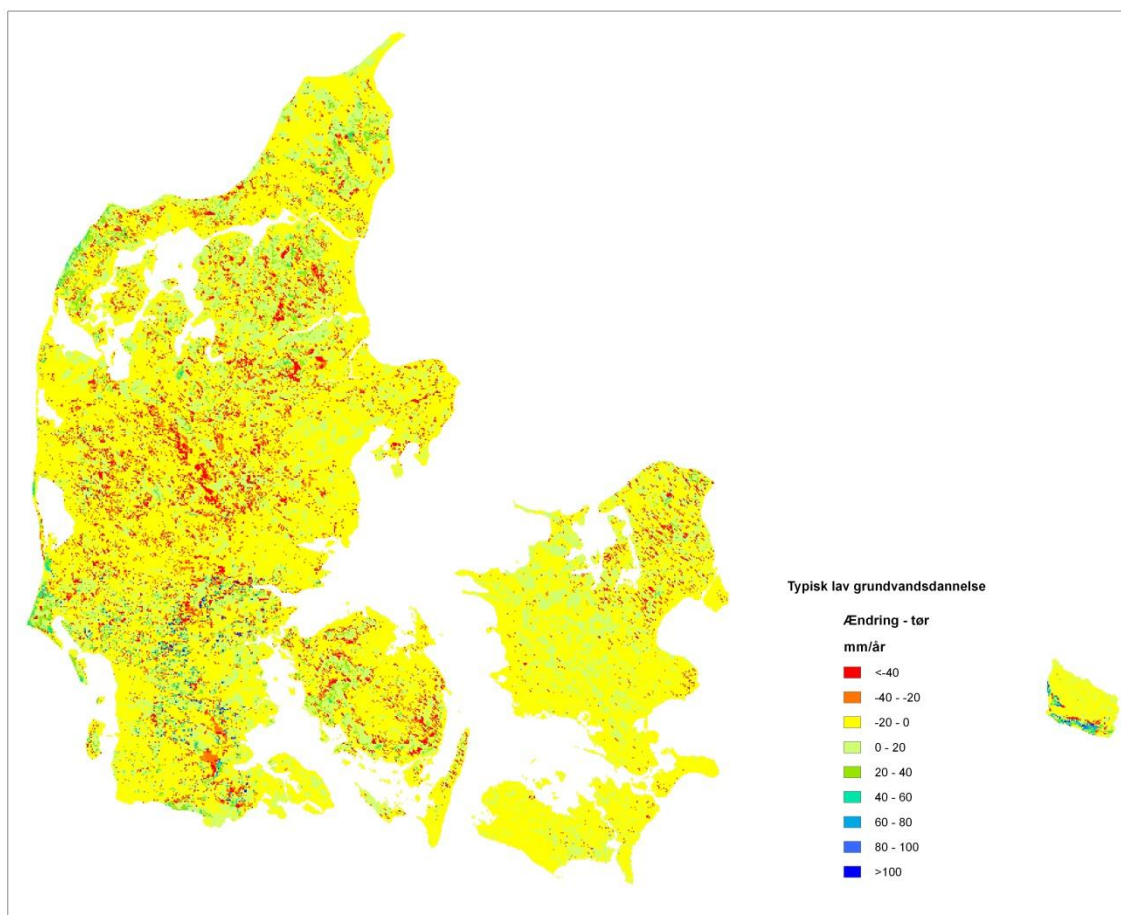
Typisk lav grundvandsdannelse 1991-2010 mm/år



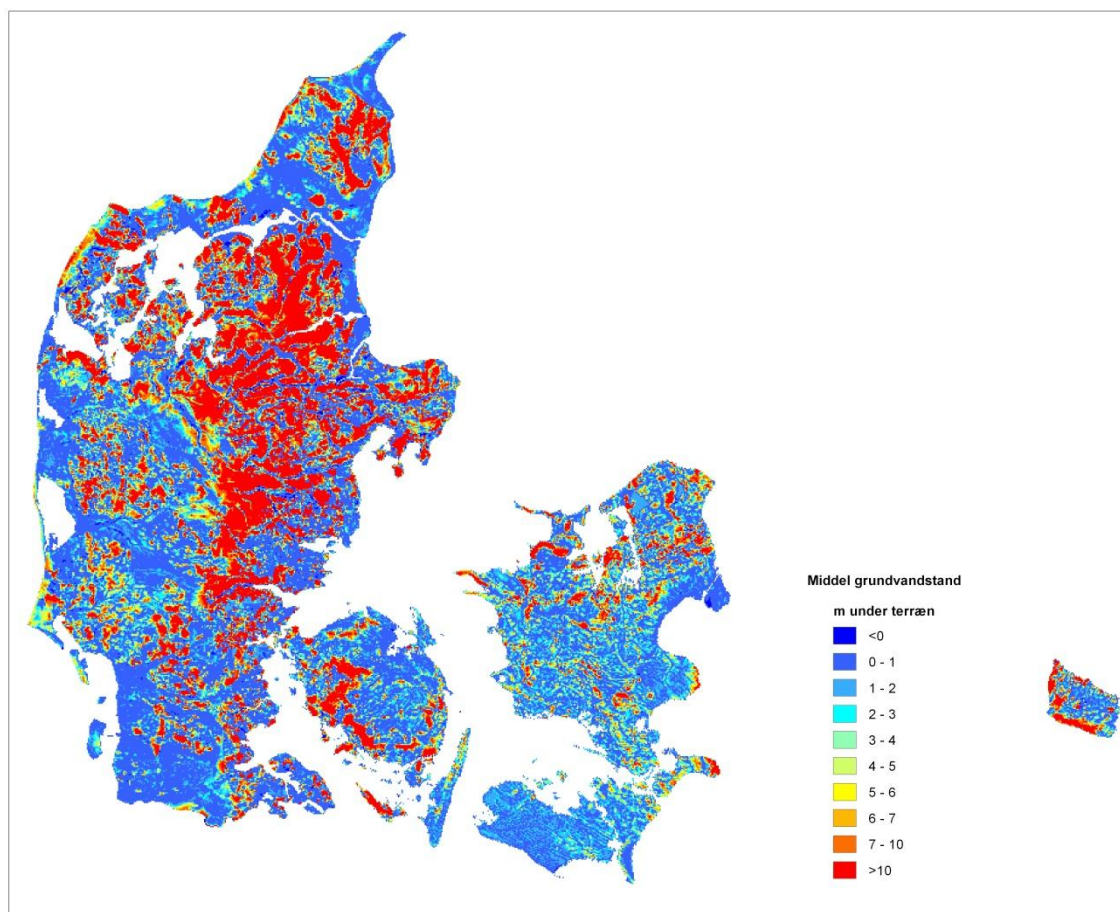
Median ændring i typisk lav grundvandsdannelse 2021-2050 i forhold til 1961-1990 (mm/år)



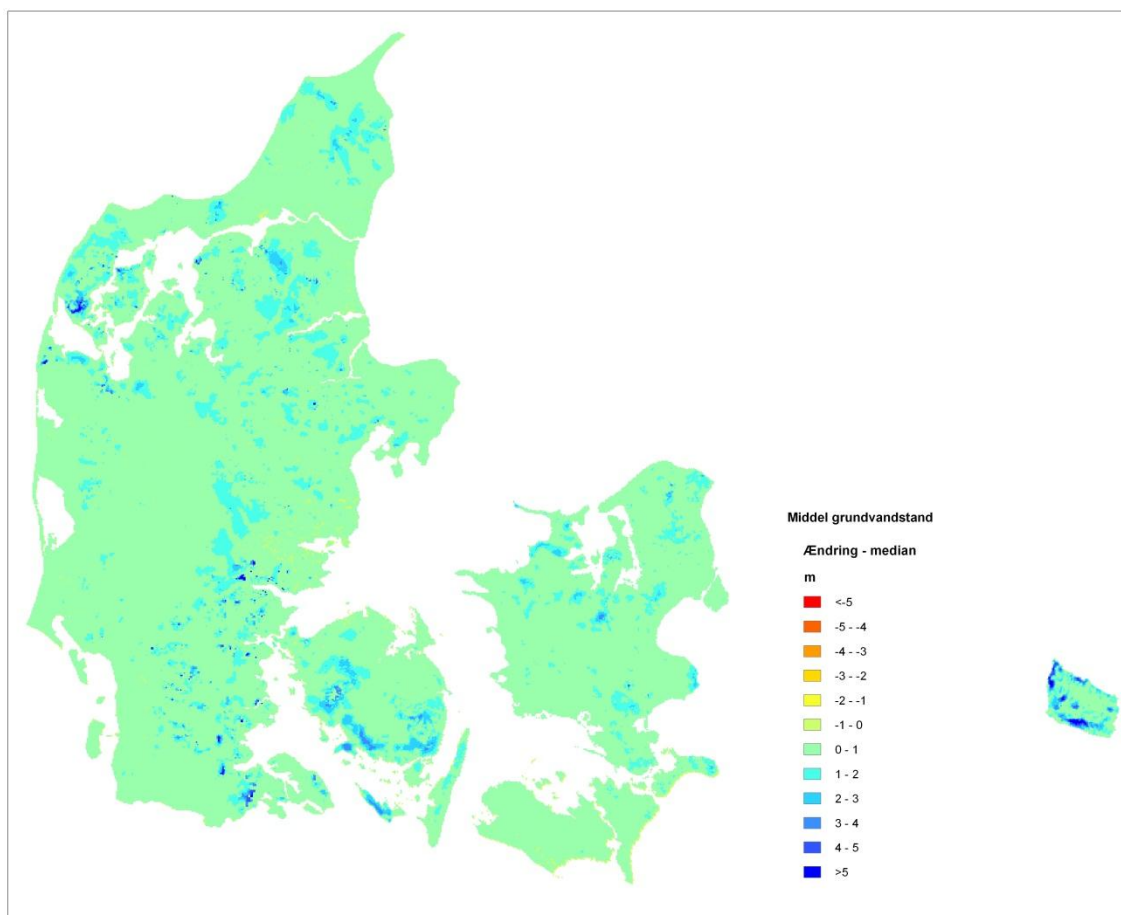
Max. ændring i typisk lav grundvandsdannelse 2021-2050 i forhold til 1961-1990 (mm/år) (våd klimamodel)



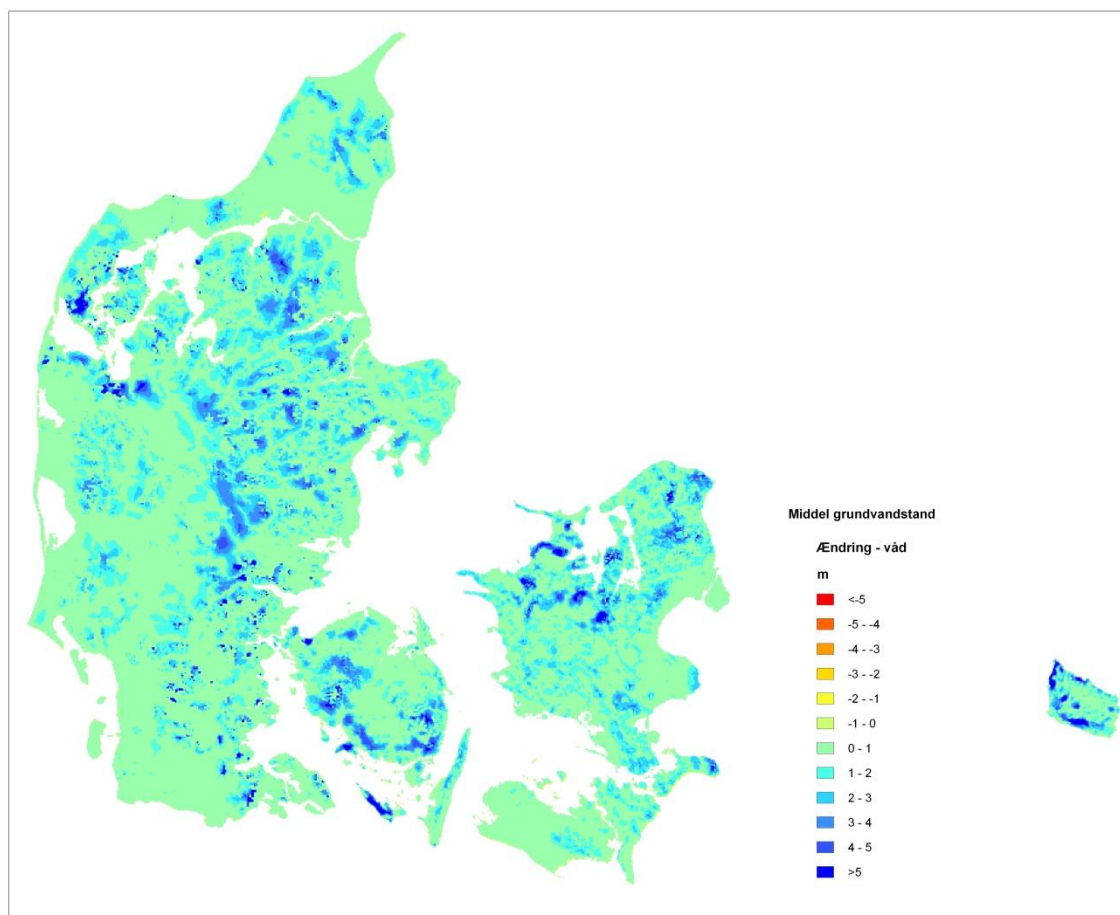
Min. ændring i typisk lav grundvandsdannelse 2021-2050 i forhold til 1961-1990 (mm/år)
(tør klimamodel)



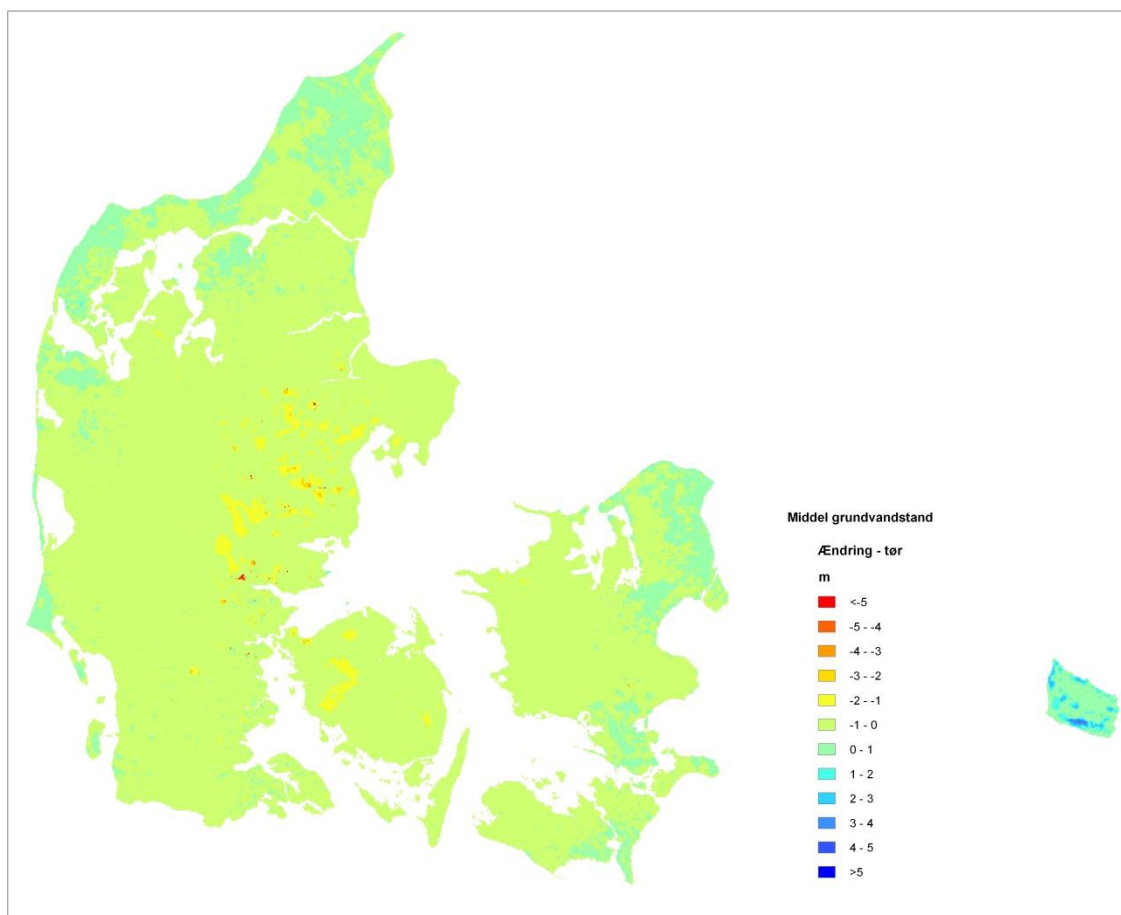
Middel grundvandsstand 1991-2010 (m under terræn)



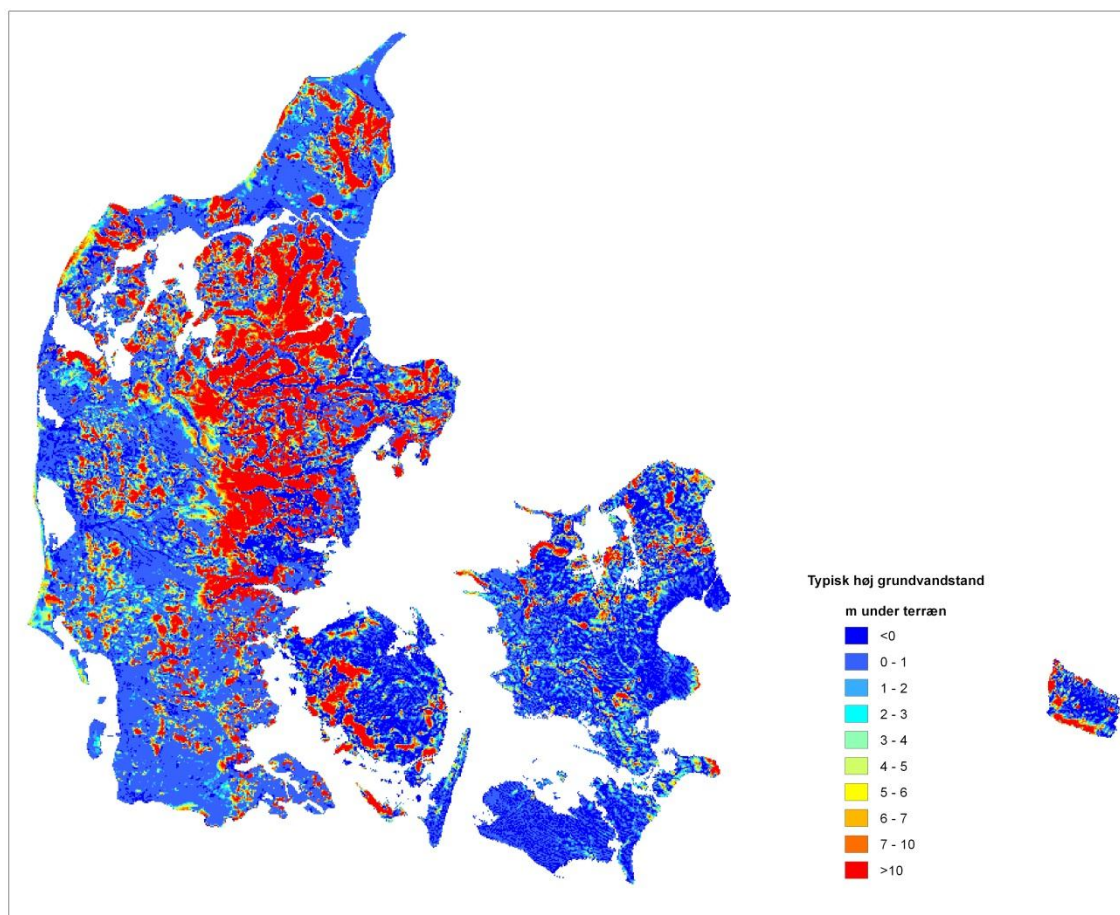
Median ændring i grundvandsstand 2021-2050 i forhold til 1961-1990 (m)



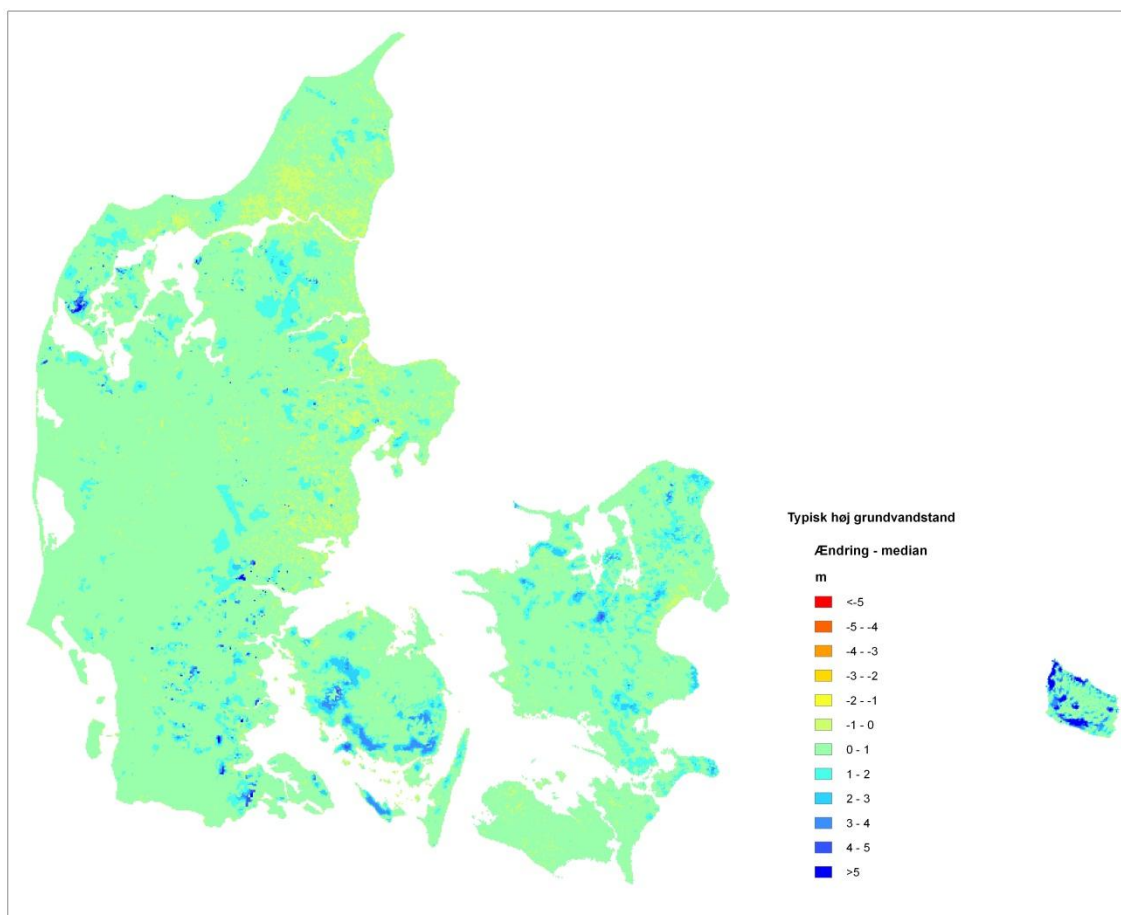
Max. ændring i grundvandsstand 2021-2050 i forhold til 1961-1990 (m)
(våd klimamodel)



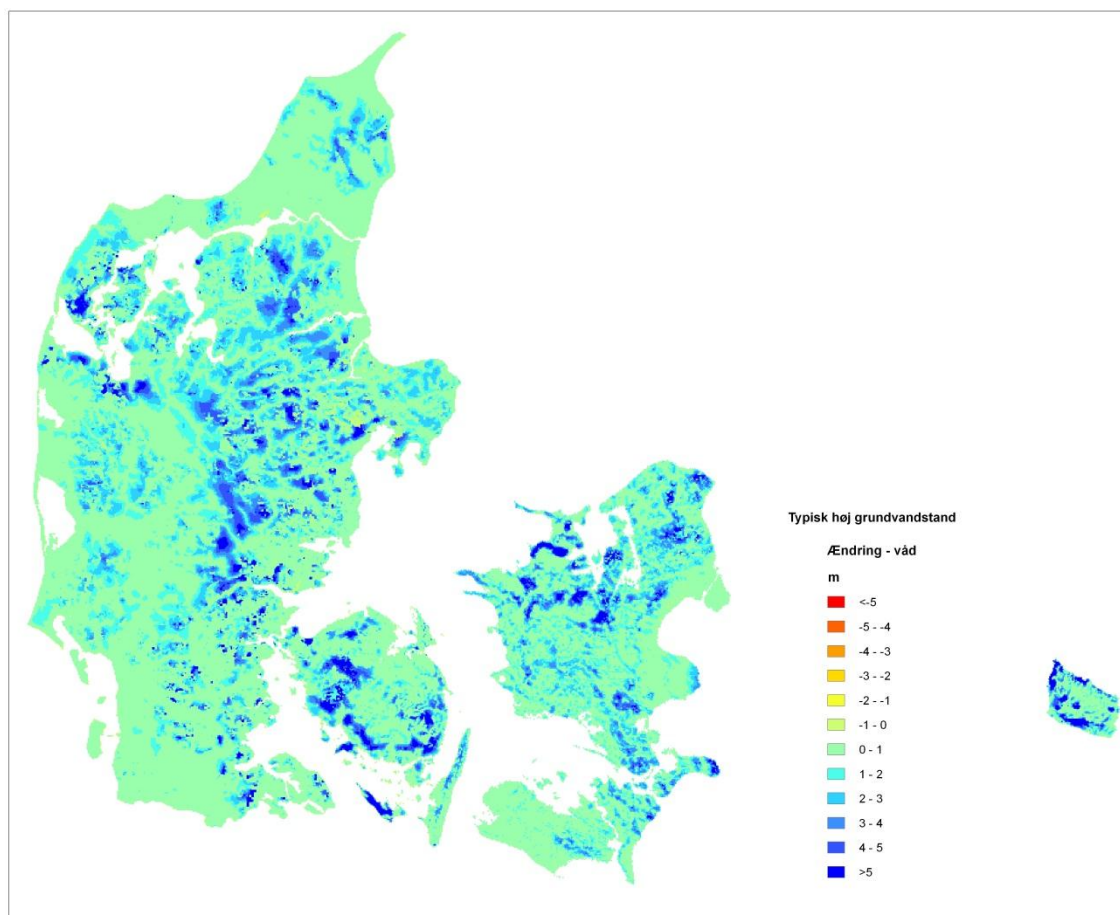
Min. ændring i grundvandsstand 2021-2050 i forhold til 1961-1990 (m)
(tør klimamodel)



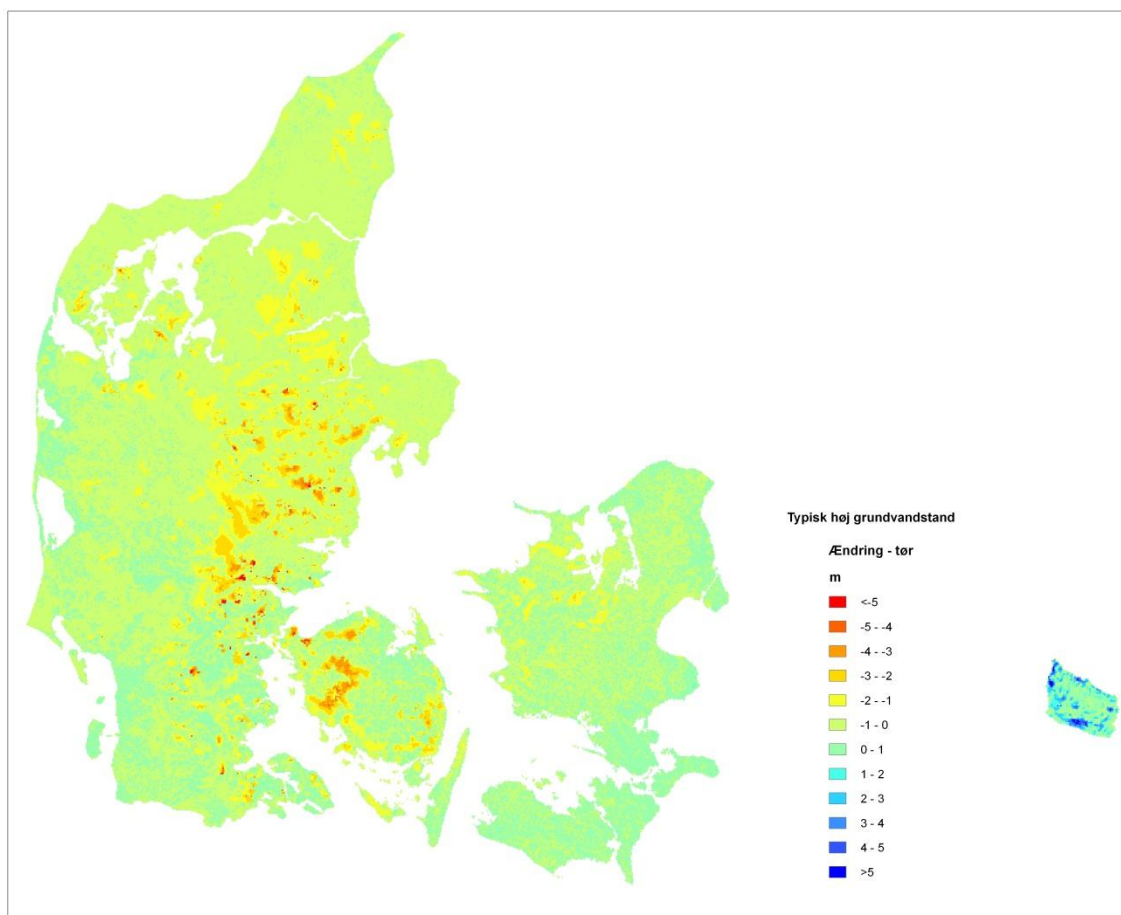
Typisk høj grundvandsstand 1991-2010 (m under terræn)



Median ændring i typisk høj grundvandsstand 2021-2050 i forhold til 1961-1990 (m)



Max. ændring i typisk høj grundvandsstand 2021-2050 i forhold til 1961-1990 (m)
(våd klimamodel)



Min. ændring i typisk høj grundvandsstand 2021-2050 i forhold til 1961-1990 (m)
(tør klimamodel)

Appendix 4: Resultater for hele landet i tabel form

Tabel A4.1 Område DK1-DK7 (hele Danmark)

A1B	Ændringer		Ændringer		Ændringer	
Emissionsscenariet	Våd klimamodel		Median klimamodel		Tør klimamodel	
1991-2010	2021-50 versus 1961-90		2021-50 versus 1961-90		2021-2050 versus 1961-90	
Middel grundvandsdannelse						
0-25 mm/år: 35%	≤ 0 mm/år	25%	≤ 0 mm/år	46%	≤ 0 mm/år	78%
25-100 mm/år: 20%	0-20 mm/år	44%	0-20 mm/år	35%	0-20 mm/år	21%
100-200 mm/år: 14%	20-40 mm/år	8%	20-40 mm/år	10%	20-40 mm/år	1%
200-350 mm/år: 15%	40-100 mm/år	15%	40-100 mm/år	8%	40-100 mm/år	0%
> 350 mm/år: 16%	> 100 mm/år	8%	> 100 mm/år	1%	> 100 mm/år	0%
Typisk lav grundvandsdannelse						
0-25 mm/år: 37%	≤ 0 mm/år	21%	≤ 0 mm/år	45%	≤ 0 mm/år	72%
25-100 mm/år: 20%	0-20 mm/år	45%	0-20 mm/år	38%	0-20 mm/år	23%
100-200 mm/år: 15%	20-40 mm/år	11%	20-40 mm/år	9%	20-40 mm/år	3%
200-350 mm/år: 16%	40-100 mm/år	18%	40-100 mm/år	7%	40-100 mm/år	1%
> 350 mm/år: 12%	> 100 mm/år	6%	> 100 mm/år	1%	> 100 mm/år	0%
Middel grundvandsstand 1991-2010:						
≤ 0 m 1%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	2%
0 til 1 m 40%	Fald 0 til 1 m	1%	Fald 0 til 1 m	1%	Fald 0 til 1 m	85%
1 til 3 m 20%	Stigning 0 til 0.5 m	50%	Stigning 0 til 0.5 m	67%	Stigning 0 til 0.5 m	12%
3 til 10 m 21%	Stigning 0.5 til 1 m	17%	Stigning 0.5 til 1 m	20%	Stigning 0.5 til 1 m	0%
> 10 m 18%	Stigning > 1 m	33%	Stigning > 1 m	12%	Stigning > 1 m	0%
Typisk høj grundvandsstand						
≤ 0 m 20%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	13%
0 til 1 m 37%	Fald 0 til 1 m	1%	Fald 0 til 1 m	7%	Fald 0 til 1 m	61%
1 til 3 m 11%	Stigning 0 til 0.5 m	50%	Stigning 0 til 0.5 m	67%	Stigning 0 til 0.5 m	25%
3 til 10 m 17%	Stigning 0.5 til 1 m	12%	Stigning 0.5 til 1 m	15%	Stigning 0.5 til 1 m	0%
> 10 m 15%	Stigning > 1 m	37%	Stigning > 1 m	11%	Stigning > 1 m	1%

Se Fig. 3.7 for en lokalisering af følgende tabeller for de syv DK model områder.

Tabel A4.2 Område DK1 (Sjælland)

A1B Emissionsscenariet 1991-2010 Område DK1		Ændringer Våd klimamodel 2021-50 versus 1961-90 DK1		Ændringer Median klimamodel 2021-50 versus 1961-90 DK1		Ændringer Tør klimamodel 2021-2050 versus 1961-90 DK1	
Middel grundvandsdannelse 1991-2010:							
0-25 mm/år:	46%	≤ 0 mm/år	29%	≤ 0 mm/år	45%	≤ 0 mm/år	75%
25-100 mm/år:	35%	0-20 mm/år	57%	0-20 mm/år	46%	0-20 mm/år	25%
100-200 mm/år:	9%	20-40 mm/år	5%	20-40 mm/år	5%	20-40 mm/år	0%
200-350 mm/år:	6%	40-100 mm/år	6%	40-100 mm/år	4%	40-100 mm/år	0%
> 350 mm/år:	4%	> 100 mm/år	4%	> 100 mm/år	0%	> 100 mm/år	0%
Typisk lav grundvandsdannelse 1991-2010:							
0-25 mm/år:	50%	≤ 0 mm/år	20%	≤ 0 mm/år	44%	≤ 0 mm/år	73%
25-100 mm/år:	33%	0-20 mm/år	62%	0-20 mm/år	50%	0-20 mm/år	26%
100-200 mm/år:	9%	20-40 mm/år	7%	20-40 mm/år	4%	20-40 mm/år	1%
200-350 mm/år:	5%	40-100 mm/år	8%	40-100 mm/år	2%	40-100 mm/år	0%
> 350 mm/år:	3%	> 100 mm/år	3%	> 100 mm/år	0%	> 100 mm/år	0%
Middel grundvandsstand 1991-2010:							
≤ 0 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%
0 til 1 m	40%	Fald 0 til 1 m	0%	Fald 0 til 1 m	0%	Fald 0 til 1 m	80%
1 til 3 m	29%	Stigning 0 til 0.5 m	41%	Stigning 0 til 0.5 m	65%	Stigning 0 til 0.5 m	20%
3 til 10 m	25%	Stigning 0.5 til 1 m	19%	Stigning 0.5 til 1 m	25%	Stigning 0.5 til 1 m	0%
> 10 m	7%	Stigning > 1 m	40%	Stigning > 1 m	10%	Stigning > 1 m	0%
Typisk høj grundvandsstand 1991-2010:							
≤ 0 m	37%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	4%
0 til 1 m	29%	Fald 0 til 1 m	0%	Fald 0 til 1 m	3%	Fald 0 til 1 m	52%
1 til 3 m	14%	Stigning 0 til 0.5 m	47%	Stigning 0 til 0.5 m	62%	Stigning 0 til 0.5 m	43%
3 til 10 m	15%	Stigning 0.5 til 1 m	9%	Stigning 0.5 til 1 m	18%	Stigning 0.5 til 1 m	1%
> 10 m	5%	Stigning > 1 m	44%	Stigning > 1 m	16%	Stigning > 1 m	0%

Tabel A4.3 Område DK2 (Lolland, Falster og Møn)

A1B		Ændringer		Ændringer		Ændringer	
Emissionsscenariet		Våd klimamodel		Median klimamodel		Tør klimamodel	
1991-2010		2021-50 versus 1961-90		2021-50 versus 1961-90		2021-2050 versus 1961-90	
Område	DK2	DK2		DK2		DK2	
Middel grundvandsdannelse							
1991-2010:							
0-25 mm/år:	80%	≤ 0 mm/år	44%	≤ 0 mm/år	53%	≤ 0 mm/år	73%
25-100 mm/år:	15%	0-20 mm/år	50%	0-20 mm/år	44%	0-20 mm/år	27%
100-200 mm/år:	4%	20-40 mm/år	3%	20-40 mm/år	2%	20-40 mm/år	0%
200-350 mm/år:	1%	40-100 mm/år	3%	40-100 mm/år	1%	40-100 mm/år	0%
> 350 mm/år:	0%	> 100 mm/år	0%	> 100 mm/år	0%	> 100 mm/år	0%
Typisk lav grundvandsdannelse							
1991-2010:							
0-25 mm/år:	83%	≤ 0 mm/år	46%	≤ 0 mm/år	56%	≤ 0 mm/år	84%
25-100 mm/år:	14%	0-20 mm/år	50%	0-20 mm/år	42%	0-20 mm/år	16%
100-200 mm/år:	2%	20-40 mm/år	3%	20-40 mm/år	1%	20-40 mm/år	0%
200-350 mm/år	1%	40-100 mm/år	1%	40-100 mm/år	0%	40-100 mm/år	0%
> 350 mm/år:	0%	> 100 mm/år	0%	> 100 mm/år	0%	> 100 mm/år	0%
Middel grundvandsstand							
1991-2010:							
≤ 0 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%
0 til 1 m	43%	Fald 0 til 1 m	4%	Fald 0 til 1 m	6%	Fald 0 til 1 m	85%
1 til 3 m	42%	Stigning 0 til 0.5 m	57%	Stigning 0 til 0.5 m	77%	Stigning 0 til 0.5 m	15%
3 til 10 m	14%	Stigning 0.5 til 1 m	19%	Stigning 0.5 til 1 m	14%	Stigning 0.5 til 1 m	0%
> 10 m	1%	Stigning > 1 m	20%	Stigning > 1 m	2%	Stigning > 1 m	0%
Typisk høj grundvandsstand							
1991-2010:							
≤ 0 m	43%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%
0 til 1 m	42%	Fald 0 til 1 m	0%	Fald 0 til 1 m	4%	Fald 0 til 1 m	29%
1 til 3 m	9%	Stigning 0 til 0.5 m	64%	Stigning 0 til 0.5 m	86%	Stigning 0 til 0.5 m	69%
3 til 10 m	5%	Stigning 0.5 til 1 m	9%	Stigning 0.5 til 1 m	6%	Stigning 0.5 til 1 m	2%
> 10 m	1%	Stigning > 1 m	27%	Stigning > 1 m	4%	Stigning > 1 m	0%

Tabel A4.4 Område DK3 (Fyn og øerne)

A1B		Ændringer		Ændringer		Ændringer	
Emissionsscenariet		Våd klimamodel		Median klimamodel		Tør klimamodel	
1991-2010		2021-50 versus 1961-90		2021-50 versus 1961-90		2021-2050 versus 1961-90	
Område	DK3	DK3		DK3		DK3	
Middel grundvandsdannelse							
1991-2010:							
0-25 mm/år:	38%	≤ 0 mm/år	35%	≤ 0 mm/år	50%	≤ 0 mm/år	94%
25-100 mm/år:	11%	0-20 mm/år	25%	0-20 mm/år	18%	0-20 mm/år	6%
100-200 mm/år:	21%	20-40 mm/år	11%	20-40 mm/år	21%	20-40 mm/år	0%
200-350 mm/år:	27%	40-100 mm/år	28%	40-100 mm/år	10%	40-100 mm/år	0%
> 350 mm/år:	3%	> 100 mm/år	2%	> 100 mm/år	0%	> 100 mm/år	0%
Typisk lav grundvandsdannelse							
1991-2010:							
0-25 mm/år:	40%	≤ 0 mm/år	26%	≤ 0 mm/år	49%	≤ 0 mm/år	73%
25-100 mm/år:	13%	0-20 mm/år	29%	0-20 mm/år	29%	0-20 mm/år	23%
100-200 mm/år:	25%	20-40 mm/år	22%	20-40 mm/år	18%	20-40 mm/år	4%
200-350 mm/år	21%	40-100 mm/år	23%	40-100 mm/år	4%	40-100 mm/år	0%
> 350 mm/år:	1%	> 100 mm/år	1%	> 100 mm/år	0%	> 100 mm/år	0%
Middel grundvandsstand							
1991-2010:							
≤ 0 m	1%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	5%
0 til 1 m	44%	Fald 0 til 1 m	2%	Fald 0 til 1 m	3%	Fald 0 til 1 m	94%
1 til 3 m	23%	Stigning 0 til 0.5 m	48%	Stigning 0 til 0.5 m	58%	Stigning 0 til 0.5 m	0%
3 til 10 m	20%	Stigning 0.5 til 1 m	13%	Stigning 0.5 til 1 m	16%	Stigning 0.5 til 1 m	0%
> 10 m	13%	Stigning > 1 m	37%	Stigning > 1 m	23%	Stigning > 1 m	0%
Typisk høj grundvandsstand							
1991-2010:							
≤ 0 m	42%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	23%
0 til 1 m	22%	Fald 0 til 1 m	2%	Fald 0 til 1 m	5%	Fald 0 til 1 m	45%
1 til 3 m	10%	Stigning 0 til 0.5 m	51%	Stigning 0 til 0.5 m	60%	Stigning 0 til 0.5 m	31%
3 til 10 m	14%	Stigning 0.5 til 1 m	7%	Stigning 0.5 til 1 m	10%	Stigning 0.5 til 1 m	0%
> 10 m	11%	Stigning > 1 m	40%	Stigning > 1 m	24%	Stigning > 1 m	0%

Tabel A4.5 Område DK4 (Jylland syd)

A1B		Ændringer		Ændringer		Ændringer	
Emissionsscenariet		Våd klimamodel		Median klimamodel		Tør klimamodel	
1991-2010		2021-50 versus 1961-90		2021-50 versus 1961-90		2021-2050 versus 1961-90	
Område	DK4	DK4		DK4		DK4	
Middel grundvandsdan-nelse							
1991-2010:							
0-25 mm/år:	24%	≤ 0 mm/år	21%	≤ 0 mm/år	48%	≤ 0 mm/år	80%
25-100 mm/år:	14%	0-20 mm/år	50%	0-20 mm/år	30%	0-20 mm/år	19%
100-200 mm/år:	19%	20-40 mm/år	8%	20-40 mm/år	7%	20-40 mm/år	0%
200-350 mm/år:	19%	40-100 mm/år	10%	40-100 mm/år	11%	40-100 mm/år	0%
> 350 mm/år:	23%	> 100 mm/år	11%	> 100 mm/år	4%	> 100 mm/år	0%
Typisk lav grundvands-dannelse							
1991-2010:							
0-25 mm/år:	26%	≤ 0 mm/år	20%	≤ 0 mm/år	46%	≤ 0 mm/år	65%
25-100 mm/år:	15%	0-20 mm/år	51%	0-20 mm/år	32%	0-20 mm/år	26%
100-200 mm/år:	19%	20-40 mm/år	9%	20-40 mm/år	8%	20-40 mm/år	5%
200-350 mm/år	20%	40-100 mm/år	13%	40-100 mm/år	11%	40-100 mm/år	3%
> 350 mm/år:	19%	> 100 mm/år	7%	> 100 mm/år	3%	> 100 mm/år	1%
Middel grundvands-stand							
1991-2010:							
≤ 0 m	1%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	1%
0 til 1 m	50%	Fald 0 til 1 m	1%	Fald 0 til 1 m	1%	Fald 0 til 1 m	93%
1 til 3 m	18%	Stigning 0 til 0.5 m	63%	Stigning 0 til 0.5 m	75%	Stigning 0 til 0.5 m	5%
3 til 10 m	19%	Stigning 0.5 til 1 m	15%	Stigning 0.5 til 1 m	15%	Stigning 0.5 til 1 m	0%
> 10 m	12%	Stigning > 1 m	21%	Stigning > 1 m	9%	Stigning > 1 m	0%
Typisk høj grundvands-stand							
1991-2010:							
≤ 0 m	6%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	10%
0 til 1 m	58%	Fald 0 til 1 m	1%	Fald 0 til 1 m	2%	Fald 0 til 1 m	53%
1 til 3 m	11%	Stigning 0 til 0.5 m	64%	Stigning 0 til 0.5 m	75%	Stigning 0 til 0.5 m	37%
3 til 10 m	16%	Stigning 0.5 til 1 m	12%	Stigning 0.5 til 1 m	13%	Stigning 0.5 til 1 m	0%
> 10 m	10%	Stigning > 1 m	24%	Stigning > 1 m	9%	Stigning > 1 m	0%

Tabel A4.6 Område DK5 (Jylland midt)

A1B		Ændringer		Ændringer		Ændringer	
Emissionsscenariet		Våd klimamodel		Median klimamodel		Tør klimamodel	
1991-2010		2021-50 versus 1961-90		2021-50 versus 1961-90		2021-2050 versus 1961-90	
Område	DK5	DK5		DK5		DK5	
Middel grundvandsdannelse							
1991-2010:							
0-25 mm/år:	32%	≤ 0 mm/år	20%	≤ 0 mm/år	47%	≤ 0 mm/år	85%
25-100 mm/år:	27%	0-20 mm/år	53%	0-20 mm/år	34%	0-20 mm/år	15%
100-200 mm/år:	13%	20-40 mm/år	6%	20-40 mm/år	9%	20-40 mm/år	0%
200-350 mm/år:	10%	40-100 mm/år	11%	40-100 mm/år	8%	40-100 mm/år	0%
> 350 mm/år:	18%	> 100 mm/år	10%	> 100 mm/år	1%	> 100 mm/år	0%
Typisk lav grundvandsdannelse							
1991-2010:							
0-25 mm/år:	33%	≤ 0 mm/år	16%	≤ 0 mm/år	47%	≤ 0 mm/år	82%
25-100 mm/år:	26%	0-20 mm/år	49%	0-20 mm/år	41%	0-20 mm/år	16%
100-200 mm/år:	14%	20-40 mm/år	9%	20-40 mm/år	6%	20-40 mm/år	1%
200-350 mm/år	11%	40-100 mm/år	18%	40-100 mm/år	6%	40-100 mm/år	0%
> 350 mm/år:	15%	> 100 mm/år	8%	> 100 mm/år	1%	> 100 mm/år	0%
Middel grundvandsstand							
1991-2010:							
≤ 0 m	1%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	6%
0 til 1 m	38%	Fald 0 til 1 m	0%	Fald 0 til 1 m	1%	Fald 0 til 1 m	92%
1 til 3 m	16%	Stigning 0 til 0.5 m	50%	Stigning 0 til 0.5 m	71%	Stigning 0 til 0.5 m	2%
3 til 10 m	22%	Stigning 0.5 til 1 m	16%	Stigning 0.5 til 1 m	20%	Stigning 0.5 til 1 m	0%
> 10 m	23%	Stigning > 1 m	34%	Stigning > 1 m	8%	Stigning > 1 m	0%
Typisk høj grundvandsstand							
1991-2010:							
≤ 0 m	18%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	19%
0 til 1 m	32%	Fald 0 til 1 m	2%	Fald 0 til 1 m	10%	Fald 0 til 1 m	68%
1 til 3 m	10%	Stigning 0 til 0.5 m	46%	Stigning 0 til 0.5 m	70%	Stigning 0 til 0.5 m	13%
3 til 10 m	19%	Stigning 0.5 til 1 m	12%	Stigning 0.5 til 1 m	15%	Stigning 0.5 til 1 m	0%
> 10 m	20%	Stigning > 1 m	40%	Stigning > 1 m	5%	Stigning > 1 m	0%

Tabel A4.7 Område DK6 (Jylland nord)

A1B		Ændringer		Ændringer		Ændringer	
Emissionsscenariet		Våd klimamodel		Median klimamodel		Tør klimamodel	
1991-2010		2021-50 versus 1961-90		2021-50 versus 1961-90		2021-2050 versus 1961-90	
Område	DK6	DK6		DK6		DK6	
Middel grundvandsdannelse							
1991-2010:							
0-25 mm/år:	27%	≤ 0 mm/år	23%	≤ 0 mm/år	40%	≤ 0 mm/år	68%
25-100 mm/år:	10%	0-20 mm/år	24%	0-20 mm/år	36%	0-20 mm/år	31%
100-200 mm/år:	13%	20-40 mm/år	14%	20-40 mm/år	15%	20-40 mm/år	1%
200-350 mm/år:	25%	40-100 mm/år	30%	40-100 mm/år	9%	40-100 mm/år	0%
> 350 mm/år:	25%	> 100 mm/år	9%	> 100 mm/år	0%	> 100 mm/år	0%
Typisk lav grundvandsdannelse							
1991-2010:							
0-25 mm/år:	29%	≤ 0 mm/år	19%	≤ 0 mm/år	38%	≤ 0 mm/år	64%
25-100 mm/år:	10%	0-20 mm/år	26%	0-20 mm/år	33%	0-20 mm/år	29%
100-200 mm/år:	15%	20-40 mm/år	15%	20-40 mm/år	17%	20-40 mm/år	6%
200-350 mm/år	29%	40-100 mm/år	32%	40-100 mm/år	12%	40-100 mm/år	1%
> 350 mm/år:	17%	> 100 mm/år	7%	> 100 mm/år	0%	> 100 mm/år	0%
Middel grundvandsstand							
1991-2010:							
≤ 0 m	1%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%
0 til 1 m	34%	Fald 0 til 1 m	1%	Fald 0 til 1 m	1%	Fald 0 til 1 m	74%
1 til 3 m	14%	Stigning 0 til 0.5 m	45%	Stigning 0 til 0.5 m	60%	Stigning 0 til 0.5 m	26%
3 til 10 m	21%	Stigning 0.5 til 1 m	18%	Stigning 0.5 til 1 m	21%	Stigning 0.5 til 1 m	0%
> 10 m	30%	Stigning > 1 m	36%	Stigning > 1 m	17%	Stigning > 1 m	0%
Typisk høj grundvandsstand							
1991-2010:							
≤ 0 m	9%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	12%
0 til 1 m	37%	Fald 0 til 1 m	1%	Fald 0 til 1 m	12%	Fald 0 til 1 m	81%
1 til 3 m	9%	Stigning 0 til 0.5 m	45%	Stigning 0 til 0.5 m	59%	Stigning 0 til 0.5 m	7%
3 til 10 m	19%	Stigning 0.5 til 1 m	15%	Stigning 0.5 til 1 m	19%	Stigning 0.5 til 1 m	0%
> 10 m	26%	Stigning > 1 m	39%	Stigning > 1 m	10%	Stigning > 1 m	0%

Tabel A4.8 Område DK7 (Bornholm)

A1B		Ændringer		Ændringer		Ændringer	
Emissionsscenariet		Våd klimamodel		Median klimamodel		Tør klimamodel	
1991-2010		2021-50 versus 1961-90		2021-50 versus 1961-90		2021-2050 versus 1961-90	
Område	DK7	DK7		DK7		DK7	
Middel grundvandsdannelse							
1991-2010:							
0-25 mm/år:	69%	≤ 0 mm/år	41%	≤ 0 mm/år	43%	≤ 0 mm/år	47%
25-100 mm/år:	7%	0-20 mm/år	42%	0-20 mm/år	41%	0-20 mm/år	38%
100-200 mm/år:	7%	20-40 mm/år	2%	20-40 mm/år	3%	20-40 mm/år	4%
200-350 mm/år:	12%	40-100 mm/år	6%	40-100 mm/år	7%	40-100 mm/år	9%
> 350 mm/år:	5%	> 100 mm/år	9%	> 100 mm/år	7%	> 100 mm/år	2%
Typisk lav grundvandsdannelse							
1991-2010:							
0-25 mm/år:	71%	≤ 0 mm/år	38%	≤ 0 mm/år	48%	≤ 0 mm/år	66%
25-100 mm/år:	7%	0-20 mm/år	43%	0-20 mm/år	37%	0-20 mm/år	22%
100-200 mm/år:	12%	20-40 mm/år	3%	20-40 mm/år	4%	20-40 mm/år	5%
200-350 mm/år	7%	40-100 mm/år	8%	40-100 mm/år	8%	40-100 mm/år	6%
> 350 mm/år:	4%	> 100 mm/år	8%	> 100 mm/år	3%	> 100 mm/år	1%
Middel grundvandsstand							
1991-2010:							
≤ 0 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%
0 til 1 m	34%	Fald 0 til 1 m	0%	Fald 0 til 1 m	0%	Fald 0 til 1 m	0%
1 til 3 m	21%	Stigning 0 til 0.5 m	36%	Stigning 0 til 0.5 m	43%	Stigning 0 til 0.5 m	50%
3 til 10 m	26%	Stigning 0.5 til 1 m	13%	Stigning 0.5 til 1 m	15%	Stigning 0.5 til 1 m	20%
> 10 m	19%	Stigning > 1 m	51%	Stigning > 1 m	43%	Stigning > 1 m	30%
Typisk høj grundvandsstand							
1991-2010:							
≤ 0 m	40%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%	Fald ≥ 1 m	0%
0 til 1 m	18%	Fald 0 til 1 m	0%	Fald 0 til 1 m	2%	Fald 0 til 1 m	10%
1 til 3 m	11%	Stigning 0 til 0.5 m	46%	Stigning 0 til 0.5 m	47%	Stigning 0 til 0.5 m	42%
3 til 10 m	18%	Stigning 0.5 til 1 m	5%	Stigning 0.5 til 1 m	6%	Stigning 0.5 til 1 m	7%
> 10 m	14%	Stigning > 1 m	48%	Stigning > 1 m	45%	Stigning > 1 m	41%