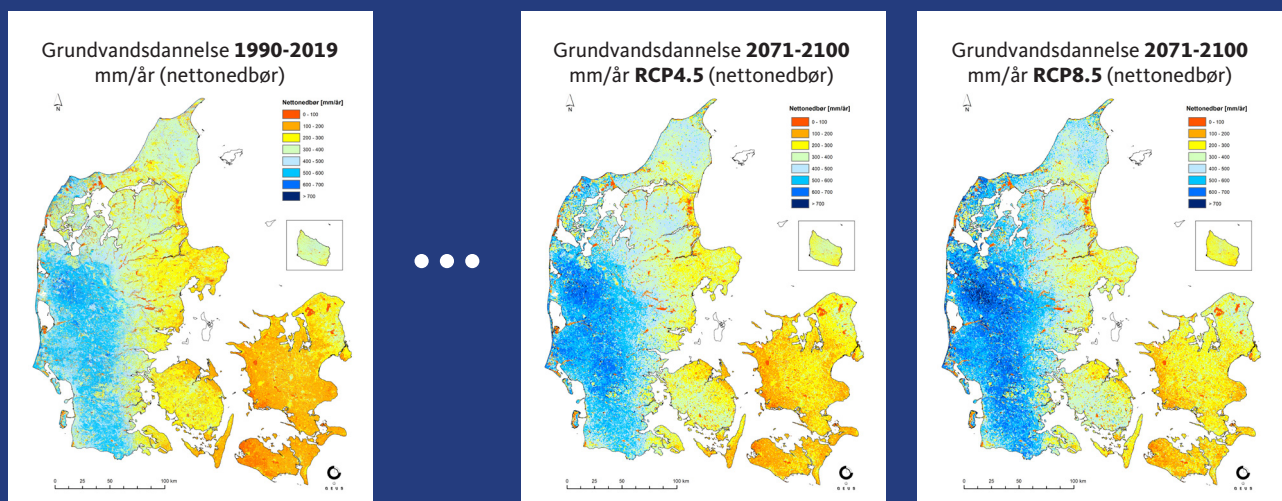


Udvikling af landsdækkende modelberegninger
af terrænnære hydrologiske forhold i 100m grid
ved anvendelse af DK-modellen:

Sammenfatningsrapport vedr. modelleverancer til Hydrologisk Informations- og Prognosesystem

Udarbejdet som en del af DEN FÆLLESOFFENTLIGE DIGITALISERINGSSTRATEGI 2016-2020
INITIATIVET FÆLLES DATA OM TERRÆN, KLIMA OG VAND

Henriksen HJ, Kragh SJ, Gotfredsen J, Ondracek M, van Til M,
Jakobsen A, Schneider RJM, Koch J, Troldborg L, Rasmussen P,
Pasten-Zapata E og Stisen S (2020)



**Udvikling af landsdækkende modelberegninger
af terrænnære hydrologiske forhold i 100m grid
ved anvendelse af DK-modellen:**

**Sammenfatningsrapport vedr. modelleverancer
til Hydrologisk Informations- og Prognosesystem**

Udarbejdet som en del af DEN FÆLLESOFFENTLIGE DIGITALISERINGSSTRATEGI 2016-2020
INITIATIVET FÆLLES DATA OM TERRÆN, KLIMA OG VAND

Henriksen HJ, Kragh SJ, Gotfredsen J, Ondracek M, van Til M,
Jakobsen A, Schneider RJM, Koch J, Troldborg L, Rasmussen P,
Pasten-Zapata E og Stisen S (2020)

Indhold

1.	Ordlister	4
2.	Forord	6
3.	Introduktion og sammenfatning	10
4.	Lidt om metodik	13
4.1	DK-model HIP 100m (500m) model.....	13
4.2	DK-model HIP 500m model baseret klimafremskrivning	15
4.3	Nedskalering af 500m klimafremskrivning til 100m	16
4.4	DK-model HIP 10m ML model for dybde til terrænnært grundvand	17
4.5	Introduktion til statistisk bearbejdning	17
4.6	Nøjagtighed-gyldighed-visualisering af modelfejl/bias.....	19
5.	Leverancebeskrivelser	23
5.1	Historisk periode 1990 - 2019	23
5.2	Klimafremskrivning for RCP4.5 og RCP8.5	26
5.3	Nedskalering af klimafremskrevne dybder til terrænnært grundvand fra 500m til 100m	32
5.4	ML 10m model af dybde til terrænnært grundvand.....	34
5.5	Randbetingelser	36
6.	Anvendelsesmuligheder	38
6.1	Beskrivelse af modelberegningernes anvendelse og gyldighed	38
7.	Referencer	39

1. Ordliste

DK-model 2019	Den nationale vandressource model (www.vandmodel.dk) der i dag anvendes til at beregne vandkredsløb og grundvandsdynamik samt klimabetingede ændringer. Modellen bruger data om hele det hydrologiske kredsløb til beregning af vandindhold i rodzonen, infiltration, strømning i grundvand og afstrømning i vandløb og er baseret på FOHM hydrogeologiske tolkning fra kortlægning. Oprindeligt udviklet i perioden 1996-2003 for det daværende Miljøministerium. Bruges i dag ifb. Vandplaner til kvantitativ tilstandsvurdering, nitratberegninger i grundvand, overvågningsprogram f.eks. havbelastning, kortlægningsmodeller og grundvandsbeskyttelse samt i en række igangværende forskningsprojekter (Stisen et al. 2019).
Dybde til terrænnært grundvand	Dybde til terrænnært grundvand. I daglig tale med en bred betegnelse "grundvandsspejlet". Terrænnært grundvand er defineret som "det første frie grundvandsspejl man støder på fra oven". Der vil være umættet zone under evt. hængende vandspejl, men i praksis er det svært at adskille denne afvigelse, og som princip bør de hængende vandspejl indgå i det terrænnære grundvand, da de selvstændigt kan medføre stigende grundvandsstand (Stisen et al. 2018).
T-års hændelser	T-års hændelser er f.eks. max afstrømninger der forekommer med en vis frekvens, f.eks. én gang hvert andet år (T-2 års gentagelsesperiode), eller én gang hvert 100 år (T-100 års gentagelsesperiode). I HIP er der leveret ekstremværdier for vandføring ved mere end 50.000 vandløbspunkter og dybde til terrænnært grundvand på gridniveau for for historisk periode, samt to fremtidsperiode for RCP4.5 og RCP8.5 (T=2, 5, 10, 20, 50 og 100 år er leveret)
Q-hændelser	Overskridelses sandsynlighed. En Q01 er en høj grundvandsstand der overskrides 1% af tiden. En Q99 er en lav grundvandsstand der overskrides 99% af tiden. Bruges også om vandføring mm.
Ekstrem værdi analyse	Statistisk baseret analyse af T-års gentagelsesperioder for max afstrømninger og dybde til terrænnært grundvandsspejl, på basis af årsmaksimum værdier for en 30-årig periode og python scripts for 3 parameter generaliseret fordelingsfunktion (T=2, 5, 10, 20, 50 og 100 år)
FODS - initiativ 6.1	Fælles Offentlige Digitaliserings Strategi, initiativ 6.1 der omhandler tilgængeliggørelse af data om terræn, klima og vand. Som en del af FODS 6.1 er der leveret et "hydrologisk anlæg" bestående af ca. 5 terabyte data fra modelberegninger (i forskellig opløsning hhv. 500m, 100m og 10m) baseret på DK-model HIP for historisk periode 1990-

	2019 og klimafremskrivninger for nær fremtid (2041-2070) og fjern fremtid (2071-2100) for RCP4.5 og RCP8.5, samt maskinlæring af udvalgte temaer.
Klimafaktor	Forhold mellem fremtidig og nuværende maksimumvandføring. Klimafaktor på f.eks. 1,89 svarer f.eks. til en vandføring der er 89% større i et fremtidigt klima i forhold til referenceperiodens klima.
RCP4.5 og RCP8.5 emissions-scenarier	Mellemhøjt og højt emissionsscenario. Forud for gennemførelsesfasen er foretaget en biaskorrektur og nedskalering af tilgængelige modeller fra CORDEX, hvorved der foreligger 17 biaskorrigerede RCP8.5 klimamodeller nedskaleret for perioden 1970-2100 samt 5 biaskorrigerede RCP4.5 klimamodeller. Bias-korrekturen og nedskaleringen er foretaget med et 10x10 km landsdækkende grid for nedbør og et 20x20 km grid for temperatur og fordampning, og på basis af data fra DMI's klimagrid.
Biaskorrektion	Bias-korrigeret klimadata udføres for at matche observationsgitteret fra Dansk Meteorologisk Institut (DMI), med cellestørrelse på 10x10 km til nedbør og 20x20 km for temperatur.
Jupiter-databasen	National boringsdatabase (Jupiter) er GEUS' landsdækkende database for grundvands-, drikkevands-, råstof-, miljø- og geotekniske data. Databasen er den fællesoffentlige database på området og indgår i Danmarks Miljøportal. Databasen er offentlig tilgængelig.
Maskinlæring (ML), Random Forest (RF), og CatBoost	Maskinlæring tager udgangspunkt i data og undersøger, og konstruerer algoritmer, der på basis af en stor mængde eksempeldata, kan finde sammenhænge, udarbejde forudsigelser og mønstre baseret på data. I HIP4Plus er anvendt maskinlæring ved brug af en Random Forest algoritme til udtynding af pejletidsserier fra Jupiter, til nedskalering af klimagenererede ændringer i dybden til terrænnært grundvand fra 500m til 100m og til maskinlæring ved CatBoost i 10m for vinter og sommersituation for historisk periode. I HIP4Plus er hydrologisk model og maskinlæring så vidt muligt integreret. Random Forest og CatBoost er maskinlæringsalgoritmer baseret på beslutningstræer.
CRPS	Metodik til kalibrering hvor pejle-outliers tillægges mindre vægt.

2. Forord

I et tværoffentligt samarbejde mellem KL, Danske Regioner, Miljøstyrelsen og Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering (SDFE) er der i løbet af 2016-2020 gennemført en række projekter. Projekterne har til formål at sikre lettere adgang til data om terræn, klima og vand, så det i stadig højere grad målrettes de behov, som kommuner, forsyninger, statslige myndigheder m.fl. har til brug for planlægning, klimatilpasning og håndtering af fremtidens vandmasser. Målet er at sikre, at forskellige slutbrugere og anvendere har adgang til et godt datagrundlag til at foretage investeringer i håndteringen af f.eks. stigende grundvand.

Projekterne har været gennemført som en del af den Fællesoffentlige Digitaliseringsstrategi 2016-2020, initiativet 6.1 *Fælles data om terræn, klima og vand* (FODS6.1). Som en del af FODS6.1 er det besluttet at igangsætte udviklingen af et Hydrologisk Informations- og Prognosesystem - HIP. I forbindelse med udviklingen af HIP er der igangsat et delprojekt (HIP4Plus), der skal bidrage med modelberegninger af terrænnære hydrologiske forhold, da det blev vurderet, at behovet for udstilling af modelberegninger i 100 meter grid var markant. Nærværende rapport er en af to slutrapporter, sammenfatningsrapport for modelleverancerne til Hydrologisk informations- og Prognosesystem. I en tilhørende dokumentationsrapport er metoder, datagrundlag mm. rapporteret.

Sideløbende med udviklingen af modelberegninger af terrænnære hydrologiske forhold, udvikles etablering af it-infrastruktur til tilgængeliggørelse. Det skal præciseres, at It-infrastruktur og It-værktøjer til tilgængeliggørelse af modelleverance ikke er foretaget af De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS).

I projektet HIP4Plus har De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) udarbejdet nye og detaljerede modelberegninger af, hvor højt det terrænnære grundvand vil stå i fremtiden og hvor meget ekstra vand, der forventes at strømme i vores vandløb. Nærværende rapport beskriver og dokumenterer de landsdækkende modelberegninger i bl.a. 100 meter grid der nu tilgængeliggøres, samt øvrige modelleverancer udført i forbindelse med HIP4Plus. Indsatsen med at tilvejebringe og tilgængeliggøre data om vandets kredsløb – nedbør, oversvømmelser af terræn, vand i vandløb, afløbssystemer og stigende grundvand m.m. – skal bidrage til at håndtere fremtidens udfordringer med oversvømmelser og grundvand tæt på overfladen, og det vil også i fremtiden være et vigtigt fokus.

I forbindelse med afgrænsningen af projektets omfang, har der været behov for at definere 'terrænnært grundvand'. Følgende definition er blevet accepteret af projektgruppen. Terrænnært grundvand defineres som: *"Det øverste frie grundvandsspejl man støder på fra oven"*. I praksis antages det i modelarbejdet ved udvælgelse af pejlefiltere, der er repræsentative for terrænnært grundvand, at disse har filtermidtpunkt indenfor de øverste 10 meter under terræn. Dette afspejler frem for alt en pragmatisk tilgang, idet nogen områder (f.eks. med lerlag) har en mindre repræsentativ dybde, mens andre områder (f.eks. Karup-hedeslette og områder med morænesand) har en større repræsentativ dybde, bl.a. på grund af mægtighed af umættet zone.

Der er i HIP4Plus defineret tre hovedleverancer:

- Overførsel af terrænnære pejledata fra regionerne til Jupiter-databasen. Der er på frivillig basis indhentet terrænnære pejlinger fra regionerne til brug for kalibrering og validering af DK-modellen. Der findes en stor mængde terrænnære pejledata hos forsyningsselskaber og private aktører (rådgivere, geotekniske firmaer m.fl.). Der er under FODS6.1 ikke afsat midler til indhentning eller frikøb af data, men det opfordres til at man understøtter bedre modellering fremadrettet ved at indsende pejledata til Jupiter.
- Modelberegninger af DK-modellen af terrænnære hydrologiske forhold for 1990-2019. Historiske modelberegninger med anvendelse af nye terrænnære grundvandsdata og baseret på en ny kalibreringsstrategi udviklet i FODS6.1-metodeprojektet. Beregningerne udføres i 100 meter grid samt for ca. 50-60 tusind vandløbsberegningsspunkter. Der opstilles en 10 meter Maskinlærings model (ML 10m) af dybden til terrænnært grundvand på basis af træningsdata (pejledata, søer mm.) med henblik på et detaljeret zoom til brug for screeningsformål.
- Modelberegninger med DK-modellen af terrænnære hydrologiske forhold for 2041-2070 og 2071-2100. Fremskrevne modelberegninger med anvendelse af klimascenarier (for et ambitiøst RCP4.5 og et '*business as usual*' RCP8.5 scenarie). Beregningerne udføres i 500 meter grid samt for ca. 50-60 tusind vandløbsberegningsspunkter, og dybden til terrænnært grundvand nedskales til 100 meter grid.

Der er foretaget en række afgrænsninger med henblik på at komme i mål med HIP4Plus.

Udstillingen af fremskrevne værdier baserer sig på statistisk bearbejdning på basis af modellede døgnværdier beregnet med 22 klimamodeller med 500m modellen. På dette grundlag er foretaget beregninger af ændringer i form af median og standardafvigelse på tværs af RCP4.5 (5 klimamodeller) og RCP8.5 (17 klimamodeller) emissionsscenarioer for nær og fjern fremtid, i forhold til den i HIP4Plus valgte referenceperiode 1990-2019. Ændringer af dybde for terrænnært grundvand er herefter nedskaleret til 100m ved maskinlæring (Random Forest) med henblik på tilvejebringelse af et højopløseligt kort over klimaeffekter på dybde til terrænnært grundvand.

Der er lavet et stort stykke arbejde med udvikling af nye metoder, der sikrer, at man på fagligt fornuftig vis er kommet i mål med et relativt stort og omfattende modelprojekt på relativ kort tid. For at det har kunnet lade sig gøre er der arbejdet med en kombination af 500 meter (DK-model HIP 500m) og 100 meter model (DK-model HIP 100m), hvor noget af kalibreringen sker i 500 meter med efterfølgende parameteroverføring til 100 meter. Der er arbejdet med nye metoder på basis af kalibrering af 10 submodeller, der er foretaget nedskalering af klimafremskrivninger fra 500 meter til 100 meter og der er anvendt maskinlæring til modellering for vinter- og sommer situation på 10m (DK-model HIP 10m ML).

Desuden skal det nævnes at der IKKE er foretaget en egentlig opdatering af data til modelopstilling, f.eks. i form af yderligere geologiske data til brug for modelopsætning.

Eksisterende data i nationale autoritative databaser (DK-model 2019) benyttes til modelopsætning. Se beskrivelse i (Stisen, et al., 2019).

Endelig skal det præciseres, at DK-modellen ejes af GEUS. HIP vil derfor kun give adgang til udvalgte output fra modelberegningerne. Modelfilerne, der ligger til grund for de udvalgte modelberegninger, vil fortsat befinde sig i GEUS-regi. En eventuel tilgængeliggørelse af DK-modellen på modeldatabasen eller lignende skal derfor aftales med GEUS.

HIP4 har haft en projektorganisation bestående af en Initiativ 6.1 styregruppe (FODS6.1 partnere: SDFE, MST, KL og Danske Regioner), en tværgående HIP styregruppe (repræsentanter for parterne i FODS6.1 samt GEUS og DMI), HIP4Plus projektleder (forankret i SDFE, TKV-sekretariatet) samt projektdeltagere og konsulenter. Projektdeltagere har i analysefasen bidraget til, at omfang, afgrænsning, leverancer og gevinster var i overensstemmelse med brugerbehov og muligheder hos leverandørerne, og tilsvarende bidraget i gennemførelsesfasen i en projektgruppe. GEUS har i dette projekt ageret leverandør/konsulent.

Styregruppen har haft deltagelse af:

- Brian Arreborg Hansen/Stine Leth Rasmussen, SDFE
- Niels Philip Jensen, KL
- Mikkel Hall/Michael Dyhr Thomsen/Henrik Hagen Olesen, MST
- Bente Villumsen, Danske Regioner
- Heidi Christiansen Barlebo, GEUS
- Tania Engbo Dyck-Madsen, DMI
- Niels Høgsted, DMP
- Laura Meyer Harrison, SDFE

HIP4Plus gennemførelsesfasen blev for GEUS' del igangsat i april 2019 og afsluttet i december 2020. Som en del af projektførelsen har der været gennemført et mini-review 1 i november 2019 om modelmetodik vedr. kalibrering af 100 meter model, et midtvejsreview i februar 2020 hvor hele modelprojektet blev drøftet, samt et mini-review 2, hvor nedskalering af klimafremskrivninger fra 500 meter til 100 meter blev drøftet. Her har deltaget eksterne reviewere:

- Henrik Madsen, DHI (Mini-review 1 og 2 samt Midtvejs-review)
- Peter Bauer-Gottwein, DTU (Mini-review 1 og Midtvejs-review)
- Ole Bøssing Christensen, DMI (Mini-review 2)

GEUS' projektgruppe har bestået af følgende:

- Hans Jørgen Henriksen (GEUS-projektleder)
- Simon Stisen (Modeludvikling, kalibrering og validering, nedskalering af klimafremskrivning)
- Ernesto Pasten-Zapata (Biaskorrektion og nedskalering af klimamodeller)
- Annesofie Jakobsen (Modelopsætning 100m og klimafremskrivning 500m model)

- Søren Julsgaard Kragh (Modelopsætning 100m og kalibrering-validering-visualisering af fejl/bias)
- Michael van Til (Modelopsætning 100m, submodeller og visualisering af tidsserier)
- Maria Ondracek (Modelopsætning 100m, submodeller og visualisering af modelleverancer/kort)
- Per Rasmussen (Klimafremskrivning 500m model)
- Raphael J.M. Schneider (Maskinlæring pejletidsserier, modelopsætning 100m og nedskalering af klimafremskrivninger til 100m grid ved Random Forest)
- Julian Koch (ML 10m grid af terrænnært grundvand for vinter og sommer situation)
- Jane Gottfredsen (Modelopsætning 100m, geomorfologisk inputdata opdatering og ML 10m grid)
- Mohsen Soltani (Klimafremskrivning 500m model og submodeller)
- Lars Troldborg (Modelopsætning 100m, kalibrering og validering, klimafremskrivning og test- og dataleverancer til HIP1)
- Jens Christian Refsgaard (Kvalitetssikring Midtvejs-review-rapport samt nøjagtighedskriterier, gyldighed og usikkerhed)
- Torben Sonnenborg (Kvalitetssikring metodik/metoderapport samt nøjagtighedskriterier, gyldighed og usikkerhed)

3. Introduktion og sammenfatning

Sammenfatning og konklusioner

Med udgangspunkt i DK-model 2019 er der udviklet en ny landsdækkende model, der har fokus på terrænnært grundvand og leverancer til brug i Hydrologisk Informations- og Prognosesystem (HIP). Den nye model er i modelopstilling, kalibrering, simuleringer og usikkerhedsvurdering fokuseret mod simulering af dybde til terrænnært grundvand, vandindhold i rodzonen, vandføring i vandløb og randbetingelser til lokalmodeller i høj rumlig og tidslig opløsning. Vi har kaldt den nye model for *DK-model HIP*.

Der foreligger dermed kalibrerede, validerede og kvalitetssikrede leverancer af tidsserier og statistiske værdier leveret til HIP. Det nye datasæt er unikt i forhold til konsistens og opløsning og kan bidrage til en mere effektiv håndtering af det mere vand, der vil komme som følge af øget temperatur og nedbør i de kommende årtier. For første gang er det lykkedes at lave et landsdækkende 'hydrologisk anlæg', der kan beskrive, hvordan det terrænnære grundvand forventes at udvikle sig, og hvor tæt det står på terrænen i dag, i nær fremtid 2041-2070 og i fjern fremtid 2071-2100 for to emissionsscenarioer: RCP4.5, der afspejler et 'ambitiøst scenarie', hvor udledningen af drivhusgasser topper midt i det 2100 århundrede, og et uambitiøst 'business as usual'-scenarie, hvor udledningen fortsætter, som den har gjort gennem de sidste årtier.

Betegnelsen *DK-model HIP* dækker over et integreret modelsystem bestående af (i) En 500m model anvendt til kalibrering, randbetingelser og klimafremskrivning for i alt 22 klimamodeler (DK-model HIP 500m), (ii) en 100m model kalibreret på basis af 10 submodeller og valideret på domæneniveau (DK model HIP 100m), (iii) en højopløselig maskinlæringsversion der beskriver dybde til terrænnært grundvand for vinter- og sommersituation baseret på historiske periode (DK-model HIP10m ML) og (iv) en Random Forest nedskalering fra 500m til 100m af ændringer i dybden til terrænnært grundvand for RCP4.5 og RCP8.5 i nær og fjern fremtid i forhold til referenceperioden.

Modelkomplekset er kalibreret og valideret i forhold til data fra ca. 300 vandføringsstationer, tusindvis af pejleboringer og tusindvis af søer. Der har været særlig fokus på data for terrænnært grundvand bl.a. indberettet fra regioner til Jupiter til brug for kalibrering og validering af DK-model HIP. Kalibrering af 100m model er udført ved hjælp af 10 submodeller og integreret med 500m.

Der er tale om en meget bred vifte af dataleverancer der beskriver historik og udvikling. Leverancer foreligger for året, fire årstider og måned. Der er absolutte dybder og statistikværdier med ændringer til terrænnært grundvandsspejl, percentiler, max. og min. grundvandsspejl, overskridelsessandsynligheder, samt T-års hændelser i maksimum værdier fra 2 – 100 år. Tilsvarende er der absolutte vandføringer og statistikværdier med ændringer (klimafaktorer) i vandføring for mere end 50.000 vandløbspunkter. Vandindhold i rodzonen og

randbetingelser til lokalmodeller er ligeledes leveret, således at der samlet set er leveret ca. 5 Tb data, der dermed gøres tilgængelig for anvendere til brug for klimatilpasning, planlægning, vandforvaltning mm.

Fra DK-model 2019 og på vej mod HIP4Plus

Den første DK-model blev udviklet i perioden 1996-2003 og resulterede i en vurdering af den udnyttelige grundvandsressource. Bedre integration af modellering og monitoring, som også er en grundidé i HIP, var oprindeligt et hovedargument bag den allerførste DK-model.

Siden den første version af DK-model, som havde en opløsning på 1x1 km, er der sket en ret omfattende videreudvikling af modelsystemet med indarbejdelse af nye kortlægningsdata (FOHM), nye inddata vedr. jordtyper mm. og forbedret kalibrering og validering, samt forbedret opløsning i 500x500 m (Stisen, et al., 2019). DK-model2019 anvendes i dag som national kvælstofmodel (Højberg, et al., 2015; Trolborg, et al., 2016), til vurdering af grundvandsforekomsters tilstand inkl. bæredygtighed af vandindvinding i forhold til kvantitativ tilstandsvurdering (Henriksen, et al., 2019; Trolborg, 2020) samt i en række forskningsprojekter.

Der har tidligere været gennemført klimafremskrivninger i regi af DK-model bl.a. i 2006 og 2012. Den seneste landsdækkende klimafremskrivning af hydrologi og grundvand fra 2012-2014 blev gennemført med distribution based scaling (DBS) for A1B emissionsscenarioet og på basis af resultater fra ENSEMBLES for 3-9 udvalgte klimamodeller. Data som er udstillet på www.klimatilpasning.dk samt på miljøportalen. Disse data var baseret på en opløsning på 500x 500 m.

Nogen af de væsentligste erfaringer fra tidligere klimafremskrivninger af effekter på hydrologi og grundvandsspejl er, at det er nødvendigt at anvende så mange forskellige klimamodeller som muligt for at opnå en robust fremskrivning. Tidligere fremskrivninger har været baseret på referenceperioden 1961-90. Da vi nærmer os en ny klimanormal (1991-2020) blev det valgt at tage udgangspunkt i referenceperioden 1990-2019. Der blev i HIP4PLUS forud for gennemførselsfasen foretaget en biaskorrektion og nedskalering af tilgængelige modeller fra CORDEX (Pasten-Zapata, et al., 2019), hvorved der forelå 17 biaskorrigerede RCP8.5 klimamodeller nedskaleret for perioden 1970-2100 samt 5 biaskorrigerede RCP4.5 klimamodeller. Biaskorrekturen og nedskaleringen er foretaget med et 10x10 km landsdækkende grid for nedbør og et 20x20 km grid for temperatur og fordampning, og på basis af data fra DMI's klimagrid. Udpegningen af klimamodeller er i øvrigt foretaget i samråd med DMI.

I projektforslaget blev det vurderet at det teknisk set var muligt at nedskalere klimafremskrivninger fra 500m model til 100m. Det blev senere genstand for mini review-2 der blev afholdt i juni 2020, hvorefter det på baggrund af ekspert reviewernes anbefalinger, blev valgt at arbejde på en nedskalering af ændringer i klimafremskrivningens dybde til terrænnært grundvand for hhv. RCP4.5 og RCP8.5 med den metodik, der senere blev udviklet som en del af HIP4PLUS.

I projektet HIP4Plus er fokus at udarbejde detaljerede modelberegninger af, hvor højt det terrænnære grundvand vil stå i fremtiden og hvor meget ekstra vand, der forventes at

strømme i vores vandløb. Metodisk baseres HIP4Plus på resultaterne af det forudgående metodeprojekt – FODS6.1 fasttrack metodeudviklingsprojektet (Stisen, et al., 2018). Her blev det undersøgt hvordan DK-model kunne anvendes til beregning af terrænnære grundvandsstand, vandstand i vandløb og oversvømmelser fra vandløb.

Metodeprojektet blev udført med udgangspunkt i oplandet til Storå og Odense å, i såvel et vstdansk som et østdansk opland med de geologiske og geografiske forhold, der er karakteristiske for hhv. Vest- og Østdanmark, og begge udpeget som væsentlige risikoområder i EU's oversvømmelsesdirektiv. Metodeprojektet viste at det var muligt at lave en landsdækkende 100m model, og samtidig forelå der en nærmere analyse af fire alternative løsningsmodeller. En kombineret 500m/100m model (Løsning IV) viste sig her at være mest optimal og gennemførlig indenfor rammerne af FODS6.1. De væsentligste fordele ved Løsning IV var forbedret nøjagtighed i forhold til simulering af terrænnært grundvand, samt at terrænnært grundvand med en 100m model som udgangspunkt vil kunne nedskaleres til 10m (Stisen, et al., 2018).

En række metodikker blev udviklet i forbindelse med metodeudviklingsprojektet bl.a. et nyt kalibreringskoncept for terrænnært grundvand ('CRPS') og distribueret dræn-opsætning (Stisen, et al., 2018), der senere blev indbygget i DK-model HIP (Stisen, et al., 2019).

Samlet set vurderedes den kombinerede 500m/100m DK-model HIP at udgøre en optimal teknisk løsning på landsplan til forbedret vurdering af områder med højtliggende grundvand og risiko for oversvømmelser fra grundvand og vandløb. Den kombinerede løsning ville samtidig give mulighed for konsistente randbetingelser og parameteroverføring til 100m modeller.

I forbindelse med HIP4Plus blev der i efteråret 2019 gennemført en undersøgelse af metodik til nedskaleringen fra 100m til 10m. På baggrund af denne undersøgelse blev det vurderet, at en maskinlæringsmetodik baseret på "Random Forest" (Koch, et al., 2019), ville være bedre egnet bestemmelse af dybden til terrænnært grundvand i et 10m grid, baseret på resultater fra en 100m model for en typisk vinter- og sommersituation. En opløsning på 10x10m vurderedes gennemførlig indenfor HIP4Plus projektets rammer. Denne opløsning kunne anbefales, da man herved får det visuelt mest detaljerede og kvalitativt mest meningsfulde bud på dybden til det terrænnære grundvand.

For at tilvejebringe en Random Forest beregning, der er så konsistent med den hydrologiske model i 100m som muligt, bør der anvendes samme træningsdatasæt i RF-modellen, som anvendt i kalibreringen af den hydrologiske model. Der forventedes at være mindst 10.000 terrænnære observationer, 40.000 søvandspejl samt yderligere støttepunkter til rådighed (større vandløb og kyst) for kalibrering af den hydrologiske model samt Random Forest for hele landet. Erfaringer med Random Forest har vist, at kalibreringsdata skal processeres så de er repræsentative for en typisk høj (vinter) og en typisk lav (sommer) terrænnær grundvandsstand. Herved er der konsistens mellem træningsdatasæt og forklarende modelvariable når de anvendes i Random Forest.

4. Lidt om metodik

Det overordnede formål med HIP4Plus er at levere modelberegninger af dybden til terrænnært grundvand, vandføring i vandløb samt vandindhold i rodzonen i høj rumlig og tidlig opløsning baseret på både observeret historisk klima og klimafremskrivninger for to emissionsscenarier. I nedenstående afsnit beskrives kortfattet metoderne benyttet i HIP4Plus.

4.1 DK-model HIP 100m (500m) model

GEUS driver og udvikler en landsdækkende vandressourcemodel, den såkaldte DK-model. Modellen bygger på integreret beskrivelse af hele det hydrologiske kredsløb og indeholder en geologisk beskrivelse af undergrunden samt data om klima, jordtyper, arealanvendelse, vandindvindinger og vandløb i beregning af ferskvands-ressourcen på national skala.

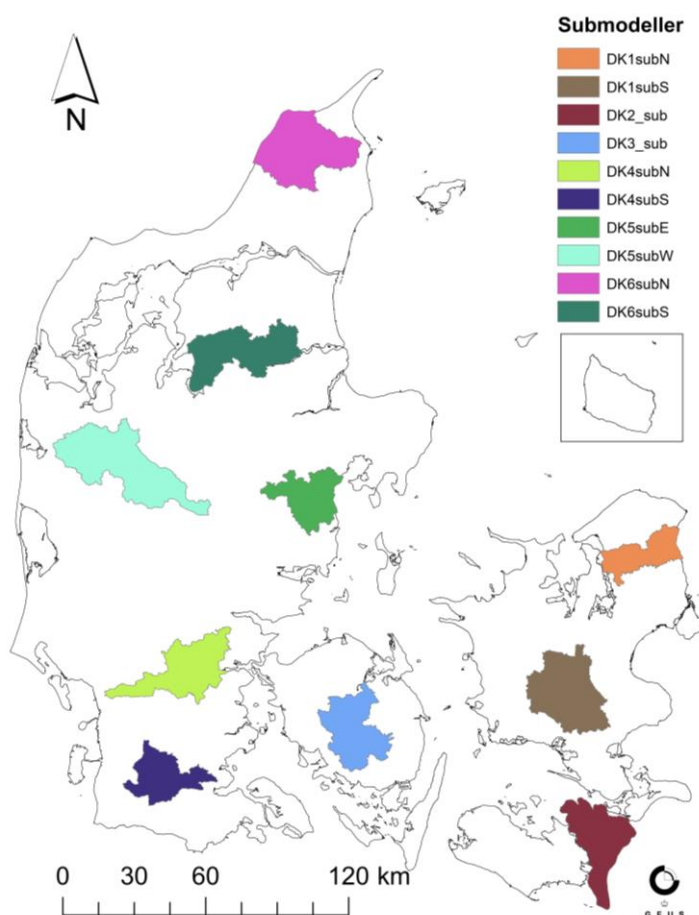
Med modellen er det muligt at beregne den overordnede vandbalance og grundvandets strømningsveje, samt at opgøre grundvandsressurens størrelse. Endvidere fungerer modellen som en tredimensionel database, hvor de nationale hydrologiske data kobles til grundvandmagasinerne, så det er muligt at sammenholde, hvor grundvandet dannes, og hvor det udnyttes (<https://www.geus.dk/vandressourcer/vandets-kredsloeb/den-nationale-vandressource-model>).

I projektet opdateres og videreudvikles den eksisterende DK-model2019 (Stisen, et al., 2019) til en DK-model HIP version i 500m og 100m grid. Grid-størrelsen på DK-model2019 var på 500x500m, og opløsningen skulle derfor forbedres til 100x100m til HIP4Plus-projektet. Med ønsket om højere rumlig opløsning af DK-modellen kræves en øget opløsning af model data inputtet. En væsentlig del af modelarbejdet omhandler derfor forbedring af input-data. For at sikre konsistens mellem 500m og 100m modellerne udarbejdes ét fælles input datasæt i 100x100m til anvendelse i både 500m og 100m modellerne. Dette sikrer at 500m parametriseringen vil være et gennemsnit af 5 x 5 100m celler og dermed størst mulig overensstemmelse. Enkelte modelinput følger ikke dette koncept, bl.a. vandløbsnetværket, som er udbygget med flere små vandløb i 100m modellen, og kystafgrænsningen af alle inputdata, som varierer fra 500m til 100m opløsning. For en teknisk forklaring af udarbejdelse af modelinput henvises til (Henriksen, et al., 2020).

Desuden er der foretaget en kalibrering af DK-model HIP, som foregår i to trin:

- Trin 1) Kalibrering af den nationale DK-model HIP i 500m grid. Denne kalibrering inkluderer alle de væsentlige modelparametre efter samme koncept som DK-model2019. Der er dog i DK-model HIP kalibreringen lagt større vægt på det terrænnære grundvand. Den resulterende DK-model HIP i 500m opløsning anvendes efterfølgende til klimafremskrivning med et ensemble af klimamodeller. Derudover danner DK-model HIP i 500m grundlag for parametriseringen af DK-model HIP 100m.

- Trin 2) Parametrisering af DK-model HIP i 100m grid. Indledningsvis foretages en valideringskørsel med fuld parameteroverførsel fra den kalibrerede nationale 500m DK-model HIP til 100m DK-model HIP. Parameteroverførsel fra DK-model HIP i 500m skyldes, at en fuld kalibrering af en landsdækkende hydrologisk model i 100m gridopløsning har en meget høj beregningstid, som ikke kan gennemføres indenfor projektrammerne af HIP4Plus.
- Dernæst opstilles en 100m kalibrering af udvalgte parametre om vurderes at være særligt følsomme overfor modellens opløsning og af særlig vigtighed i forhold til HIP4Plus leverancer -især det overfladenære grundvand og vandføring i vandløb (Mini-review 1). Denne kalibrering er baseret på 10 submodeller, som udvælges til at repræsentere varierende hydrologiske forhold på tværs af landet. Placeringen af submodellerne, som dækker ca. 1/6 af landet, er illustreret på Figur 1.



Figur 1: Oversigt af geografisk placering af submodeller.

De kalibrerede parametre fra submodellerne blev overført til den nationale DK-model HIP i 100m opløsning. DK-model HIP i 100m blev kørt og kalibreringen samt valideringen opfyldte kriterierne for HIP4Plus vejledende kvantitative og kvalitative nøjagtighedskriterier, som har specielt fokus på det terrænnære grundvand.

4.2 DK-model HIP 500m model baseret klimafremskrivning

HIP4Plus-projektet har til formål at producere hydrologiske data fra klimafremskrivninger i 500m x 500m grid, som skal udstilles på SDFE's portal, dataforsyningen.dk, til brug for myndigheder, virksomheder og borgere. Data fra klimafremskrivninger er simuleret i 500m modellerne, og for dybde til terrænnært grundvand derefter nedskaleret til 100m grid (se afsnit 4.3).

Dette afsnit beskriver, hvordan data fra klimafremskrivninger af 500m modellerne er blevet til. Klimafremskrivningerne er fremstillet på baggrund af den kalibrerede DK-Model HIP i 500m, og fremskrevet med klimadata fra 22 regionale klima modeller for tre 30-årige perioder.

Klimamodeller

I HIP4Plus projektet benyttes 22 (Bornholm 21) regionale klimamodeller (RCM) fra Euro-CORDEX-initiativet (Jacob, et al., 2014) til klimafremskrivningerne. Klimadata blev statistisk bias-korrigeret ved hjælp af en distributionsbaseret tilgang og nedskaleret til at matche observationsgitteret fra DMI. Metoden er beskrevet mere detaljeret af Pasten-Zapata et al. (2019). 17 ud af de 22 klimamodeller afspejler RCP8.5 drivhusgas-scenariet (scenariet med de højeste drivhusgaskoncentrationer), mens de resterende 5 afspejler RCP4.5 scenariet (et mellemliggende scenario). Desuden implementeres havniveaustigninger til de fremtidige kørsler i modelafgrænsningen i det øverste beregningslag sat efter havniveauet i den pågældende periode. Input-data for det fremskrevne havniveau er baseret på DMI klimaatlaser (Langen, et al., 2020).

Opsætning af klimakørsler

Den hydrologiske modelleringsopsætning baseres på en den kalibrerede DK-Model HIP i 500m. Klimakørslerne blev kørt i tre perioder (reference, nærfremtid og fjernetid) af 30 år. Klimadata for referencekørsel udtrækkes for perioden 01-01-1991 til 31-12-2020, og klimadata for nær- og fjernfremtid udtrækkes for hhv. 01-01-2041 til 31-12-2070 og 01-01-2071 til 31-12-2100. Alle modeller er afviklet med et opvarmnings-år og dermed kørt et år inden starten af udtræksperioden.

Alle klimakørslerne er kørt med hot start-data. Hot start-data bruges til at starte simulering fra et tidligere modelresultat. Dette er nyttigt, når kørselstiden til simuleringen er lang. I dette tilfælde køres hot-start-simulering i 130 år (01-01-1971 til 31-12-2100), og der benyttes hot-start dataværdier fra midten af hver kørsel-periode til hhv. reference, nær- og fjernfremtid kørslerne.

Postprocessering af klimakørsler

Efterfølgende er der beregnet ændringer i vandføring, dybde til terrænnært grundvand samt vandindhold i rodzonen mellem referenceperioden og nær- og fjern-fremtid for hver af de 22

klimamodeller. Den endelige leverance består af median- og standard-afvigelse (std) på tværs af klimamodeller for hhv. RCP4.5 og RCP8.5.

4.3 Nedskalering af 500m klimafremskrivning til 100m

På grund af beregningsmæssige begrænsninger, kan den landsdækkende hydrologiske model i den finere 100 m opløsning ikke køres med ensemblet af de 22 nævnte klimamodeller. For at kunne udstille effekten af klimaændringerne på grundvandsspejlet i den ønskede finere opløsning på 100 m, valgte GEUS at nedskalere ændringer i dybden til terrænnært grundvand beregnet for de 22 klimamodelinput med 500 m modellen, ved hjælp af maskinlærings algoritmer til 100 m. Som træningsdata blev anvendt resultater fra fem udvalgte submodeller i 100 m (DK1subS, DK3sub, DK4subN, DK5subW og DK6subS, se Figur 1). Submodeller blev kørt med fem udvalgte klimamodeller hver. Dette svarer til en samlet reduktion til blot ca. 2% af beregningstiden på hydrologiske modeller sammenlignet med den tid, det ville have taget at køre den landsdækkende hydrologiske model i 100 m med alle 22 klimamodeller.

Nedskaleringen omhandler medianen i ændringer for samtlige statistikker på dybden til det terrænnære grundvandsspejl (gennemsnitlig, høj og lav vandstand, samt overskridelses-sandsynligheder og T-års gentagelseshændelser) for både nær og fjern fremtid og for hver RCP4.5 og RCP8.5. Ændringerne repræsenterer differencen mellem de absolutte værdier i fremtidsperioder og de tilsvarende i referenceperioder, mens medianen er beregnet på tværs af klimamodeller.

Til nedskaleringen anvendes Random Forest (RF) algoritmen i sammenspil med en række forklarende variable i 100 m opløsning. Der trænes en RF-algoritme specifikt til hver statistisk størrelse. De forklarende variable kan inddeles i to grupper, hvor den første anvendes til nedskalering af alle statistiske størrelser. Disse er blandt andet topografien (den absolutte højde), hældningen, topographic wetness index (TWI), samt model-parametre som hydraulisk ledningsevne i de øverste beregningslag, dræn dybde og dræn tidskonstant. Dertil kommer en gruppe på tre forklarende variable, som er specifikke for hver RF-træning, da de afhænger af den statistiske størrelse (dybde), som skal nedskaleres: Disse er selve størrelsen (ændringen) i 500 m opløsning (interpoleret til 100 m), den tilsvarende historiske absolutte dybde til grundvandsspejlet fra 100 m modellen, samt differencen i den tilsvarende størrelse fra 100 m modellen mellem to historiske perioder – en mere våd periode, i forhold til en mere tør periode.

Der blev opstillet én RF-algoritme for hver statistik, som blev trænet baseret på ændringerne i 100 m fra de nævnte fem submodeller. Disse RF-algoritmer blev efterfølgende brugt til at danne landsdækkende kort af ændringerne af dybden til det terrænnære grundvandsspejl ved at anvende dem med de tilsvarende landsdækkende ændringer fra 500 m modellen som forklarende variable.

4.4 DK-model HIP 10m ML model for dybde til terrænnært grundvand

Dybden til det terrænnære grundvand er for den historiske periode nedskaleret til en 10 m rumlig opløsning ved hjælp af maskinlæring. Der anvendes en gradient boosting model med beslutningstræer (CatBoost implementering i python). Modelberegningerne giver et landsdækkende overblik over dybden til det terrænnære grundvand i høj rumlig opløsning for to tidlige snapshots, en typisk vinter-situation og en typisk sommer-situation for perioden 1990-2019 inklusive usikkerhedsestimater.

En række observationer af dybden til det terrænnære grundvand er udvalgt, som maskinlæringsmodellen er trænet imod. Observationerne er valgt, så de præsenterer en typisk sommer- og vintersituation. Sommer-situationen beskrives på baggrund af pejlinger fra juni, juli og august i perioden 1990-2019, mens vintersituationen beskrives på baggrund af pejlinger fra december, januar og februar i perioden 1990-2019. For borerer med flere pejlinger i de udvalgte vinter- og sommermåneder bliver en median grundvandsstand beregnet og brugt i træning af maskinlæringsmodellen. Supplerende træningsdata indeholder søer og støttepunkter langs vandløb og kystlinjen. I alt anvendes over 34000 træningsdata. Der bruges i alt 14 forklarende variable i maskinlæringsmodellen. Disse variable indeholder rumlige informationer for de fysiske jordegenskaber, topografi, geologi, arealanvendelse og hydrologiske forhold.

Den typiske sommer- og vinter-grundvandsstand i følge DK-model HIP i 100m grid er også blandt de forklarende variable. Performance af modellen er evalueret ved hjælp af en krydsvalideringstest. Middel absolut fejlen af vinter- og sommer-modellerne er beregnet til ca. 50cm, hvis man tager samtlige 34.000 datapunkter i betragtning og ca. 115cm hvis man evaluerer modellen alene imod borerne.

Usikkerhederne er beskrevet med en q10- og en q90-model og afspejler dermed en 80% konfidensinterval. Usikkerheden stiger som funktion af dybden til det terrænnære grundvand. Den mest afgørende variabel blev bestemt med hjælp af en følsomhedsanalyse. Den vertikale afstand til det nærmeste overfladevands element er den vigtigste forklarende variable i både sommer- og vintersituationen. Hvis man kun tager pejlinger fra borerne i betragtning, følger den typiske sommer- og vintergrundvandsstand beregnet med DK-model HIP i 100m grid, som næstmest følsomme forklarende variabel.

4.5 Introduktion til statistisk bearbejdning

Der er lavet statistisk bearbejdning af historiske og fremskrevne simuleringer for:

1. dybde til grundvandet
2. vandindhold i den umættede zone
3. Vandføring

Den historiske statistik beregnes på baggrund af simuleringsdata for perioden 1990-2019 (begge år inkl.). Modellsimuleringer af dybde til grundvandsspejlet og vandindhold i rodzonen er gemt i 100x100m grid med daglige tidsskridt på DHI fil-formatet *dfs2*. Modellsimuleringer af vandføring er gemt med daglige tidsskridt for de ca. 62.000 beregningspunkter i vandløbsopsætningen gemt på DHI fil-formatet *res1d*. Herud over er der til randbetingelser gemt data for 3D strømning for alle beregningslag hver 90. dag og potentiale for alle beregningslag hver 15. dag, samt nedsivning til mættet zone hver dag. Samlet set fylder modellsimuleringerne for den historiske periode ca. 1,2 Tb før statistisk bearbejdning.

Statistik for referenceperioden (1990-2019) og de to fremskrevne perioder (nær fremtid 2041-2070, fjern fremtid 2071-2100) beregnes på baggrund af simuleringsdata for dybde til terrænnært grundvand og vandindhold i rodzonen er gemt med daglige tidsskridt på DHI fil-formatet *dfs2* i 500x500m grid for DK1-DK6 og i 100x100m grid for DK7. Modellsimuleringer af vandføring er gemt med daglige tidsskridt for de ca. 50.000 beregningspunkter i vandløbsopsætningen gemt på DHI fil-formatet *res1d*. Herud over er der til randbetingelser gemt data for 3D strømning for alle beregningslag hver 90. dag og potentiale for alle beregningslag hver 15. dag, samt nedsivning til mættet zone hver dag. Hver af de tre perioder er simuleret for de 22 forskellige klimamodeller. Samlet set fylder de fremskrevne simuleringer ca. 1Tb for DK7 og 5,2Tb for DK1-DK6 før den statistiske bearbejdning.

Arbejdsgang

Alt statistisk bearbejdning er scriptet i Python (3.7). Lavpraktisk indlæses data fra DHI fil-formatet til enten *Pandas tidsserier* (DataFrame) eller direkte til *NetCDF* begge formater vha. python biblioteket *Hydroinform* (tilgængeligt via GitHub), udviklet af Jacob Gudbjerg, Hydro-Inform IT. Den statistiske bearbejdning foretages herefter med standard Python biblioteker (*Pandas*, *Imoments3* og *xarray*).

Der er gennemført en beregning af statistik for hver af de fire 30 års periode (historisk, reference, nær fremtid, fjern fremtid). Statistikken udregnes for hver af de hele perioder, men også for en række tidsopsplitninger: for hver af månederne (januar, februar, ..., december) og for hver af sæsonerne (vinter, forår, sommer, efterår). Afhængigt af datatype og periode er der udregnet *middel*, *minimum*, *maksimum*, *standard afvigelse*, *median minimum*, *median maksimum*, *frekvens for mindre end 1 og 2 meter til vandspejl*, *overskridelses percentiler for 1%, 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90%, 95% og 99%* samt *ekstremværdi analyse for gentagelsesperioderne 2, 5, 10, 20, 50 og 100 år*.

For den historiske periode er leverancen de statistiske størrelser, samt tidsserier med daglige værdier for de tre datatyper. Der desuden lavet aggregerede tidsserier af gennemsnit per måned per år, -sæson per år og -år.

For den fremskrevne periode er leverancen median og standard afvigelse på tværs af RCP8.5 og på tværs af RCP4.5 klimasimuleringer. Der udregnes median og standard afvigelse for ændringer, dvs. statistik for nær- hhv. fjern fremtid minus fratrukket statistik for reference periode fsa. dybde til grundvandsspejl og vandindhold i umættet zone, og for afstrømning på baggrund af statistik for nær- hhv. fjern fremtid divideret med statistik for

referenceperiode. Eksempelvis skal medianen for RCP8.5 forstås som medianændringen af alle klimasimuleringerne for dette emissionsscenario.

Leverance format

De statistiske leverancer er leveret på tre formater, dels som *Geotif* for alle gridbaserede resultater, dels som sqlite database for alle stationsbaserede resultater og dels som *NetCDF* for alle gridbaserede tidsserier. For de stationsbaserede data er der desuden leveret en database med placering, navngivning og vandløbsstrækningsrelation for de enkelte stationer som indgår med statistik og tidsserie bearbejdning. De statistiske leverancer eksporteres med standard Python bibliotekerne sqlite3 og Gdal.

4.6 Nøjagtighed-gyldighed-visualisering af modelfejl/bias

Et nøjagtighedskriterium er et numerisk mål for overensstemmelsen mellem en modelsimulering og observerede feltdata og benyttes som mål i kalibrerings- og valideringsprocedurer. De opstillede kriterier og numeriske mål skal sikre, at man på et screeningsniveau kan anvende resultaterne fra eksempelvis den historiske 100m simulering og nedskalerede 500m klimafremskrivning, og der stiles efter, at de som udgangspunkt vil være opfyldt for landet som helhed. Der kan dog være områder af landet, hvor modellen performer under et screenings-niveau, ligesom der kan være områder, der performer bedre.

I HIP4Plus projektet er modellens gyldighed, i forhold til simulering af fremtidig dybde til terrænnært grundvand og vandføring i vandløb, kvantificeret ved anvendelse af "split-sample-test", hvor modellen kalibreres på observationer fra perioden 2000-2010 og valideres i perioderne før og efter hhv. 1990-1999 og 2011-2019.

Til beskrivelse af nøjagtigheden af de terrænnære trykniveauer, anvendes middelfejlen (ME) og den absolutte middelfejl (MAE) til karakterisering af modellens bias og gennemsnitlige afvigelse. Til vurdering af modellens performance angives ME og MAE i forhold til de 90% bedste af observationerne (ME90% og MAE90%), da kendskabet til de enkelte observationers målefejl ikke foreligger pga. den betydelige datamængde og forskellige kilder (Stisen et al. 2018). Vurderingen af trykniveaufvigelsen foretages for henholdsvis terrænnære og dybe trykniveauer, kriterierne kan findes i Tabel 1.

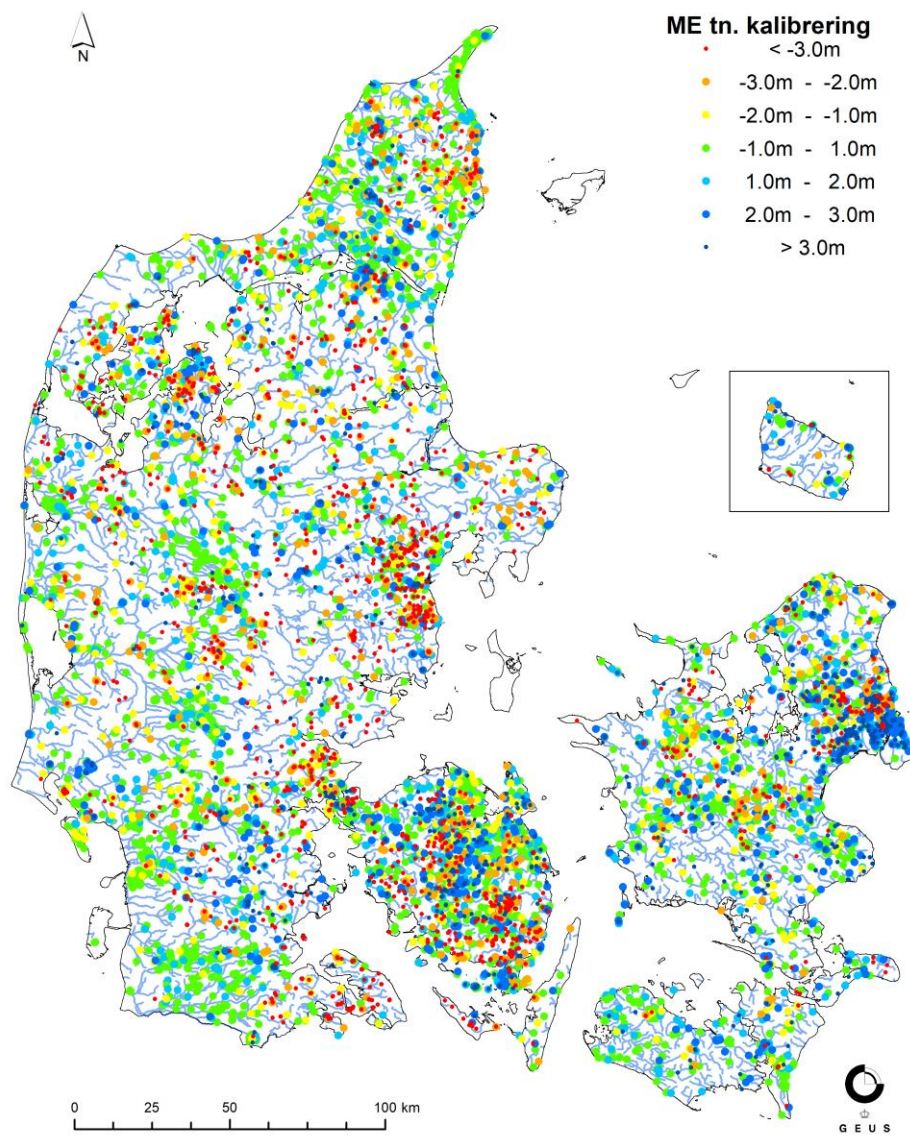
Formålet er at flytte fokus i parameteroptimeringen hen imod det store flertal af pejlinger og søer, som modellen er i stand til at simulere tilfredsstillende, og derved minimere middelfejlen. Hermed antages de største fejl at være "uden for rækkevidde" i kalibreringen, hvor de tillades at blive endnu større. Fordelen er, at man ikke på forhånd skal tage subjektivt stilling til hvilke pejlinger, som er "uden for rækkevidde", samt at man stadig kan afrapportere den samlede model fejl (som kan blive større, afhængigt af hvordan man beregner den), og at man kan få udpeget områder, hvor store fejl er konsistente.

Til beskrivelse af nøjagtigheden af vandføringen, anvendes Kling-Gupta Efficiency (KGE) (Gupta, et al., 2009), den årlige vandbalancefejl (WBE) og sommervandbalance-fejlen (WBEs) til karakterisering af modellens evne til at simulere den rette dynamik, gennemsnitlige og minimums vandføring. I valideringen af modellens evne til simulering af en fremtidig større vandføring valideres modellen på maksimalvandføringsfejlen (Q_{01-E}) og fejlen modellens evne til at estimere en række ekstremhændelser (T_{X-E}). Det overordnede mål for validering af vandføringssimuleringerne er at 75% af stationerne skal overholde nøjagtighedskriterierne, se Tabel 1.

Tabel 1: Numeriske mål for nøjagtighedskriterier til vurdering af observationsgrupper for den simulerede vandføring (KGE, WBE, WBEs, Q_{01-E} og T_{X-E}) og for trykniveau (ME90% og MAE90%).

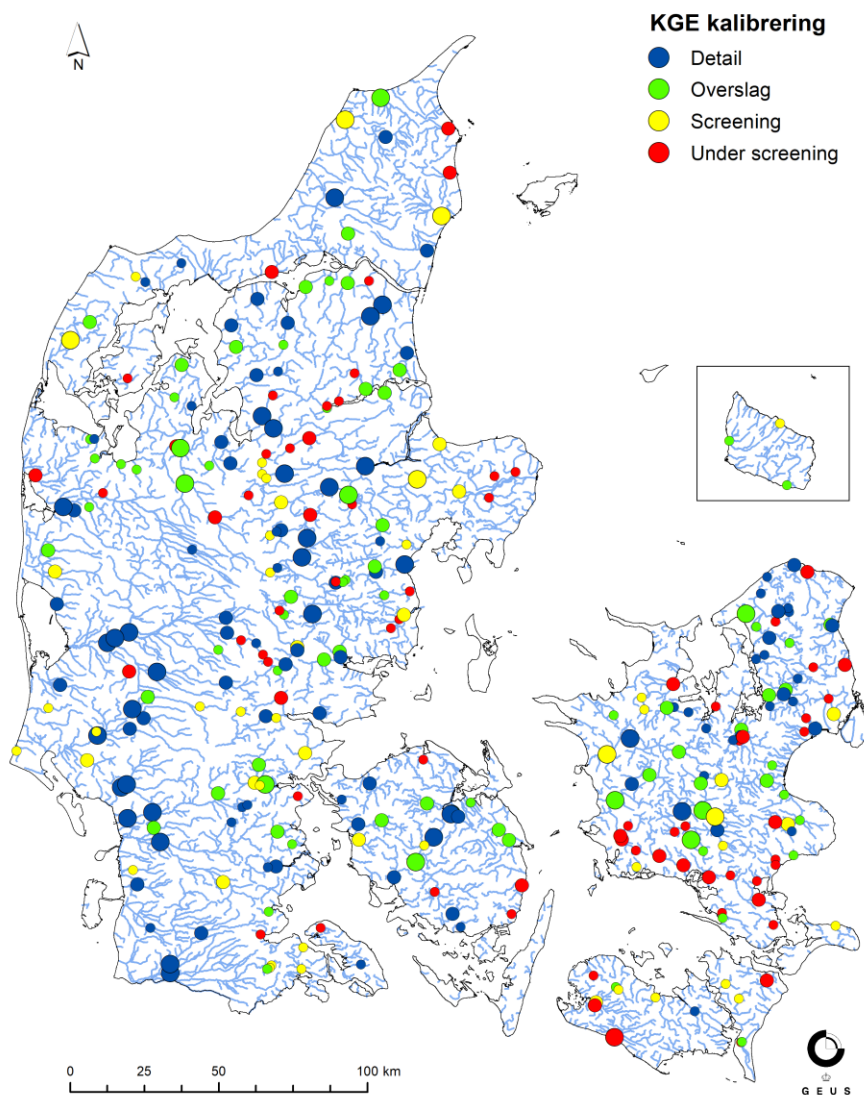
KRITERIUM	UNDER SCREENING	SCREENING	OVERSLAGS-BREGNING	DETAIL-MODELLERING
Kriterium 6 WBE (75 % af stationerne skal overholde kravværdien) (WBE, år) Type 1 $Q_{50} < 100$ l/s Type 2 $100 \text{ l/s} < Q_{50} < 500$ l/s Type 3 $500 \text{ l/s} < Q_{50} < 2000$ l/s Type 4 $2000 \text{ l/s} < Q_{50}$	>40 >25 >15 >10	40-25 25-15 15-10 10-5	25-15 15-10 10-5 5-3	<=15 <=10 <=5 <=3
Kriterium 7 WBEs (75 % af stationerne skal overholde kravværdien) (WBE, sommer) Type 1 $Q_{90} < 15$ l/s Type 2 $15 \text{ l/s} < Q_{90} < 250$ l/s Type 3 $250 \text{ l/s} < Q_{90} < 1000$ l/s Type 4 $1000 \text{ l/s} < Q_{90}$	>80 >50 >30 >15	80-40 50-25 30-15 15-10	40-25 25-15 15-10 10-5	<=25 <=15 <=10 <=5
Kriterium 8 KGE (75% af stationer skal overholde kravværdien) Type 1 $Q_{50} < 100$ l/s Type 1 $Q_{10}/Q_{90} < 5$ Type 2 $5 < Q_{10}/Q_{90} < 10$ Type 3 $10 < Q_{10}/Q_{90} < 20$ Type 4 $20 < Q_{10}/Q_{90}$	<0,50 <0,50 <0,55 <0,60 <0,65	0,50-0,60 0,50-0,60 0,55-0,65 0,60-0,70 0,65-0,75	0,60-0,70 0,60-0,70 0,65-0,75 0,70-0,80 0,75-0,85	>=0,70 >=0,70 >=0,75 >=0,80 >=0,85
Kriterium 9A Q_{01-E} (75 % af stationerne skal overholde kravværdien)	>50	50-30	30-15	>=15
Kriterium 9B T_{X-E} (75 % af stationerne skal overholde kravværdien)	>50	50-30	30-15	>=15
Kriterium 10 ME90% Terrænnære og dybe pejlinger	>1,0	0,5-1,0	0,2-0,5	<0,2
Kriterium 11tn MAE90% Terrænnære pejlinger	>2,0	1,0-2,0	0,5-1,0	<0,5
Kriterium 11db MAE90% Dybe pejlinger	>3,0	2,0-3,0	1,0-2,0	<1,0

Kriterier og mål vil variere fra opgave til opgave, men det afgørende er, at aktørerne konkret tager stilling til, hvad der skal benyttes i den konkrete opgave (Refsgaard, et al., 2004; Black, et al., 2011; Anderson, et al., 2015). Endelig er gyldighed tæt knyttet til, hvad modellen anvendes til. Såfremt modellen kan opfylde de relevante kriterier i et givent opland, kan man tale om dokumenteret velegnet f.eks. på et screeningsniveau. Hvis ikke der foreligger tilstrækkelige observationsdata kan man tale om måske egnet, og i så fald kan der være behov for detailkortlægning. Endelig kan der være områder, hvor modellen ud fra valideringstest vurderes ikke egnet. I sådanne områder kan det være nødvendigt at opstille en ny lokalmodel, og her kan man så evt. anvende randbetingelser fra den nationale model.



Figur 2: Rumlig fordeling og størrelse af middelfejl (ME) for alle observerede terrænnære trykniveauer i kalibreringsperioden 2000-2010. Symbolrækkefølgen bevæger sig fra grøn (bagerst) til henholdsvis rød og mørkeblå (forrest). Områder med større afvigelser bliver således fremhævet på figuren.

I Figur 2 og Figur 3 vises to eksempler for visualisering af usikkerheden på pejledata og vandføringsdata. I Figur 2 vises middelfejlen for samtlige terrænnære borer fra kalibreringsperioden. For det terrænnære grundvand er det generelle billede, at ME pr. boring i størstedelen af landet er imellem $\pm 2\text{m}$, hvilket er acceptabelt for de terrænnære observationer. Generelt virker fordelingen af ME, mindre end $\pm 3\text{m}$, rimelig ensartet med få områder, hvor større ME dominerer.



Figur 3: Rumlig fordeling af KGE nøjagtighedsniveauer for alle vandføringsstationer i kalibreringsperioden 2000-2010. Cirklernes størrelse angiver oplands-størrelsen, små cirkler $< 100\text{ km}^2$, mellem cirkler mellem $100\text{-}200\text{ km}^2$ og store cirkler $> 200\text{ km}^2$.

På Figur 3 vises KGE for vandføringsdynamikken fra kalibreringsperioden. For vandføringsdynamikken er det generelle billede, at usikkerheden er rimelig jævnt fordelt ud over hele landet. Dog ses der f.eks. i det sydlige Sjælland at modellen for en større del af stationerne har sværere ved at simulere den observerede vandføringsdynamik.

5. Leverancebeskrivelser

Data leverancen omfatter dels statistisk bearbejdede data og "rå" modelresultater til randbetingelser. For dybde til grundvandet, vandindhold i rodzone og vandløbsafstrømning (Tabel 2, punkt 1,2 og 7) er der leveret beskrivende statistik og tidsserier af data på dagsniveau samt tidsaggregeret til år, sæson og måned. Potentiale og infiltration (Tabel 2, punkt 4, 5 og 6) er leveret som tidsserier for hele perioden. Grundvandsflux i horisontal og vertikal retning (Tabel 2, punkt 3 og 4) er udelukkende leveret som simpel middelværdi for hele perioden, mens hydrostratigrafisk model, usikkerheder og kalibrerings-valideringsdata udelukkende er rumlige fordelte data. De fleste af leverancerne leveres for historiske såvel som for klimafremskrevne perioder, se Tabel 2.

Tabel 2 Liste med leverancer til SDFE

Leverancer til SDFE	Historiske 100m	Historisk 500m	Historisk 10m ML	Klimafremskrivning 500m (Bornholm 100m)	Klimafremskrivning nedskaleret til 100m
(1) Dybde til terrænnært grundvand	x (**)	x	x vinter & sommer	x (**, ****)	x (****)
(2) Vandindhold i rodzone	x			x (****)	
(3) Grundvandsflux X,Y	x (*, **)			x (**)	
(4) Grundvandsflux Z	x (***)				
(5) Tidsvarierende potentiale	x (*, **, ***)			x (**)	
(6) Infiltration til mættet zone - nettonedbør	x (**)			x (**)	
(7) Vandføring	x (**)	x		x (**, ****)	
(8) Hydrostratigrafisk model	x (*)	x (*)			
Usikkerheder	Punkt (1) og (7)		(1) (q10, q90) (****)	(1), (2) og (7) (*****)	
Kalibrering og valideringsdata	x	x			

Usikkerhederne formidles primært som standardafvigelser og performance statistik, både rumlig og i tabel

* alle lag

** randbetingelse til lokalmodeller

*** seks vandførende lag

**** ændring i forhold til reference scenarie

***** usikkerheden bestemt ud fra q10 og q90 fraktil for vinter- og sommersituationen

*****median og standardafvigelse på tværs af klimamodellen

Nedenfor er der lavet en kort beskrivelse af leverancerne.

5.1 Historisk periode 1990 - 2019

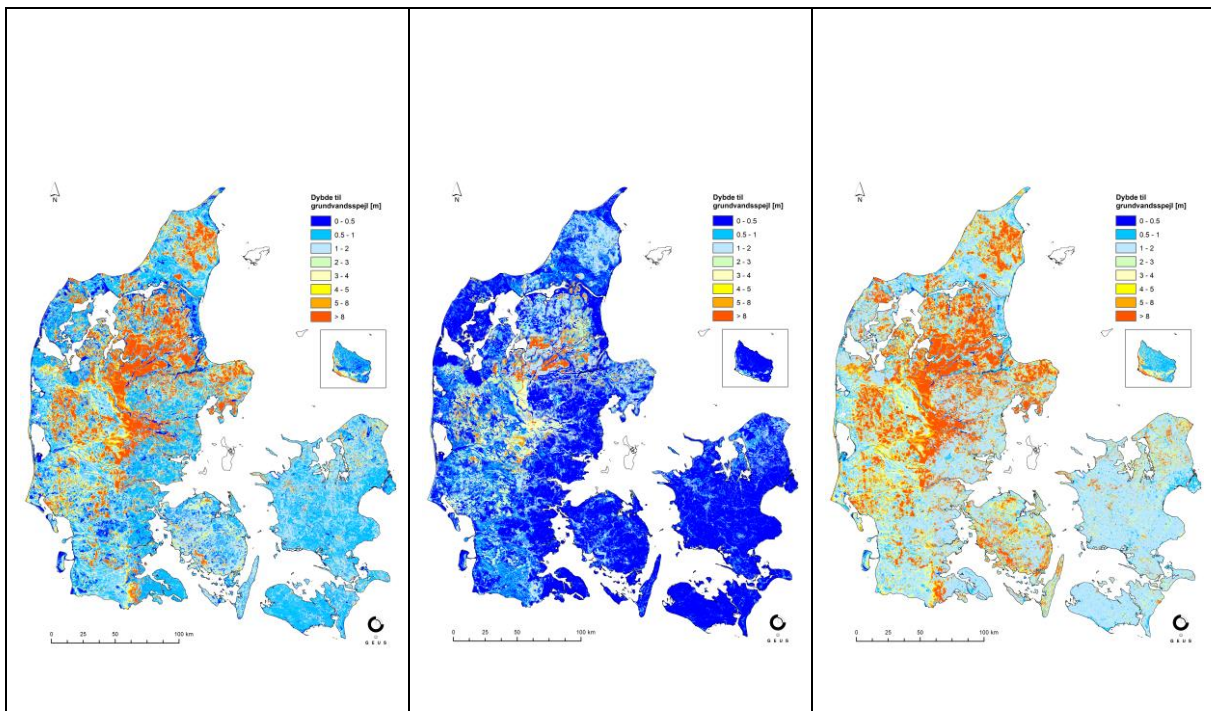
Kort beskrivelse af hvad leverancerne for 100m modellen for den historiske periode består af. Model simulerede afstand til grundvandsspejlet som middel i perioden 1990 – 2019, osv.

Dybde til terrænnært grundvand

For dybden til grundvandet består leverancen af tidsserier (dag, måned, sæson, år) og beskrivende statistik:

- Maksimum, minimum, middel, standard afvigelse (periode, sæson og måned)
- Overskridelses percentiler (1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 og 99) (periode, sæson og måned)
- T-hændelser (2-, 5-, 10-, 20-, 50- og 100-årshændelse) (kun hele perioden)
- Overskridessandsynligheden/frekvensen af terrænnært grundvand tættere end 1m/2m under terræn (kun hele perioden)

Som eksempel på leverancen for dybden til det terrænnære grundvand vises nedenfor middel, mindste og største dybde til terrænnært grundvand i perioden 1990 – 2019 (Figur 4).



Figur 4. Dybden til terrænnært grundvand, (fra venstre) middel dybde, mindste dybde samt største dybde for perioden 1990 – 2019.

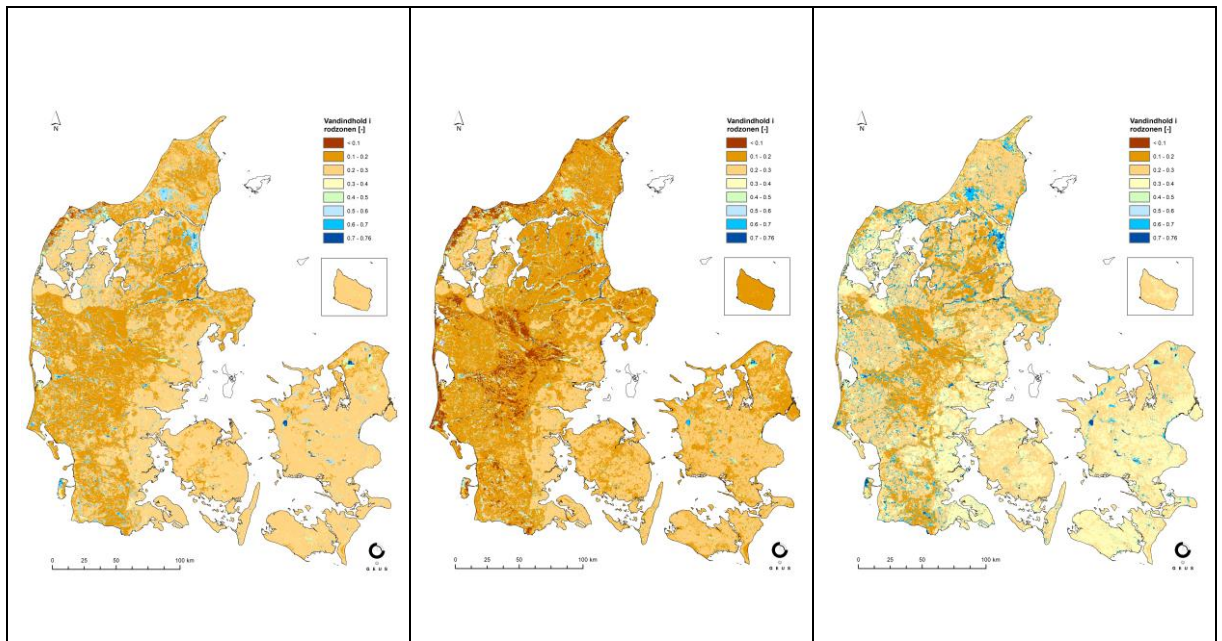
Det fremgår at dybden til terrænnært grundvand varierer mellem landsdelene og over året. I situationer med max terrænnær grundvandsstand typisk om vinteren er dybden i store dele af landet under 0.5m. I en minimumssituation typisk om sommeren står det terrænnære grundvand et par meter eller mere under terræn. Nogle områder har relativ stor dybde på mere end 8m.

Vandindhold i rodzonen

For vandindholdet i rodzonen består leverancen af tidsserier (dag, måned, sæson, år) og beskrivende statistik:

- Middelværdi, standard afvigelse samt overskridelses percentiler 99 (minimum) og 1 (maksimum) (for hele perioden, sæson og måned)

Vandindholdet i rodzonen er den vandmængde der er i rodzonen [m³/m³]. Vandindholdet i rodzonen er enhedsløst, og måles mellem 0 og 1 (som volumenfraktion). I MIKE SHE er vandindholdet styret af nedbør, aktuel fordamning og variation i rodzone dybden. På Figur 5 ses middel værdier af simuleret vandindhold i rodzonen, samt middel vandindhold for vinter og sommer i perioden. Sommerperioder defineres som juni, juli og august og vinterperioder som december, januar og februar.



Figur 5. Vandindhold i umættet zone som middel for hele perioden, sommer perioden og vinter perioden 1990 – 2019.

Vandføring

For vandføring består leverancen af tidsserier (dag, måned, sæson, år) og beskrivende statistik (for hele perioden, sæson- og månedsniveau) for alle vandføringspunkter i modellen:

- Maksimum, minimum, middel, standard afvigelse (periode, sæson og måned)
- Overskridelses percentiler (1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 og 99) (periode, sæson og måned)
- T-hændelser (2-, 5-, 10-, 20-, 50- og 100-årshændelse) (kun for perioden)
- Median maksimum og median minimum (kun for perioden)

For hvert af de ca. 62.000 beregningspunkter er der gemt daglige værdier af afstrømning (m³/s). Nedenfor vises eksempel på overskridelses percentilerne Q01 (meget stor afstrømning), Q50 (median afstrømning) og Q99 (meget lille afstrømning).



Figur 6. Vandføring Q01, Q50 og Q99.

5.2 Klimafremskrivning for RCP4.5 og RCP8.5

Modellsimuleringer af klimafremskrivninger i 500m for hele landet undtagen Bornholm som simuleres i 100m. For de to RCP4.5 og RCP8.5 scenarier er der udregnet median og standard afvigelse på tværs af ændringer i de forskellige statistikker der er udregnet for de enkelte klimasimuleringerne. Ændringerne er udregnet ved at sammenligne nær hhv. fjern fremtid med referenceperioden simuleret med de enkelte klimamodel fremskrivninger (sc1-sc22).

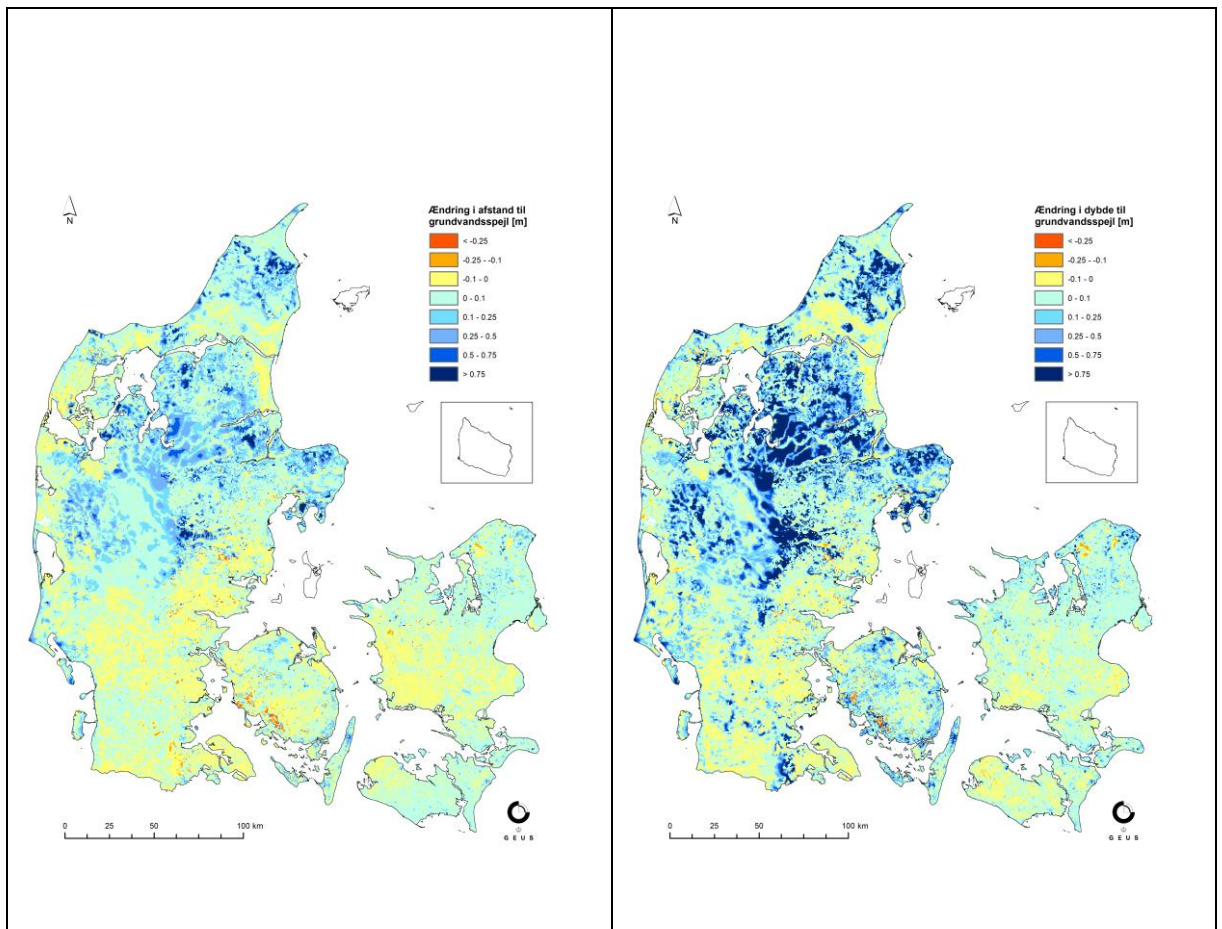
Dybde til terrænnært grundvand

Der er udregnet median ændring og standard afvigelse for de to emissionsscenarier af forskel mellem de enkelte klimamodel fremskrivninger (17 RCP8.5 klimamodeller hhv. 5 RCP4.5 klimamodeller) beskrivende statistik for reference (1991-2020) og beskrivende statistik for fremtid (hhv. 2041-2070 og 2071-2100) af simulering af dybde til grundvandsspejlet.

For dybden til grundvandet består den beskrivende statistik af:

- Middelværdi, Q01 (tættest på terræn, bruges som maksimumsværdi) og Q99 (længst fra terræn, bruges som minimumsværdi) (for hele perioden, sæson og måned)
- T-hændelser (2-, 5-, 10-, 20-, 50- og 100-årshændelse) (kun hele perioden)
- Overskridelsessandsynligheden/Frekvensen af terrænnært grundvand tættere end 1m/2m under terræn (kun hele perioden)

På Figur 7 vises eksempel på ændringen i afstanden til det terrænnære grundvand for fjern fremtid under RCP4.5 og RCP8.5 scenarier.



Figur 7. DK-model HIP 500m klimafremskrivning, ændringen i dybden til det terrænnære grundvand, fjern fremtid 2071-2100. Median. RCP4.5 til venstre og RCP8.5 til højre.

Dybden til terrænnært grundvand er generelt stigende ved de to emissionsscenarioer, med de klart mest markante stigninger for RCP8.5 i forhold til RCP4.5 i centrale dele af Nordjylland og Midtjylland og dele af øerne. I nogle områder ses et uændret eller faldende niveau f.eks. omkring Limfjorden, dele af Vest- og Sydjylland, Fyn samt Midtsjælland og Lolland.

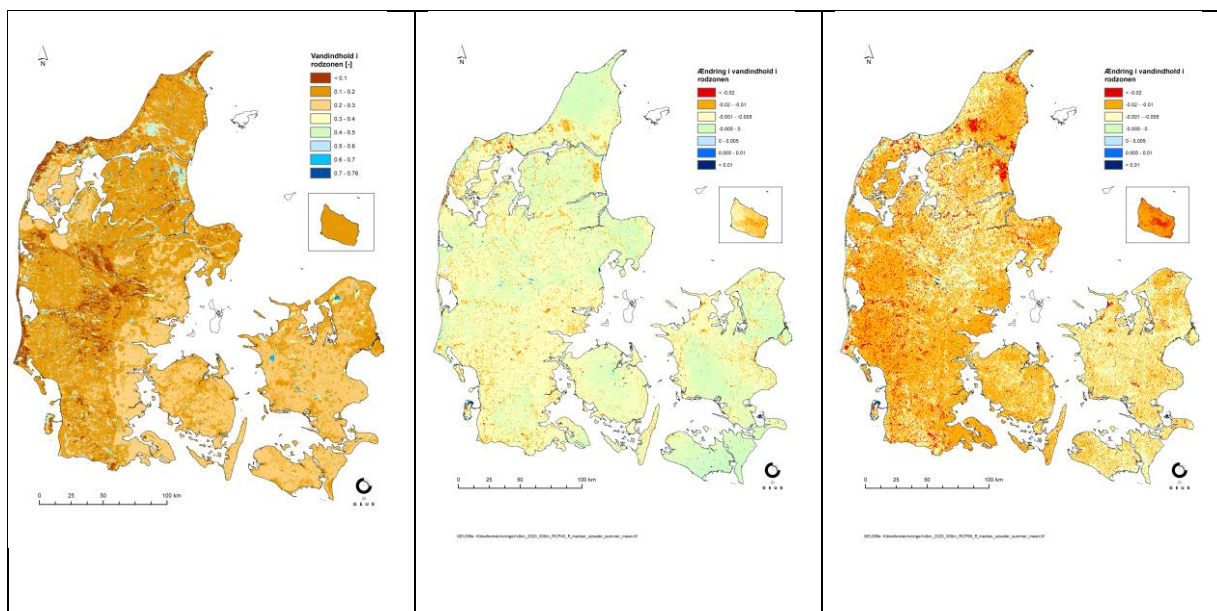
Vandindhold i rodzonen

Der er udregnet median ændring og standard afvigelse for de to emissionsscenarioer af forskel mellem de enkelte klimascenariers (17 RCP8.5 klimascenarier hhv. 5 RCP4.5 klimascenarier) beskrivende statistik for reference (1991-2020) og beskrivende statistik for fremtid (hhv. 2041-2070 og 2071-2100) for vandindhold i rodzonen.

Den beskrivende statistik består af:

- Middelværdi, Q01 (tættest på terræn bruges som maksimumsvandindhold) og Q99 (længst fra terræn bruges som minimumsvandindhold) (for hele perioden, sæson og måned)

Eksempel på leverancer af vandføring vises på Figur 8. Figuren viser DK-model HIP 100m middel af sommermånedernes vandindhold i rodzonen samt DK-model HIP 500m ændring i median af sommermånedernes vandindhold i rodzonen i RCP4.5 og RCP8.5 i fjern fremtid.



Figur 8: Historisk 100 m sommer middel, ændring i vandindholdet i rodzonen RCP4.5 sommer median fjern fremtid og RCP8.5 sommer median fjern fremtid. ændring i vandindholdet. Bemærk. Granskning har påvist en fejl i processering af klimafremskrivning for Bornholm, genberegning er igangsat og forventes implementeret i løbet af marts 2021.

Variationer i vandindhold på tværs af landet afhænger dels af nedbørsfordeling og dels af jordtype og arealanvendelse. I fjern fremtid ses et generelt et større fald i vandindhold for sommerperioden for RCP8.5 sammenlignet med RCP4.5.

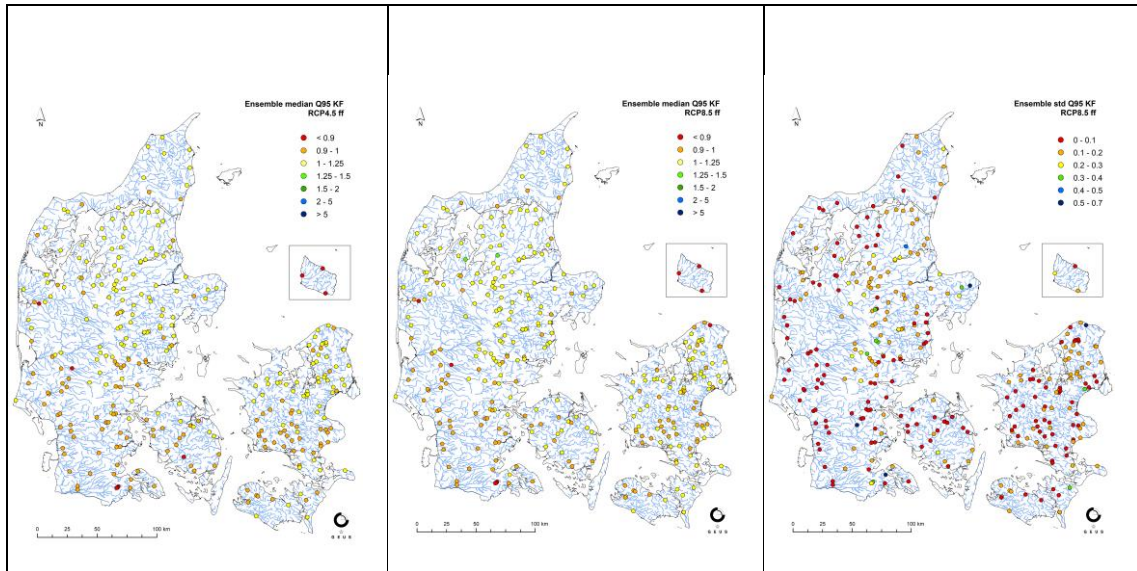
Vandføring

Der er udregnet median ændring og standard afvigelse for de to emissionsscenarioer af forholdet mellem de enkelte klimascenariers (17 RCP8.5 klimascenariers hhv. 5 RCP4.5 klimascenariers) beskrivende statistik for fremtid (hhv. 2041-2070 og 2071-2100) og beskrivende statistik for reference (1991-2020) af simulering af vandløbsafstrømning.

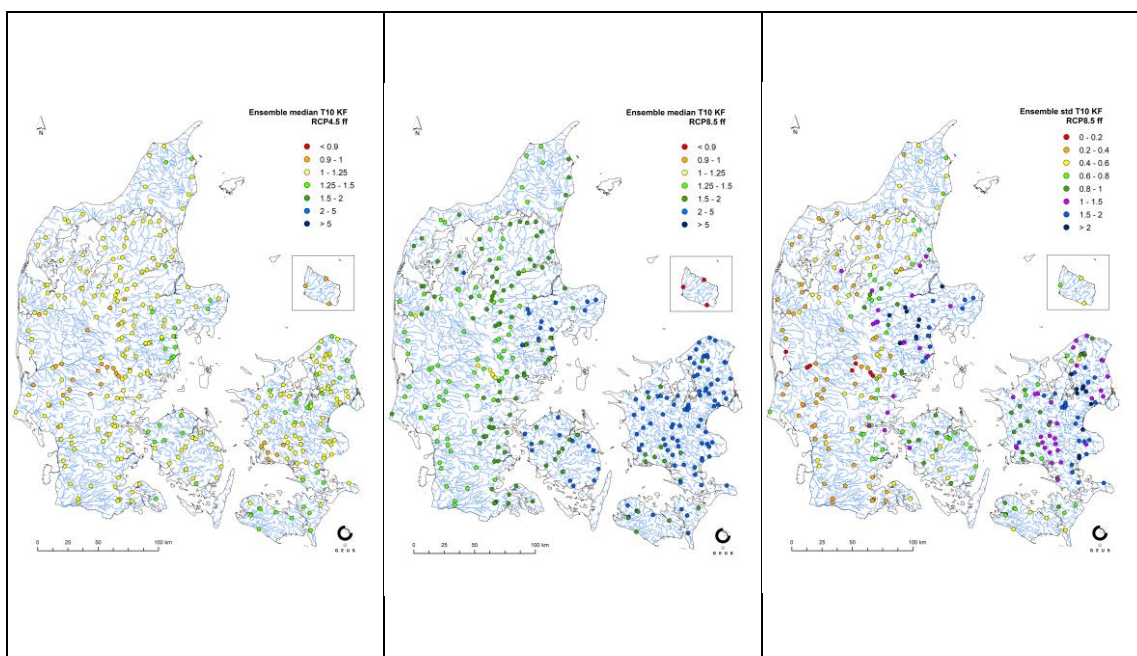
Den beskrivende statistik består, for hele perioden, måneds- og sæsonniveau, af:

- Maksimum, minimum, middel (periode, sæson og måned)
- Overskridelses percentiler (1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 og 99) (periode, sæson og måned)
- T-hændelser (2-, 5-, 10-, 20-, 50- og 100-årshændelse) (kun for perioden)
- Median maksimum og median minimum (kun hele perioden)

I Figur 10 vises eksempler på den beregnede forhold på 10-års maksimalvandføring i vandføring for fjernfremtid ift. referenceperioden for hhv. medianen af alle 5 RCP 4.5 klimascenarier og 17 RCP8.5 klimascenarier samt standardafvigelsen for RCP8.5 fjernfremtid. I Figur 9 vises Q95 for RCP4.5 og RCP8.5 samt standardafvigelsen for fjern fremtid. Figureerne viser kun data fra vandføringsstationerne.



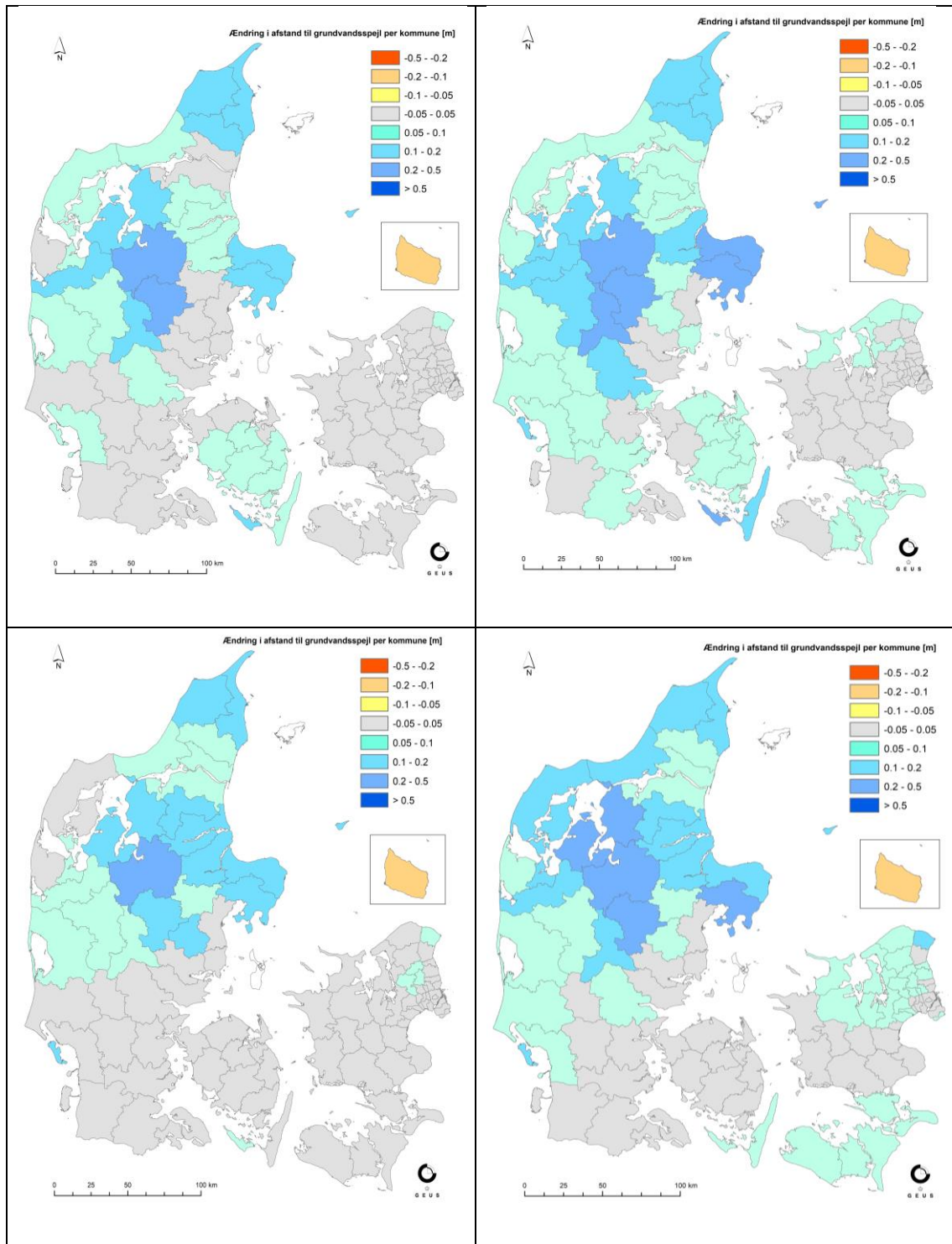
Figur 9: Klimafremskrivning, median på klimafaktor Q95, RCP4.5 til venstre og RCP8.5 til højre. Standardafvigelsen for RCP8.5 fjern fremtid vises th. Viser kun vandføringsstationer.

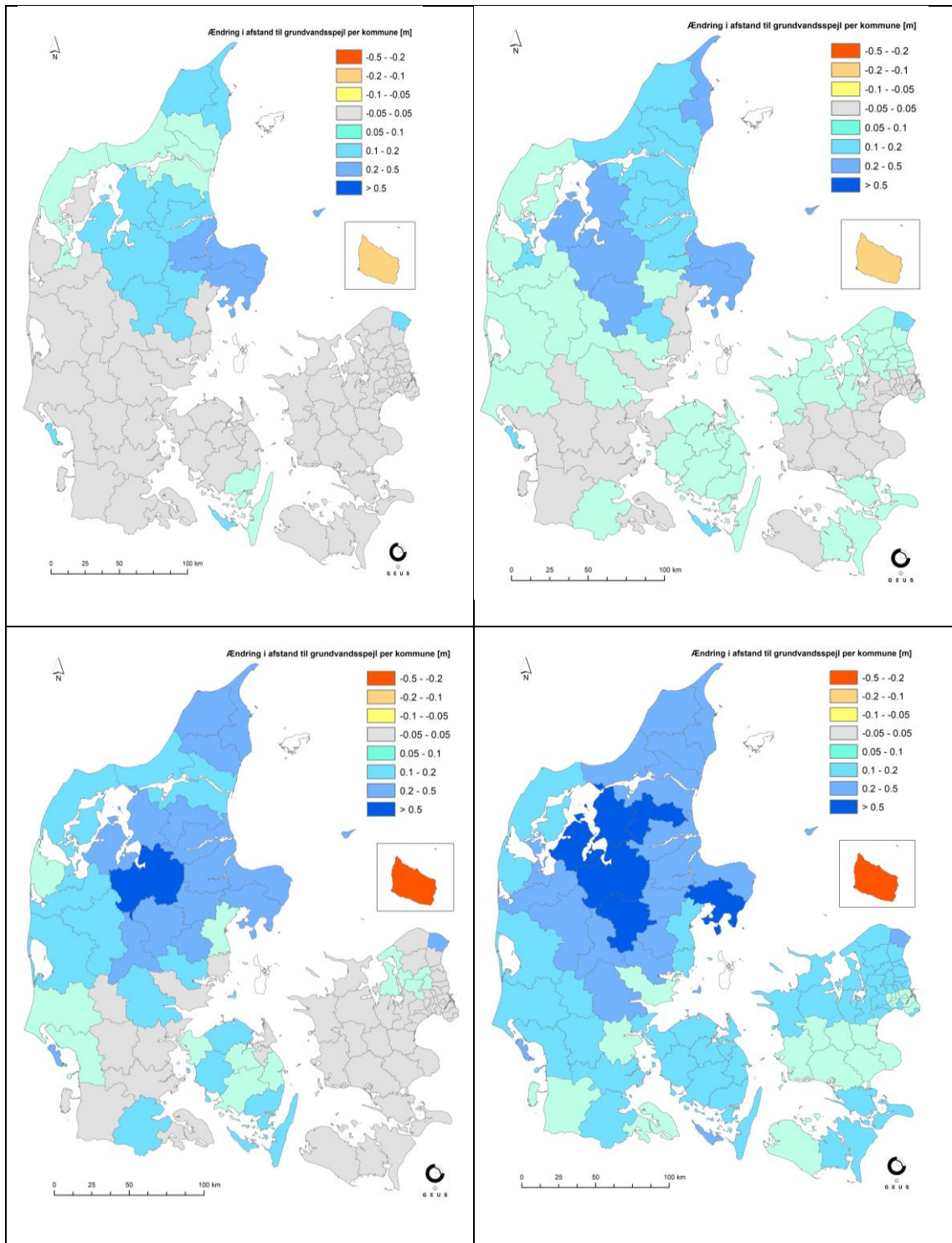


Figur 10: Klimafremskrivning, median på klimafaktor på 10-års maksimal vandføring fjern fremtid, RCP4.5 til venstre og RCP8.5 i midten, standardafvigelsen til RCP8.5 fjern fremtid til højre. Viser kun vandføringsstationer. Bemærk. Granskning har påvist en fejl i processering af klimafremskrivning for Bornholm, genberegning er igangsat og forventes implementeret i løbet af marts 2021.

Ændring i dybde til terrænnært grundvandsspejl på kommune niveau

I Figur 11 vises ændringen i afstanden til det terrænnære grundvand for nær fremtid og fjern fremtid under RCP4.5 og RCP8.5 scenarier, for både sommer- og vinterperioder.

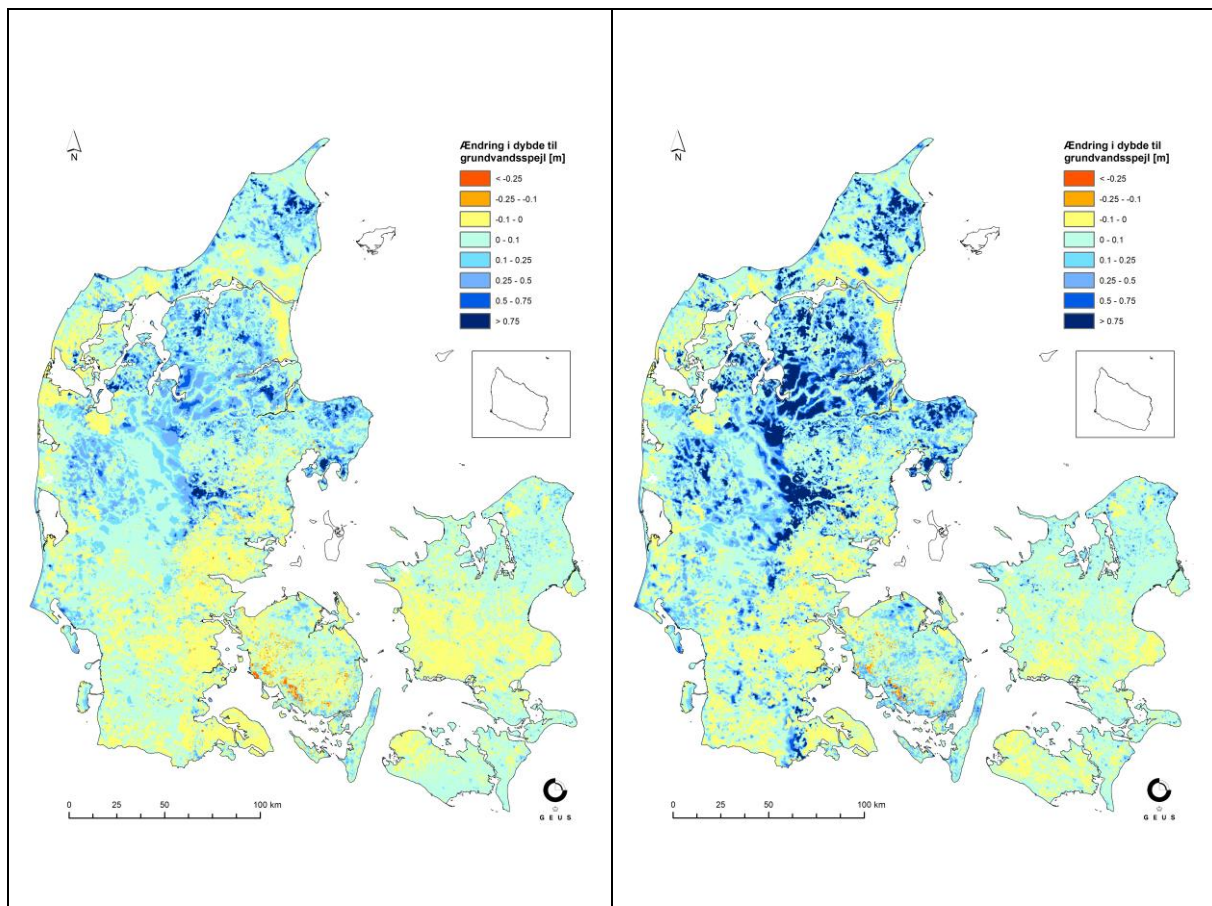




Figur 11: Ændringen i dybden til det terrænnære grundvand per kommune. Fra øverst tv. - RCP4.5 nær fremtid sommer, RCP4.5 nær fremtid vinter, RCP4.5 fjern fremtid sommer, RCP4.5 fjern fremtid vinter, RCP8.5 nær fremtid sommer, RCP8.5 nær fremtid vinter, RCP8.5 fjern fremtid sommer, RCP8.5 fjern fremtid vinter. Bemærk. Granskning har påvist en fejl i processering af klimafremskrivning for Bornholm, genberegning er igangsat og forventes implementeret i løbet af marts 2021.

5.3 Nedskalering af klimafremskrevne dybder til terrænnært grundvand fra 500m til 100m

Klimafremskrivningerne med ensemblet af 22 klimamodeller blev kørt med DK-model HIP i 500 m opløsning. Disse modelkørsler blev blandt andet brugt til at udtrække ændringerne i dybden til det terrænnære grundvand, som er præsenteret ovenfor i afsnit 5.2. Baseret på disse resultater i 500 m opløsning, samt submodelkørsler i 100 m opløsning som beskrevet i afsnit 4.3 blev der udført en maskinlærings-baseret nedskalering af ændringerne i 500 m til 100 m. Figur 12 viser ændringen til den gennemsnitlige dybde til det terrænnære grundvand i perioden 2071-2100 (fjern fremtid) for både medianen af RCP4.5 og RCP8.5 klimamodeller. Dvs. Figur 12 skal direkte sammenlignes Figur 7; den førstnævnte er nedskaleringsresultatet i 100 m opløsning af modelresultatet i 500 m opløsning vist i den sidstnævnte.

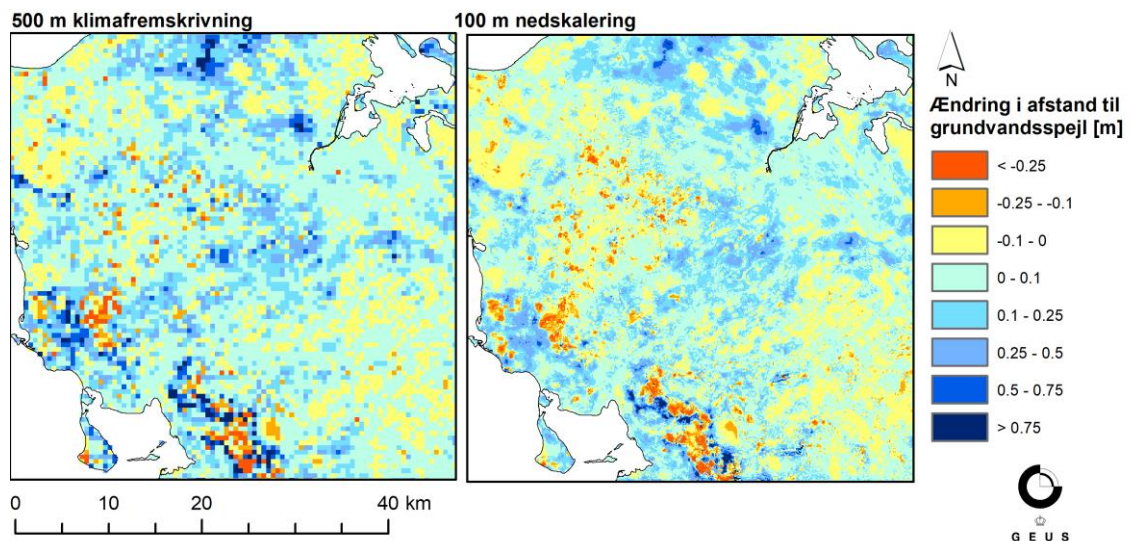


Figur 12. Nedskaleret ændring i dybden til grundvandsspejlet, fjern fremtid. RCP4.5 til venstre og RCP8.5 til højre. Gennemsnit for hele året.

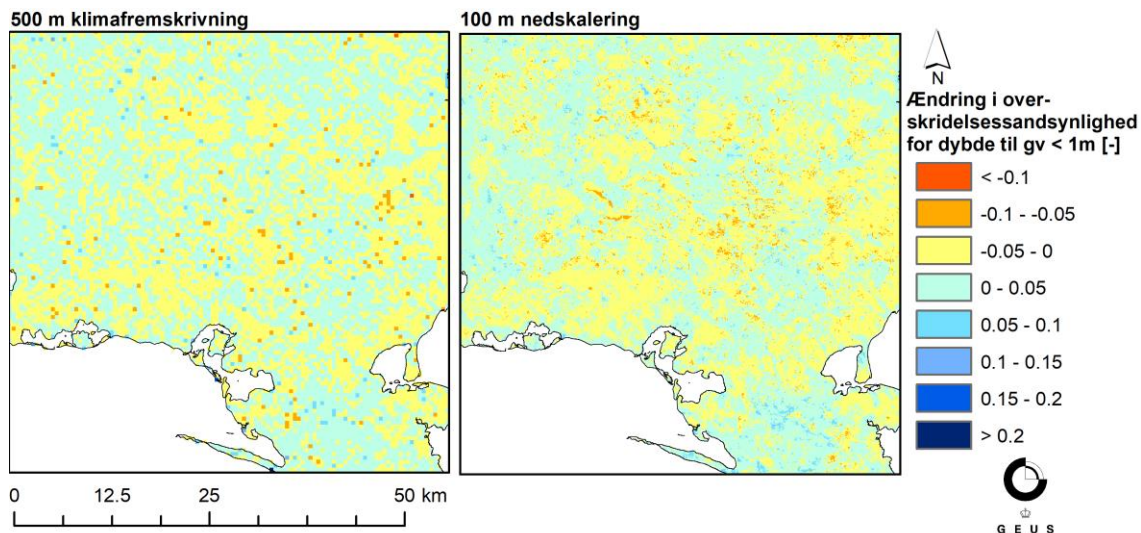
De næste figurer viser hver et mindre udsnit af de landsdækkende kort, for forskellige ændringer, perioder og RCP-scenarier. Det giver en fornemmelse af, hvor store forskellene er og hvor mange flere detaljer er synlige i 100 m ændringerne sammenlignet med 500 m. Figur 13 viser ændringen i den gennemsnitlige dybde til det terrænnære grundvand for et udsnit af Fyn. Her kan ses, at både 500 m modelresultater og 100 m nedskaleringen er ens om at prædikere at i fjern- fremtid med RCP8.5 scenario stiger vandspejlet flere steder end den

falder. Undtagelser er enkelte steder på Sydvestfyn, hvor detaljerne træder meget bedre frem i 100 m nedskaleringen.

Figur 14 viser ændringen i overskridelsessandsynligheden for et grundvandsspejl mindre end 1 m under terræn. Her viser vi en del af Sydsjælland (omkring Næstved), og situation i nær fremtidsperioden for RCP4.5 scenariet. Igen stemmer 500 m model resultater overens med 100 m nedskaleringen hvad der angår de generelle mønstre: Nogen steder falder overskridelsessandsynligheden, mens andre steder (f.eks. i det sydøstlige hjørne af udsnittet) stiger den. Dog igen tillader 100 m nedskaleringen at opløse mange flere detaljer af ændringen. Den øgede detaljeringsgrad skyldes mest, at udviklingen i dybden til grundvandet er styret af blandt andet variationer i topografien og de hydrauliske ledningsevner. Disse data foreligger i høj opløsning, og den tilknyttede information bliver udnyttet af nedskaleringsalgoritmen, dog bliver de aggregeret i den nationale model med 500 m opløsning.



Figur 13. Eksempel på ændring i dybden til det terrænnære grundvand på Fyn. Ændring i perioden 2071 - 2100, for RCP8.5. Ændringer i meter, som fremtid - reference. Til venstre: 500 m hydrologisk model. Til højre: Nedskaleret til 100 m.



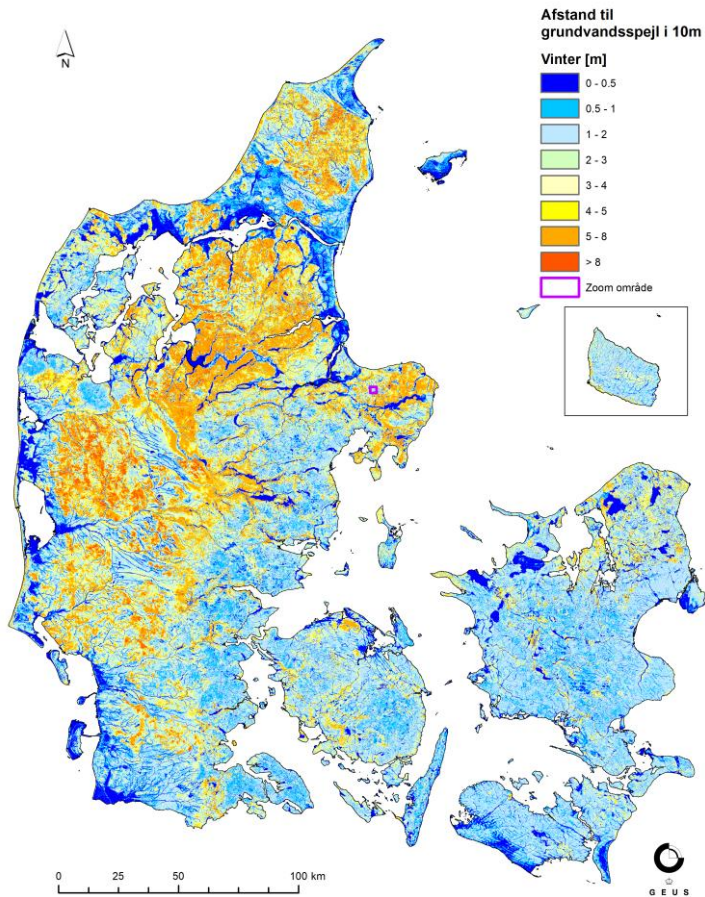
Figur 14. Eksempel for ændring i sandsynligheden at det terrænnære grundvand står mindre end 1 m under terræn på Sydsjælland. Ændring i perioden 2041 - 2070, for RCP4.5. Ændringer uden enhed, som fremtid - reference. Til venstre: 500 m hydrologisk model. Til højre: Nedskaleret til 100 m.

For en detaljeret diskussion af nedskaleringen, samt en opgørelse dens performance i sammenligning med træningsdatasættet og 500 m modelresultater, henvises til dokumentationsrapport (Henriksen, et al., 2020).

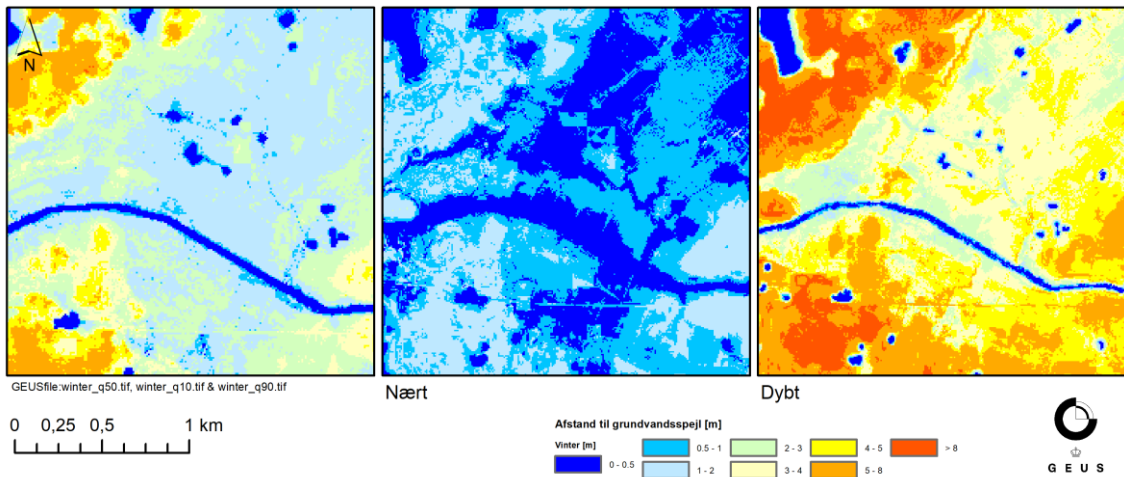
5.4 ML 10m model af dybde til terrænnært grundvand

Det maskinlæringsbaserede modelværktøj giver landsdækkende estimer af dybden til det terrænnære grundvand i 10m rumligt opløsning for en typisk vinter- og en typisk sommer tilstand samt en usikkerhedskvantificering. Kortet i Figur 15 viser resultatet for vinter-modellen. Det rumlige mønster er sammenligneligt med det fra 100m modellen (Figur 4). Detaljeringsgraden af en 10m rumligt opløsning er svær at erkende på et landsdækkende kort. Derfor blev der udvalgt et zoom område (cirka 2 x 2 km) ved Djursland.

Udsnittet er vist i Figur 16 for vinter-modellen samt konfidensintervallerne. Vandløbet ses tydeligt med en grundvandsdybde på 0m. I zoomområder befinder der sig en række små søer, som er inkluderet i træningsdatasættet. Det er afspejlet i modelberegning og de små søer er synlige med en grundvandsdybde på 0m. Usikkerheden er relativt stor for områder med dybere beliggende grundvandsstand, men relativt lille for områder med et grundvandspejl tæt på terrænet.



Figur 15 Resultatet af 10m ML modellen for typisk vinter tilstand.



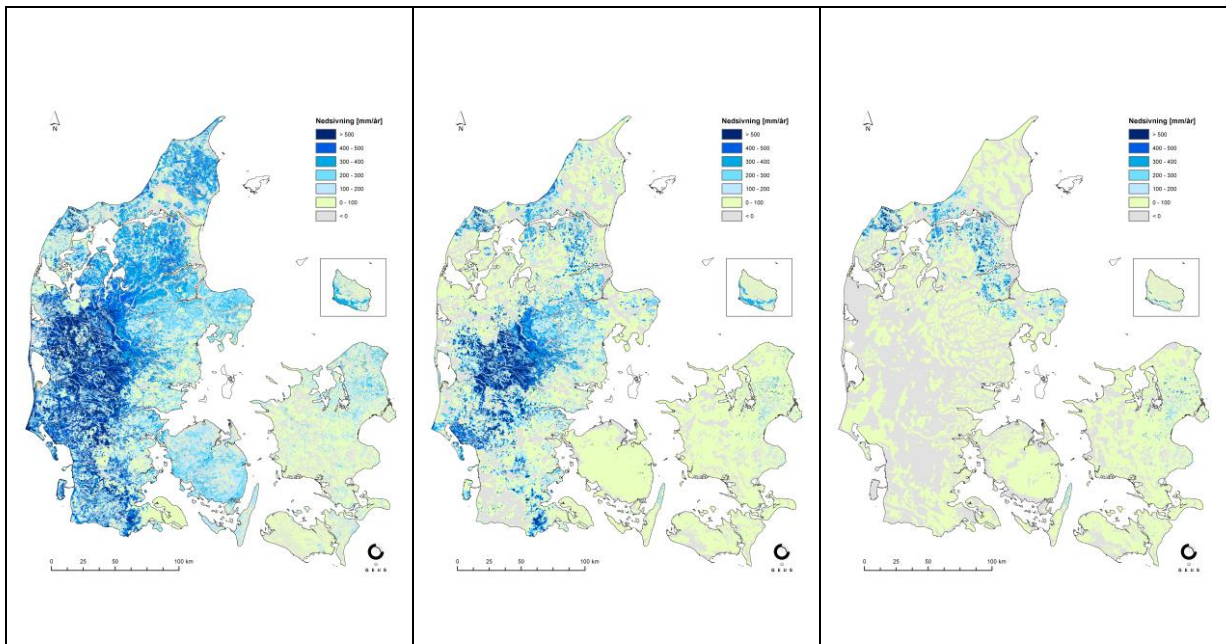
Figur 16 Resultatet af konfidens intervaller af 10m ML modellen for typisk sommertilstand (top) og typisk vinter tilstand (bund). Zoom området er angivet i Figur 15. Kortet på venstre siden viser typisk vintertilstand og kortene i midten og højre side viser hhv. nære (q10) og dybe (q90) konfidensintervaller.

5.5 Randbetingelser

For alle historiske og klimascenarie modelkørsler er der dannet NetCDF af trykniveau for alle lag med 15 dages opløsning og nettonedbør, dybde til grundvandsspejlet og afstrømning i vandløb (inkl. placering) med 1 dages opløsning. Herudover er der dannet NetCDF data med modellag og for vandløbsplacering. Der er udtrukket tidsvarierende data for de historiske simuleringer og for tre perioder for hver af klimasimuleringerne (reference, nær fremtid og fjern fremtid), således at det er muligt at opstille en lokalmodel og afvikle såvel historiske som klimasimuleringer med randbetingelser fra DK-model HIP. Det skal bemærkes at DK-model HIP er afviklet i 100 m grid for den historiske periode og randbetingelserne ligger tilgængelige i 100 m, men ikke for den klimasimuleringerne da disse er afviklet i 500 m grid, hvorfor randbetingelserne for disse kun er tilgængelige i 500 m grid.

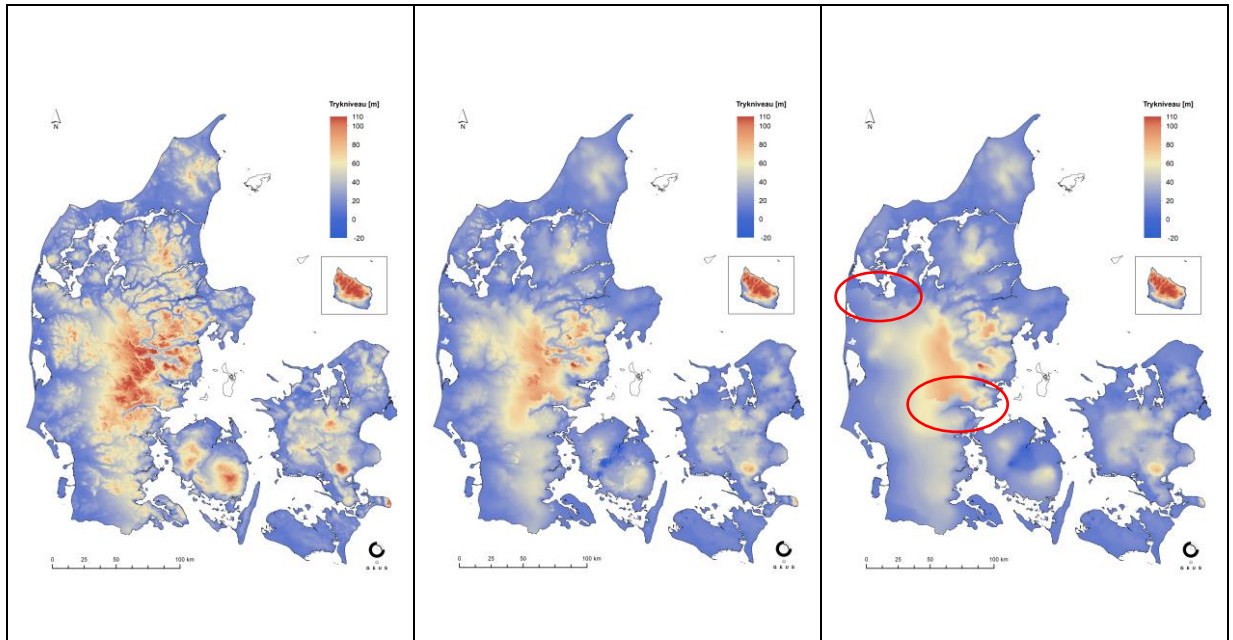
For alle randbetingelsesdata er der dannet tif filer med middelværdier for de enkelte 30 års perioder (historisk, reference, nær fremtid og fjern fremtid). Tif filerne er angivet i bearbejdede enheder (fx mm/år for nettonedbør) og data fra de enkelte vandførende modellag er oversat til grundvandførende lag 1-6 (gw11-gw16). Tif filerne med middelværdier forventes at blive brugt i orienterende arbejde og som input stationært input til lokalmodeller, hvor det primært er de vandførende enheder der vil være brug for at låse fast med en tryk eller flux rand (ikke vandførende enheder vil typisk låses fast med no-flow rande). For den historiske periode og fremskrevne perioder er der desuden dannet middelværdier for den horisontale grundvandsflux for alle den vandførende lag. Disse data er ikke udtrukket med det formål at skulle bruges direkte som modelrand til en lokal model, men de er i stedet tænkt anvendt i det orienterende arbejde, fx til lokalmodel afgrænsning og placering af randbetingelser.

Eksempler på middelværdi af nedsvivning til magasinlag ks1, ks3, ks4-6 og kalken for den historiske periode er vist på Figur 17.



Figur 17. Middelværdi af nedsvivning til magasinlag ks1, ks3, ks4-6 og kalken i perioden 1990 – 2019 (mm/år).

Eksempler på simuleret trykniveau (middel) i perioden 1990 – 2019 præsenteres i Figur 18 for magasinlag, gwl1 (ks1), gwl3 (ks3) og gwl6 (kalken). Bemærk at der er trykforskelle ved modelafgrænsningsranden mellem DK4 og DK5 samt DK5 og DK6, markeret med rød cirkel i figuren. Det anbefales at være ekstra opmærksom når lokalmodeller opstilles hen over DK-model domæne områder, idet der kan forekomme spring i trykniveuaet specielt i de dybere lag i modellen.



Figur 18. Simuleret middeltrykniveau i perioden 1990 – 2019 for magasinlag, ks1, ks3 og kalken (m DVR).

6. Anvendelsesmuligheder

6.1 Beskrivelse af modelberegningernes anvendelse og gyldighed

Resultaterne fra HIP4Plus kan anvendes i mange forskellige sammenhænge, her er nogle eksempler, som projektgruppen har fremført:

- Klimatilpasning
- Planlægnings- og prioriteringsværktøj f.eks. byggeri, infrastruktur og byplanlægning
- Spildevandsforvaltning og vedligehold af vandinfrastruktur
- Vandløbs- og grundvandsforvaltning
- Øvrig forvaltning og sagsbehandling
- Klimarobust risikovurdering ved jordforurening og grundvandsforurening
- Landbrug
- IT-udvikling

Kriterier og mål vil variere fra opgave til opgave bl.a. afhængig af modelformål, krav til nøjagtighed, områdets karakteristika mm. Geovejledninger og god praksis vejledninger kan give en ramme med "blød vejledning", men det afgørende er, at aktørerne konkret tager stilling til, hvad der skal benyttes i den konkrete opgave (Refsgaard, et al., 2004; Black, et al., 2011; Anderson, et al., 2015).

Ingen model har universel gyldighed. De opstillede performancekriterier og numeriske mål for nøjagtighed skal sikre, at der er fuld gennemsigthed omkring, hvorvidt performance opnået f.eks. for DK-model HIP 100m modellen for historisk periode er acceptabel for en given anvendelse og i en given stedspecifik kontekst. Der er stilet efter, at der på landsplan er opnået en performance, der som udgangspunkt honorerer et screeningsniveau.

Såfremt modellen opfylder de relevante kriterier i et givent område, og der er et tilstrækkeligt datagrundlag til vurdering af fejl/bias i forhold til en given anvendelse, taler man om *dokumenteret velegnet*. Hvor der kun foreligger få data, kan man tale om *måske egnet*. Endelig kan der være områder, hvor modellen vurderes ikke egnet. I sådanne områder kan man evt. anvende randbetingelser fra DK-model HIP 100m.

I praksis vil modellen ikke kunne stå alene. Det vil altid være nødvendigt at inddrage lokal viden og lokale data, da kalibrerings- og valideringsdata, jo mere man zoomer ind på et lokalt område, vil være utilstrækkelige. Modellen repræsenterer her et første udgangspunkt og grundlag, som er konsistent og ensartet qua den anvendte metodik og landsdækkende kalibrering og validering. Jo flere data der indberettes til Jupiter, desto bedre bliver grundlaget for vurdering af anvendelighed af modellen, og desto større værdi får de indsamlede data.

7. Referencer

- Anderson, M.P., Woessner, W. W. og Hunt, R.J. 2015.** *Applied Groundwater Modelling: Simulation of flow and advective transport*. Second Edition. s.l. : Elsevier, 2015. s. 535 pp.
- Black, DC, et al. 2011.** *Guidelines for water management modelling: Towards best practice model application*. Canberra : eWater Cooperative Research Centre, 2011.
- Gupta, H. V., et al. 2009.** Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*. 2009, s. 80-91.
- Henriksen, H. J., et al. 2020.** *Dokumentationsrapport vedr. modelleverancer til Hydrologisk Informations- og Prognosesystem (HIP4PLUS)*. Afdeling for Hydrologi, GEUS. 2020.
- Henriksen, HJ, et al. 2019.** *Beregning af udnyttelsesgrader, afsækning og vandløbspåvirkning med DK model 2019*. GEUS. s.l. : GEUS, 2019. GEUS rapport 2019/39.
- Højberg, A. L., et al. 2015.** *National kvælstofmodel - Oplandsmodel til belastning og virkemidler - Metode rapport*. 2015. ISBN 978-87-7871-418-3.
- Jacob, D., et al. 2014.** EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*. 2014, Årg. 14, s. 563-578.
- Koch, J., et al. 2019.** Modelling of the shallow water table at high spatial resolution using random forests. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2019, Årg. 23, s. 4603-4619.
- Langen, P. L., et al. 2020.** *Klimaatlas-rapport Danmark*. Danmarks Meteorologiske Institut. 2020.
- Pasten-Zapata, E., Sonnenborg, T. O. og Refsgaard, J. C. 2019.** Climate change: Sources of uncertainty in precipitation and temperature projections for Denmark. *GEUS Bulletin*. 2019, Årg. 43.
- Refsgaard, JC og Henriksen, HJ. 2004.** Modelling guidelines - terminology and guiding principles,. *Advances in Water Resources*. 2004, Årg. 27, s. 71-82.
- Stisen, S., et al. 2018.** *Modellering af terrænnært grundvand, vandstand i vandløb og vand på terræn for Storå og Odense Å. Slutrapport (FODS 6.1 Fasttrack metodeudvikling)*. GEUS. 2018.
- Stisen, S., et al. 2019.** *National Vandresource Model - Modelopstilling og kalibrering af DK-model 2019*. Afdeling for hydrologi, GEUS. 2019. GEUS rapport 2019/31.

Troldborg, L. 2020. *Afgrænsning af de danske grundvandsforekomster. Ny afgrænsning og delkarakterisering samt fagligt grundlag for udpegning af drikkevandsforekomster.* GEUS. København K : GEUS, 2020. GEUS rapport 2020/1.

Troldborg, L, et al. 2016. *National kvælstofmodel: Kvælstofpåvirkning af grundvandet.* København K : GEUS, 2016.