



Danmarks Meteorologiske Institut

Udviklingen i havis-forhold omkring Grønland

Vurdering af udviklingen frem til 2060

Rapport fra Nationalt Center for Klimaforskning, Danmarks Meteorologiske Institut
3. januar 2024



Kolofon

| | |
|------------------------------|---|
| Titel | Udviklingen i havis-forhold omkring Grønland |
| Undertitel | Vurdering af udviklingen frem til 2060 |
| Forfattere | Anette E. Dissing, Till S. Rasmussen, Jørgen Buus-Hinkler, Martin Olesen, Andrea M. U. Gierisch, Fredrik Boberg, Rasmus A. Pedersen |
| Ansvarlig institution | Danmarks Meteorologiske Institut, Nationalt Center for Klimaforskning |
| Sprog | Dansk |
| Versionsdato | 3. januar 2024 |
| Rapport nr. | dmi 23-19 |
| ISBN nr. | 978-87-7478-754-9 |
| ISSN nr. | 2445-9127 |
| Link til hjemmeside | www.dmi.dk , www.polarportal.dk |
| Copyright | Danmarks Meteorologiske Institut |



Indhold

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Resumé | 4 |
| 2 | Baggrund | 5 |
| 3 | Havisudbredelsen i dag | 6 |
| 3.1 | Havisudbredelse omkring Grønland..... | 6 |
| 3.2 | Isbjerge omkring Grønland..... | 10 |
| 4 | Forventet udvikling frem mod 2060 | 12 |
| 4.1 | Havisudbredelse (havisdække og haviskoncentration) | 13 |
| 4.1.1 | Maksimum havisudbredelse | 13 |
| 4.1.2 | Minimum havisudbredelse | 14 |
| 4.2 | Havistykkelser | 15 |
| 4.2.1 | Maksimum havisudbredelse | 16 |
| 4.2.2 | Minimum havisudbredelse | 17 |
| 4.3 | Diskussion | 19 |
| 5 | Sammenfatning og konklusioner | 20 |
| 6 | Referencer | 21 |
| 7 | Bilag | 22 |
| 7.1 | Bilag 1: Globale klimamodeller fra SMIP6 | 22 |
| 7.2 | Bilag 2: Havisdække og haviskoncentration (SSP245 og SSP585) | 23 |
| 7.3 | Bilag 3: Havis tykkere end 25 cm for SSP245 | 25 |
| 7.4 | Bilag 4: Havis tykkere end 50 cm for SSP245 | 27 |
| 7.5 | Bilag 5: Havis tykkere end 25 cm for SSP585 | 29 |
| 7.6 | Bilag 6: Havis tykkere end 50 cm for SSP585 | 31 |



1 Resumé

Denne rapport beskriver den forventede udvikling af havisdækket frem mod 2060 i grønlandske farvande på baggrund af observationer sammenholdt med projektioner fra klimamodeller for de kommende årtier.

Det forventes, at området nord for Grønland vil være et af de sidste områder med tilbageværende havis om sommeren. Om vinteren vil der fortsat være is i hele perioden frem mod 2060 og der må forventes istykkelser på mere end 50 cm nord for Grønland og langs størstedelen af de grønlandske kyster. Fremskrivninger med klimamodeller viser, at istykkelsen gradvist reduceres frem mod 2060 både i perioden med minimumudbredelse (september) og ved maksimumudbredelse (marts). Dette er tilfældet både ved et højt og et mellemhøjt udledningsscenario (hhv. SSP585 og SSP245). Reduktionen er dog mere markant for det høje udledningsscenario SSP585 end for det lavere SSP245-scenario. Et ensemble på 25 klimamodeller er benyttet til at give bedste bud på den fremtidige udvikling af istykkelser omkring Grønlands kyster. Om vinteren ændres havisens udbredelse ikke væsentligt, og isdækket af en tykkelse på mere end 50 cm vil stadig være udbredt, når vi nærmer os 2051-2060. Havisens udbredelse om sommeren reduceres fortsat fremover. I september ved minimumudbredelsen vil der, ifølge modellerne, ikke være meget havis at finde når vi nærmer os 2051-2060, og allerede i perioden 2031-2024 er der størst sandsynlighed for at finde havis i området nord for Grønland. Det er dog vigtigt at bemærke, at de konkrete istykkelses-estimer fra klimamodellerne er usikre i det fremtidige klima.

Selvom sommerens havisdække bliver reduceret markant, betyder det fortsatte vinterisdække, at skrninger og isrygge med markant højere istykkelse stadig kan forekomme gennem hele perioden. Disse er ikke repræsenteret i istykkelserne fra klimamodellerne. Isbjerge og –skosser vil fortsat udgøre en risiko i hele regionen, og vil forekomme så længe udløbsgletsjerne fra Indlandsisen er i kontakt med havet, hvilket forventes i hele perioden.

Med tilbagetrækningen af havisen må det forventes, at bølger ikke bliver dæmpet i samme grad som tidligere, og at de kommer til at spille en gradvist større rolle i forhold til navigation i de grønlandske farvande samt give risiko for øget kysterosion og potentielle konsekvenser for havne og kysnære anlæg.



2 Baggrund

Opgavebeskrivelse

DMI anmodes om at udarbejde en vurdering af udviklingen af havis-forholdene omkring Grønland på baggrund af eksisterende datamateriale.

Indhold:

- *En beskrivelse af nuværende havisudbredelse baseret på observations- og modeldata for de seneste 30 år omkring Grønland herunder også isbjerge.*
- *En vurdering af den gennemsnitlige havisudbredelse og -tykkelse omkring Grønland i 2031-2040, 2041-2050 og 2051-2060 for perioden med minimum- og maksimumudbredelse i et høj udledningsscenario (SSP585), herunder vurdering af:*
 - *om områderne omkring Grønlands kyster bliver helt eller delvis isfrie og hvornår?*
 - *om der vil være områder, som i de valgte perioder ikke vil blive isfrie og i givet fald hvilke, samt hvor stor vil is-tykkelsen være i disse områder.*
 - *om der fortsat vil være forekomster af isbjerge og is-skosser i områder som forventes isfrie i sommerperioden.*

Om DMI

På DMI betjener vi samfundet med meteorologisk viden og data inden for rigsfællesskabet Danmark, Færøerne og Grønland med omliggende farvande og luftrum. Opgaverne dækker vejr, klima og hav. De strækker sig fra at udsende vejrsigter og varsle om farligt vejr til at producere isinformation for Grønland og beregne klimaets udvikling på baggrund af forskellige udlednings-scenarier til brug for klimatilpasning i Danmark.

DMI er regeringens klimavidenskabelige rådgiver og vært for Nationalt Center for Klimaforskning, der skal understøtte en effektiv grøn omstilling og klimatilpasningsindsats i hele rigsfællesskabet og gøre Danmark internationalt førende inden for klimaforskning. Nationalt Center for Klimaforskning forsker i centrale områder inden for klimavidenskaben, samler viden og knytter klimaforskning i rigsfællesskabet sammen.



3 Havisudbredelsen i dag

På stor skala har havisens udbredelse og koncentration i Arktis været kortlagt kontinuerligt med satellitter siden 1979. Den primære datakilde er passive mikrobølgesensorer¹, der giver et dagligt opdateret billede af havisudbredelsen med en rumlig opløsning på adskillige kilometer. DMIs istjeneste har siden 1959 (grundet Hans Hedtofts forlis) kortlagt havisen i farvandede omkring Grønland, og har de sidste 20 år i gradvist større udstrækning kortlagt isudbredelsen på baggrund af data fra satellitbaseret radar² i højere opløsning (<150m) omkring Grønland. Iskortene, der præsenteres her, er traditionelt set manuelle analyser udarbejdet af iskortlæggere ved DMIs istjeneste på baggrund af satellitdata. For at udnytte den stadig stigende mængde satellitdata har DMI udviklet Machine Learning/AI metoder i projektet Automated Sea Ice Products (ASIP) til at foretage automatisk iskortlægning fremadrettet.

Den regionale variation omkring Grønland registreres måned for måned, baseret på ugentlige (2000-2009) og 14-dages (2010-2020) iskort fra DMI, hvilket er beskrevet i afsnit 3.1.

Forekomsten af isbjerge er beskrevet i afsnit 3.2.

3.1 Havisudbredelse omkring Grønland

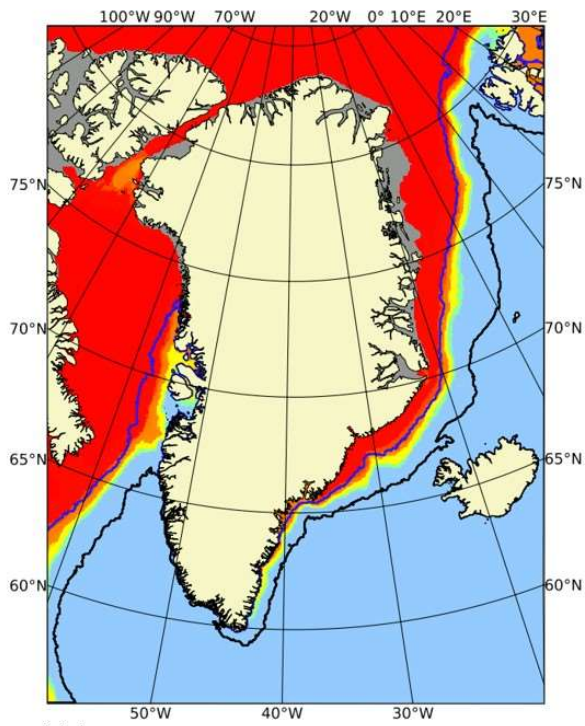
Figur 3-1 viser havisudbredelsen omkring Grønland og er baseret på iskoncentrationer fra DMI's ugentlige iskort (2000-2009) og 14-dages iskort (2010-2020), der dækker de grønlandske farvande. For at beregne den statistik, der ligger til grund for figuren, er iskortene blevet griddet i 5 km opløsning. De 12 kort viser medianen for haviskoncentration for hver enkelt måned omkring Grønland. Variabiliteten for de enkelte måneder er indikeret ved 5-percentilen og 95-percentilen for havisens udbredelse i perioden 2000-2020.

De største år-til-år variationer ses i perioderne lige før, under og lige efter havis-minimum, dvs. fra august til oktober. Særligt i Baffinbugten vest for Grønland ses markante variationer i havisudbredelsen.

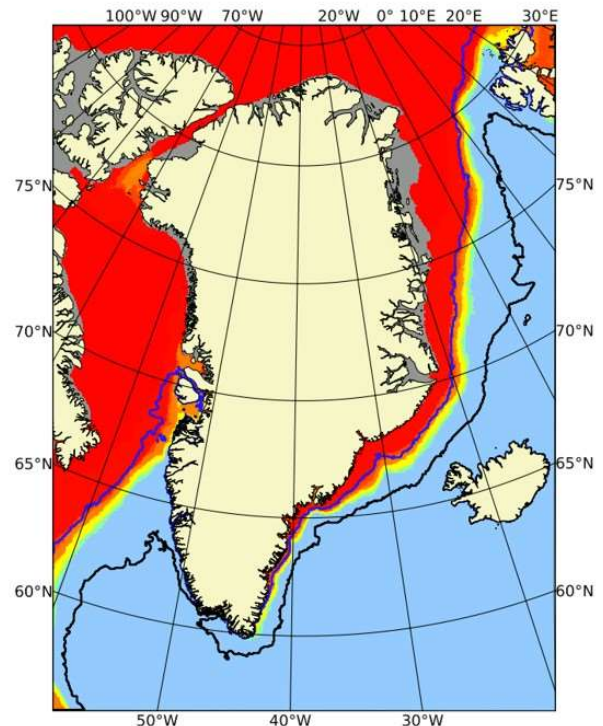
Havisen øst for Grønland adskiller sig imidlertid markant fra havisen vest for Grønland. Den Østgrønlandske havisstrøm "Storisen" består delvis af meter-tykkede flager af multiårs-is, der transporteres fra det Arktiske Ocean ned gennem Framstrædet og videre ned langs Østgrønland. Figur 3-1 viser, at storisen i år med stor isudbredelse stadig kan nå helt ned omkring Kap Farvel også i sommermånederne, hvilket kan være en udfordring for skibstrafikken. I et fremtidigt klima med mindre is forventes det, at dette bliver mindre hyppigt, se afsnit 4 om havisens udvikling frem mod år 2060.

¹ Eksempelvis SMMR, SSMI, AMSR-E og AMSR-2

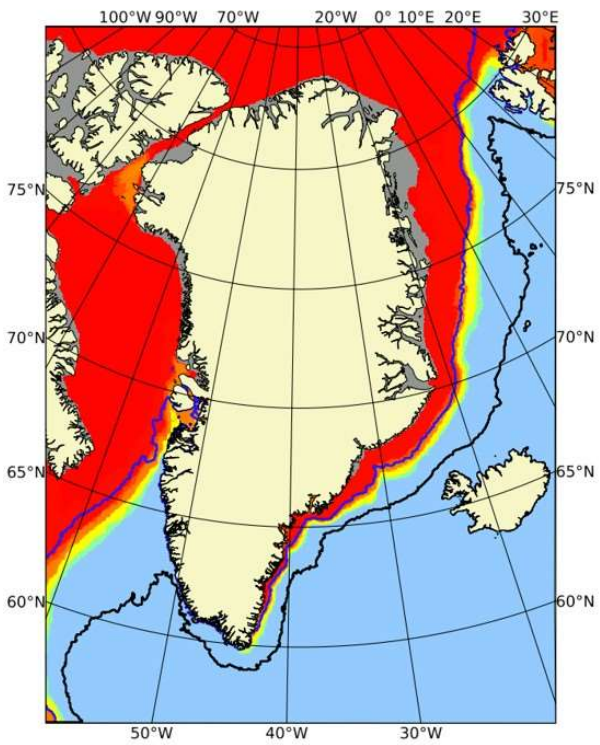
² Synthetic Aperture Radar (SAR) fra Radarsat-1, Radarsat-2, ENVISAT og Sentinel-1 A og B



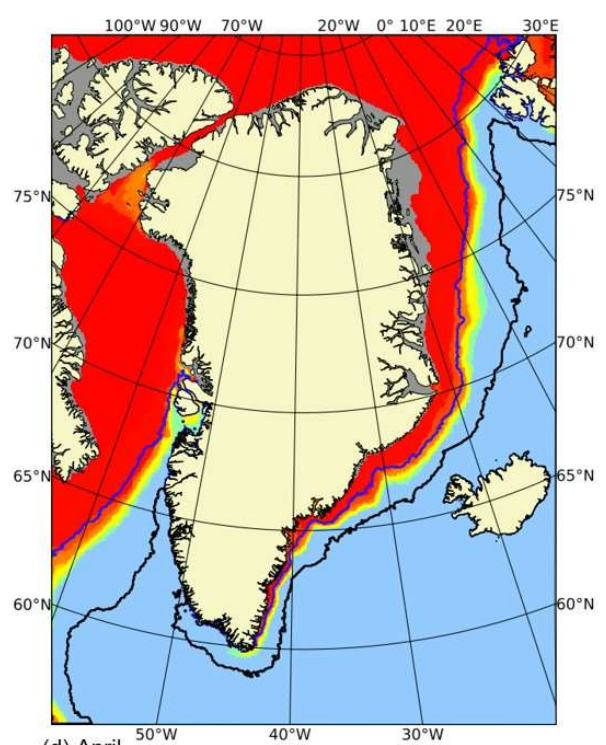
(a) Januar



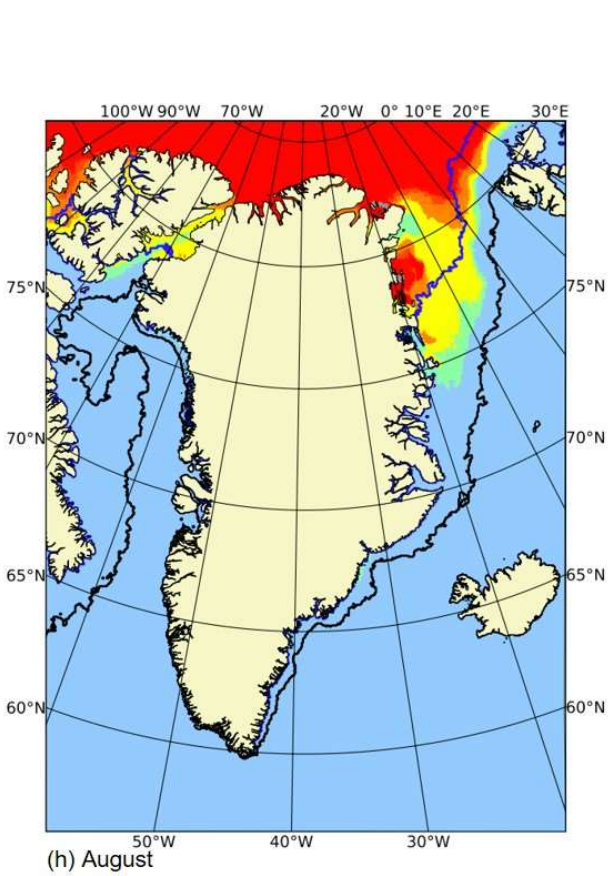
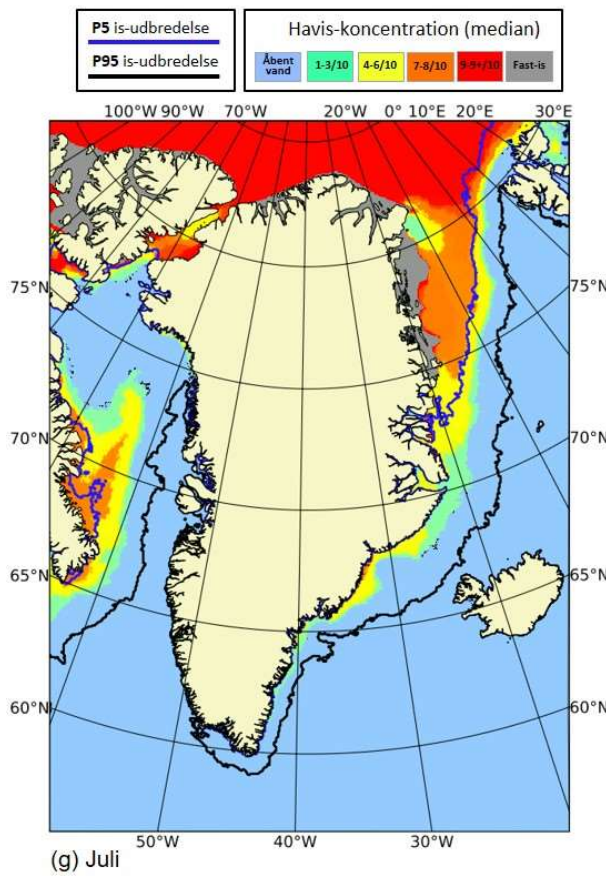
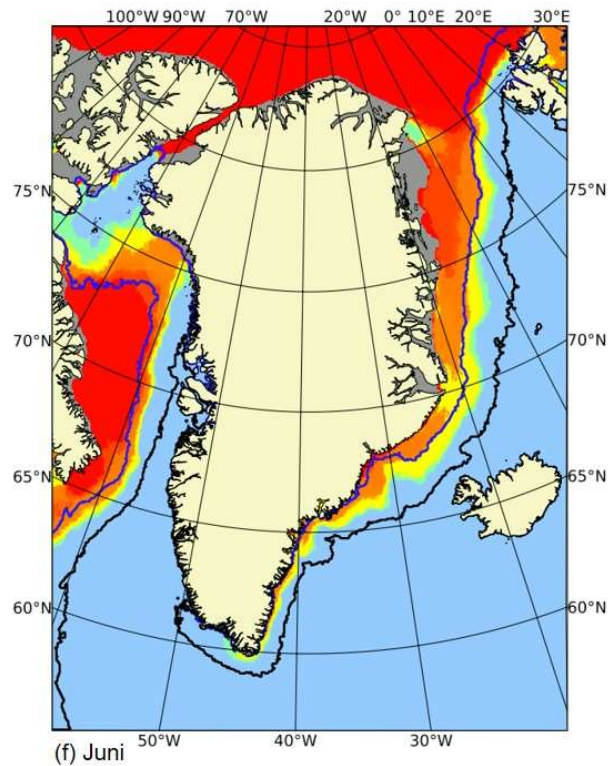
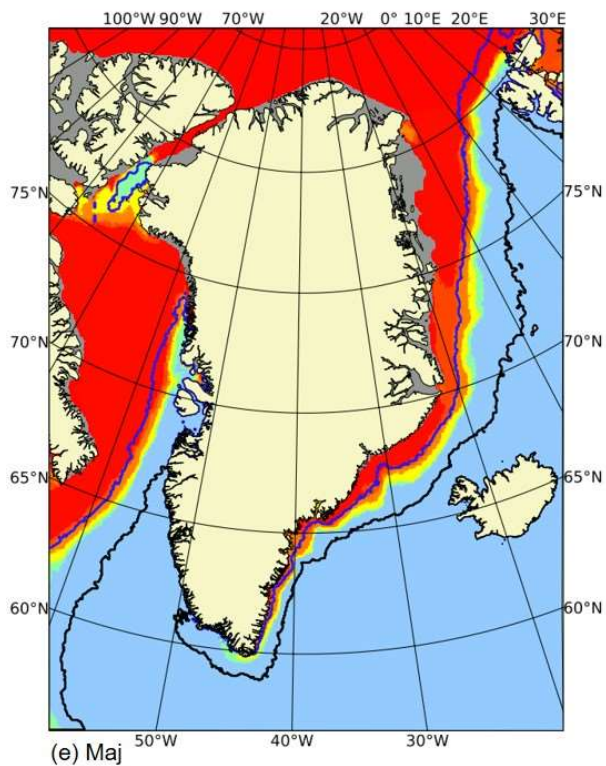
(b) Februar

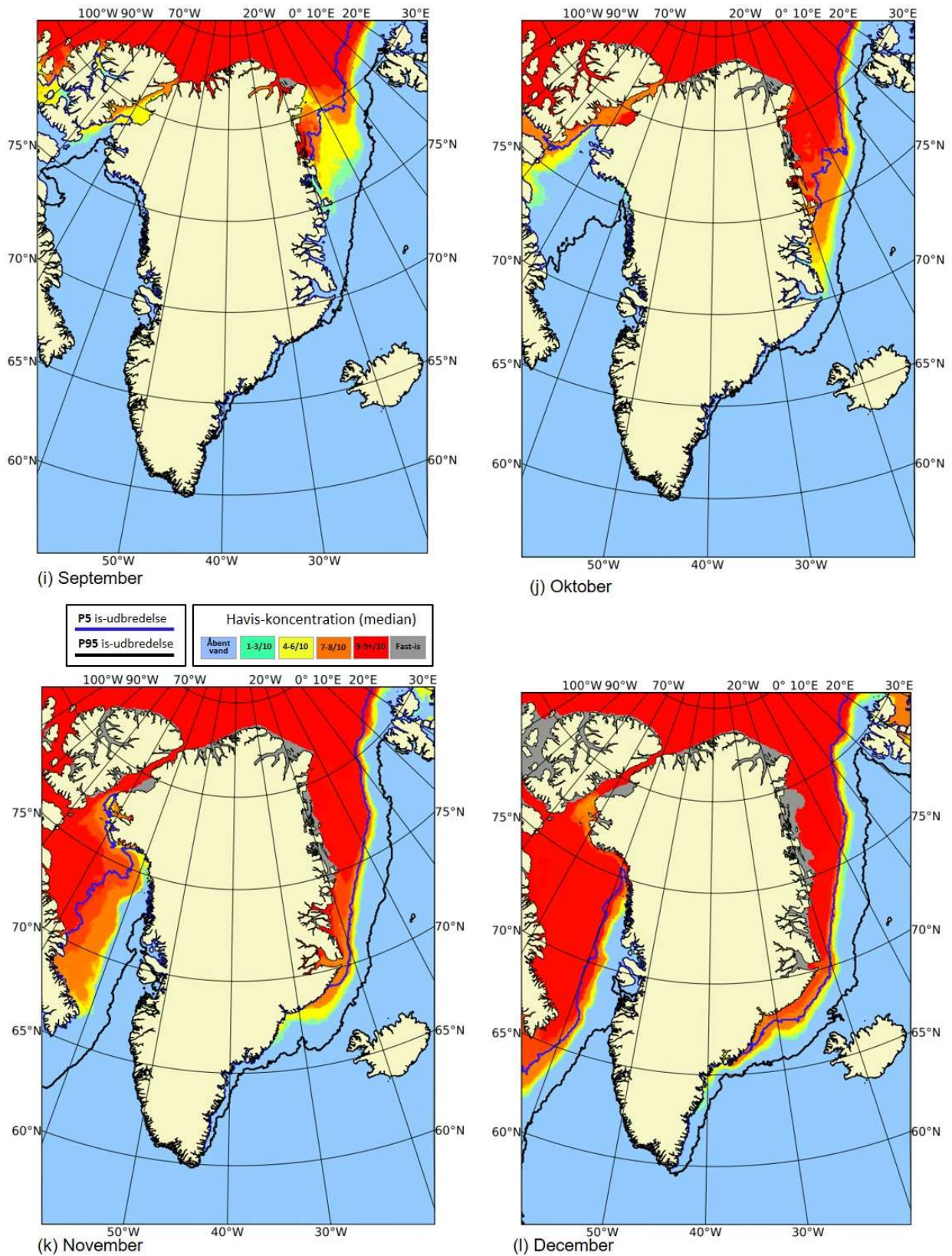


(c) Marts



(d) April





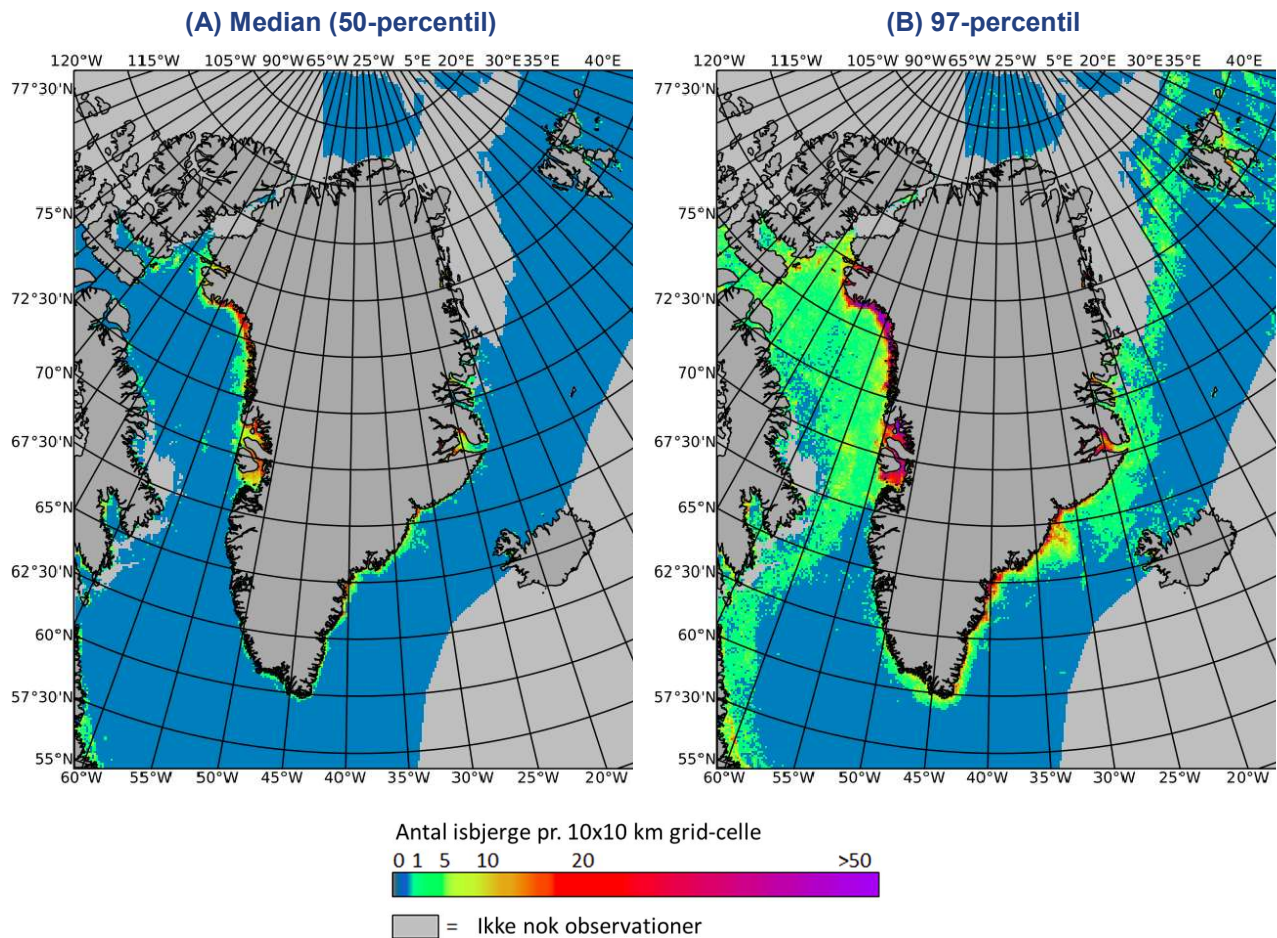
Figur 3-1 Månedsvariation af haviskoncentration og -udbredelse omkring Grønland, beregnet som median-værdier 2000-2020. Baseret på DMIs iskortlægning. År-til-år variationen er indikeret med 5-percentilen (blå linje, lav udbredelse) og 95-percentilen (sort linje, høj udbredelse) for havisudbredelsen.



3.2 Isbjerge omkring Grønland

DMI har udviklet og anvender programmer til automatisk detektering af isbjerge i radar-baserede satellitbilleder – såkaldt Synthetic Aperture Radar (SAR). Siden slutningen af 2014 har DMI modtaget store mængder SAR-billeder fra Copernicus programmets Sentinel-1A og B satellitter. I dag (og siden opsendelsen af sentinel-1B i 2016) modtager DMI dagligt op imod 100 Sentinel-1 billeder med en rumlig opløsning på 20-80 m. Hvert billede dækker fra 250 x 250 km til 400 x 400 km afhængig af satellittens optage-tilstand. Dette giver løbende dækning af farvandene omkring Grønland på 3-4 dage.

For at beregne statistik (rumligt og sæsonmæssigt) for isbjerge omkring Grønland er de isbjerge, der er detekteret i SAR-billederne (2017-2020) blevet optalt i 10 x 10 km felter. Hvert af kortene i Figur 3-2 er således inddelt i mere end 100.000 felter og viser hvor mange isbjerge, man kan forvente at observere under mere eller mindre ekstreme forhold. Figuren viser fordelingen af isbjerge under "normale" forhold (medianen) og "ekstreme" forhold (97-percentilen) i uge 28. I de grå områder er der ikke observationer nok til at udregne median- og percentil-værdier på det pågældende tidspunkt. F.eks. er havet nordøst for Grønland ikke isfrit i uge 28, og der detekteres ikke isbjerge inde i havisen, da dette er forbundet med stor usikkerhed. Tilsvarende kort for alle årets uger kan findes på: <http://ocean.dmi.dk/icebergatlas>.



Figur 3-2 Antal isbjerge omkring Grønland under (A) "normale" (median) og (B) ekstreme (97-percentil) forhold i uge 28 (midt juli) for 2017-2020. I de grå områder er der ikke tilstrækkeligt med observationer. Bemærk, at man i praksis ikke vil observere samme type (normale/ekstreme) omkring hele Grønland samtidigt. Hvis man "zoomer ind" får man dog et retvisende billede af de lokale forhold.

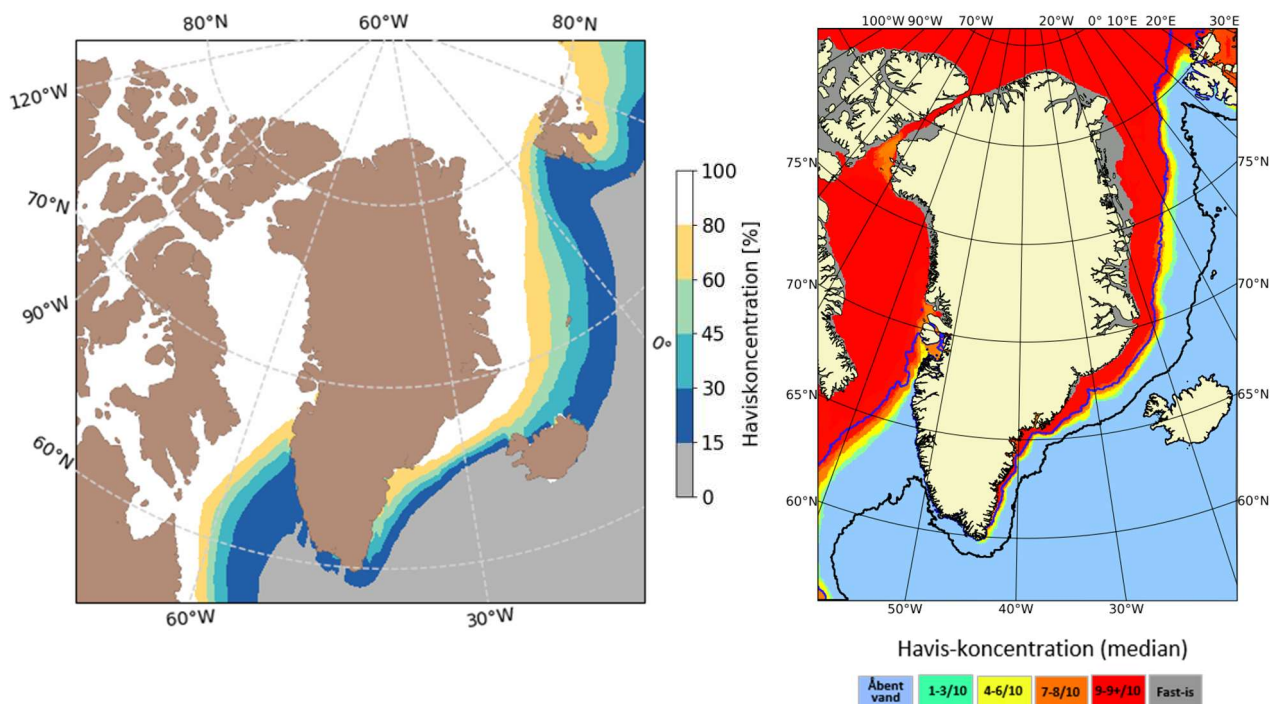
Figur 3-2 viser, at der under normale (og havis-frie) forhold forekommer isbjerge i så godt som alle kystnære områder omkring Grønland, og i store koncentrationer ved de store udløbsgletsjere især langs vestkysten fra Diskobugten (centrale Vestgrønland) til Qaanaaq/Thule i nord. Under mere ekstreme forhold kan man støde på isbjerge i så godt som hele Baffinbugten og langs store del af Grønlands kyst mere end 200 km væk fra kysten. Den sydvestlige kyststrækning er den kyststrækning med den mindste forekomst af isbjerge. Bemærk, at det er ikke muligt at detektere isbjerge i områder med havis.

Fremover forventes et stigende massetab fra Indlandsisen. Om dette vil føre til et stigende antal isbjerge (og hurtigere smeltning af isbjerge i havet) er et komplekst spørgsmål. Det skyldes, at massetabet både afhænger af balancen mellem afstrømning fra smeltning og kælving af isbjerge. Disse afhænger igen både af atmosfæriske og oceanografiske forhold: F.eks. har havtemperaturen i fjordene stor betydning for afsmeltning og kælving ved gletsjerfronterne. De eksisterende tidsserier af isbjergs-observationer er ikke lange nok til at identificere tendenser i egentlig isbjergsklimatologi, men den fortsatte satellitovervågning vil sandsynligvis begynde at give et fingerpeg inden for en kort årrække. Dog kan et øget massetab fra Indlandsisen føre til ændringer i den eksisterende forekomst af isbjerge omkring Grønland. Pt. er vi dog ikke i stand til at belyse de konkrete ændringer fyldestgørende.

4 Forventet udvikling frem mod 2060

DMI's vurdering af den fremtidige udvikling af isdække og -tykkelse omkring Grønland er foretaget på baggrund af et ensemble af globale klimamodeller og tager udgangspunkt i to forskellige udledningsscenarioer: SSP245 og SSP585. SSP585 er et højt udledningsscenarie med fortsat stigende globale udledninger af drivhusgasser, mens SSP245 er et mellemhøjt scenarie, hvor udledningerne stabiliseres³, og som svarer omtrent til at de nuværende, globale klimapolitikker implementeres. Modelensemblet består af 25 klimamodeller fra den nyeste generation kaldet CMIP6 (Eyring et al. 2016), der danner grundlaget for FNs klimarapporter. Listen over de anvendte modeller kan findes i Bilag 1: Globale klimamodeller fra CMIP6. Modelfremskrivningerne er her vist i tre årtier frem (2031-2040, 2041-2050 og 2051-2060) for at vise den gradvise fremtidige udvikling.

Modelensemblet viser generelt for meget havis ifht observerede haviskoncentrationer. I Figur 4-1 sammenlignes en kørsel af modelensemblet med observationer i ca. samme periode. Det ses tydeligt at gennemsnittet af modelensemblet har for meget havis både vest men særligt øst for Grønland. I området omkring Danmarksstrædet (ml. Grønland og Island) er haviskoncentrationen ml. 15-45 % helt frem til og omkring det nordlige Island ifølge modelkørslen. I observationerne er selv 95-percentilen (for høj udbredelse af havis) langt fra Island.



Figur 4-1 Gennemsnitlig haviskoncentration for modelensemblet (venstre) for det høje SSP585 scenarie i marts kørt for perioden 2015-2020. Hvid indikerer 80-100 % haviskoncentration og grå indikerer "åbent vand". Observeret månedsvariation for marts af haviskoncentration (højre), beregnet som median-værdier 2000-2020. År-til-år variationen er indikeret med 5-percentilen (blå linje, lav udbredelse) og 95-percentilen (sort linje, høj udbredelse) for havisudbredelsen. Kilde: DMI og CMIP6.

³ SSP-scenarierne er grundlaget for beregningerne i rapporterne fra FNs klimapanel IPCC. De afløser de såkaldte RCP-scenarier fra de tidligere hovedrapporter. SSP585 er sammenligneligt med det tidligere RCP85, mens SSP245 er sammenligneligt med RCP45. Uddybende information kan findes i artiklen O'Neill et al. 2016: <https://gmd.copernicus.org/articles/9/3461/2016/gmd-9-3461-2016.pdf>



4.1 Havisudbredelse (havisdække og haviskoncentration)

Det følgende afsnit vil præsentere sandsynligheden for havisdække og haviskoncentration. Udbredelsen af havisen vises for modelensemblet som månedsgennemsnit for de to måneder med hhv. maksimum- (marts) og minimumudbredelsen (september).

I arbejdet med at vise sandsynligheden for havisdække og haviskoncentrationen er der beregnet gennemsnit af model-ensemblet i tre årtier frem (2031-2040, 2041-2050 og 2051-2060) for begge udledningsscenarier SSP245 og SSP585. Valget af 10-års perioder gør det muligt at vurdere den gradvise ændring i haviskoncentration og –udbredelse fra klimamodellerne. Det er dog vigtigt at bemærke at klimatiske forhold normalt beskrives ved 30-års gennemsnit for at undgå effekten af naturlige variationer i vejret. Bemærk at figurerne her i Kapitel 4.1 viser havisforholdene i 2031-2040 og 2051-2060 i det høje udledningsscenarie for at indikere hvor store ændringer, der kan forekomme hvis drivhusgasudledningen ikke begrænses i overensstemmelse med de nuværende politiske ambitioner. Tilsvarende figurer for begge udledningsscenarier kan findes i Bilag 1-6.

Sandsynligheden for havisdække

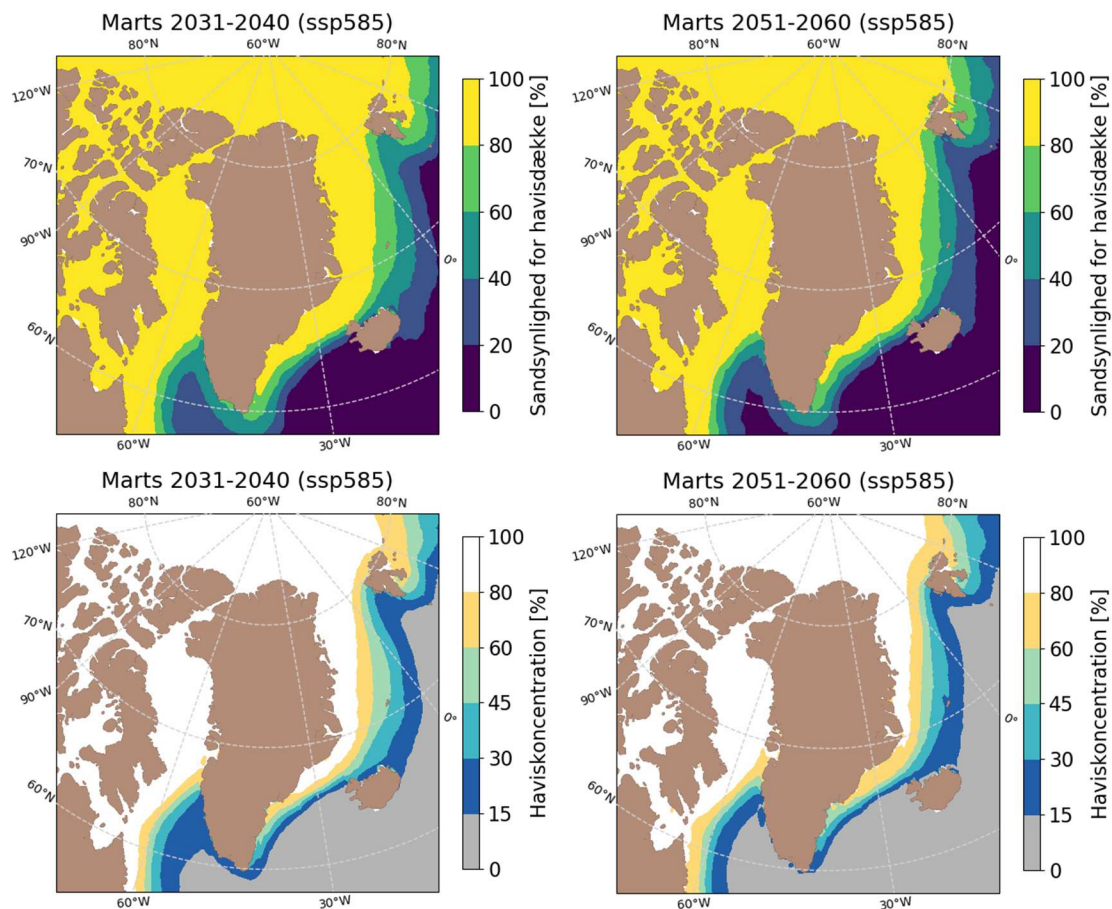
Sandsynligheden for havisdække er angivet som en såkaldt modelsandsynlighed for havisudbredelsen vurderet på tværs af model-ensemblet. Havis er her defineret ved forekomsten af *mere* end 15 % havis (og dermed er mindre end 85% åbent vand) i et givent område. Det betyder, at hvis *alle* modellerne i ensemblet har minimum 15 % havis i et givent område vil modelsandsynligheden vises som 80-100 % i plottet.

Haviskoncentration

Havis-koncentrationen er beregnet som et gennemsnit af outputtet fra model-ensemblet, så koncentrationen af havis i de enkelte modeller kommer til udtryk i figuren. Det betyder at en høj koncentration i en enkelt model trækker gennemsnittet af koncentrationer fra alle modellerne op i et givent område. Der vises altså i figurerne et gennemsnit af haviskoncentrationen i et givet område. 80-100 % haviskoncentration betyder at området i gennemsnit er helt (80-100%) dækket af havis. 0-15% haviskoncentration betyder (ifølge modellerne) at der i gennemsnit er åbent vand i området. Den gennemsnitlige haviskoncentration er dog et udtryk for det samlede bedste bud på de klimatiske forhold, men kan *ikke* tolkes direkte som et bud på den haviskoncentration, der skal navigeres efter i området.

4.1.1 Maksimum havisudbredelse

Figur 4-1 viser sandsynligheden for havisdække og haviskoncentrationen ved maksimumudbredelsen af havis i marts for det høje udledningsscenarie (SSP585) i årtierne 2031-2040 og 2051-2060. Ved maksimumudbredelsen af havis i marts er der ifølge klimamodellerne kun mindre ændringer fra årti til årti og forskellene mellem de to udledningsscenarier er i øvrigt meget små.



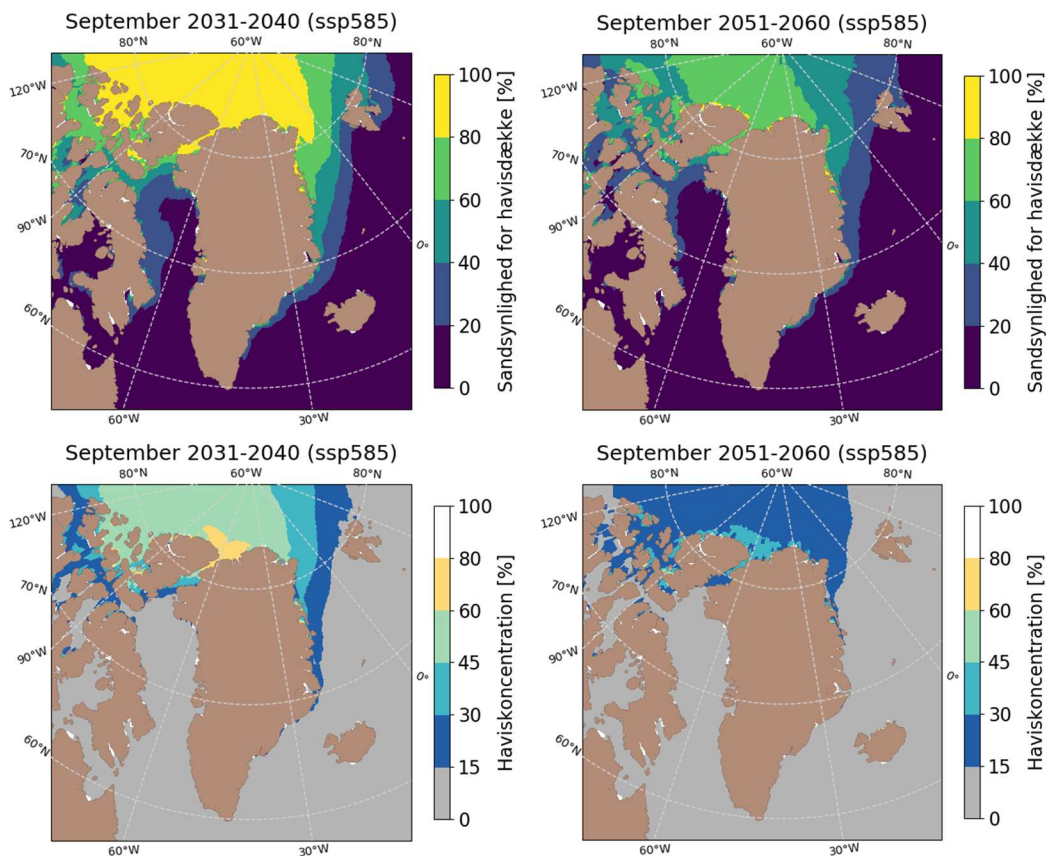
Figur 4-1 Sandsynlighed for havisdække (øverste række) og gennemsnitlig haviskoncentration (nederst) for det høje SSP585 scenarie i marts. Havisens udbredelse i øverste række er defineret ved forekomsten af mere end 15% havis. Første og anden kolonne viser værdier for hhv. 2031-2040 og 2051-2060. Kilde: DMI og CMIP6.

Der ses af de øverste plots i Figur 4-1 at modelsandsynligheden for mere end 15 % havisdække i et givent område omkring Grønlands kyster i marts for både 2031-2040 og 2051-2060 er meget stor. Det er kun den sydlige spids af Grønland hvor en mindre del (40-60 %) af modellerne indikerer mere end 15 % havisdække. Ændringerne i modelsandsynligheden af havisdække fra 2031-2040 og 2051-2060 er relativt små.

Haviskoncentrationen på de nederste plots i Figur 4-1 viser ml 80-100% for største delen af Grønlands nordlige kyster. Kun den sydlige del af Grønland har en mindre haviskoncentration end 45%. Generelt er haviskoncentrationen aftagende i den sydlige del af Grønlands kyststrækninger. De største ændringer fra 2031-2040 og 2051-2060 er at modellerne viser ml 0-15 % haviskoncentration i 2051-2060 og indikerer i princippet åbent hav for den sydvestlige kyst.

4.1.2 Minimum havisudbredelse

Figur 4-2 viser sandsynligheden for havisudbredelse ved minimum havisudbredelse i september for det høje SSP585 udledningsscenario i årtierne 2031-2040 og 2051-2060.



Figur 4-2 Sandsynlighed for havisdække (øverste række) og gennemsnitlig haviskoncentration (nederst) for det høje SSP585 scenarie i september. Havens udbredelse i øverste række er defineret ved forekomsten af mere end 15% havis. Første og anden kolonne viser værdier for hhv. 2031-2040 og 2051-2060. Kilde: DMI og CMIP6.

Som i Figur 4-1 er de overordnede indikationer at modelsandsynligheden for havisdække i september i Figur 4-2 relativt lav omkring størstedelen af Grønlands kyster for både 2031-2040 og 2051-2060. Den største forskel er, ligesom for det mellemhøje scenarie (se i Bilag), i det nordligste. Her er forskellen mellem de to årtier dog mere udtalt for det høje scenarie som det også fremgår af Figur 4-2.

Haviskoncentrationen i de nederste plots i Figur 4-2 indikerer noget nær isfrit (0-15%) langs den sydlige og vestlige del af de Grønlandske kyster, som i Figur 4-1. Dertil skal det igen bemærkes, at der i udgangspunktet er for meget havis i modellerne. De største ændringer fra 2031-2040 til 2051-2060 er en signifikant mindre haviskoncentration langs den nordvestlige del af Grønlands kyst. Og langs den nordlige kyst er forskellen ml. de to årtier (fra ml. 45-80% i 2031-2040 til omkring 15-30% i 2051-2060).

4.2 Havistykkelser

Det følgende afsnit vil præsentere den forventede havisudbredelse fordelt på forskellige istykkelser af mere end 25 cm og mere end 50 cm. Der er ved beregning af istykkelser også stor forskel mellem klimamodellerne, ligesom det er vigtigt at bemærke at de globale modellers grove detaljegrad ikke viser en korrekt variation lokale havistykkelser. Udbredelsen af havis med forskellige tykkelser vises som månedsgennemsnit for maksimum- (marts) og minimumudbredelsen (september) af havis for hele modelensemblet.

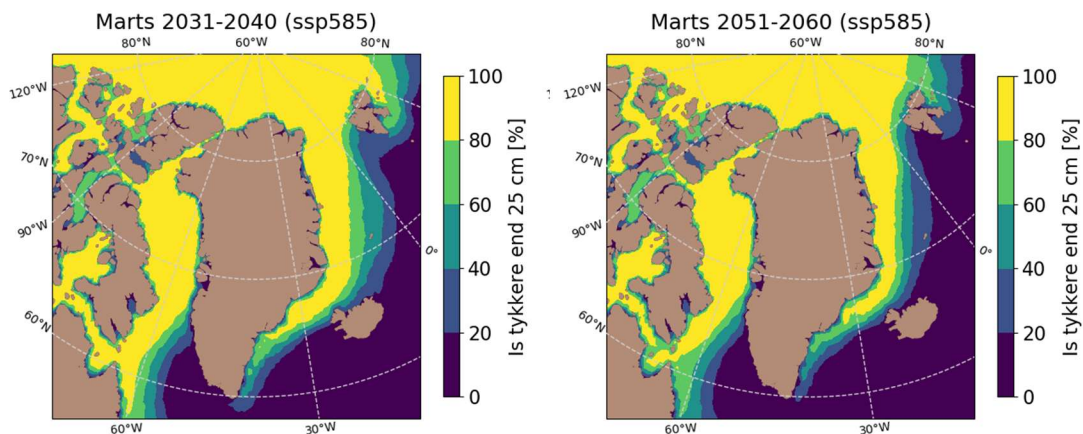
I arbejdet med at vise sandsynligheden for havistykkelserne er der ligesom arbejdet præsenteret i Kapitel 4.1 foretaget kørsler af model-ensemblet i tre årtier frem (2031-2040, 2041-2050 og 2051-2060) for udledningsscenarierne SSP245 og SSP585. Valget af 10-års perioder gør det muligt at vurdere ændringen i havistykkelser i årtier. I dette afsnit fremhæves havistykkelser i årtierne 2031-2040 og 2051-2060 for det høje SSP585 udledningsscenarie. Bemærk at figurerne her i Kapitel 4.1 viser havisforholdene i 2031-2040 og 2051-2060 i det høje udledningsscenarie for at indikere hvor store ændringer, der kan forekomme hvis drivhusgasudledningen ikke begrænses i overensstemmelse med de nuværende politiske ambitioner. Tilsvarende figurer for begge udledningsscenarier kan findes i Bilag 1-6.

Sandsynligheden for forekomsten af havis med en given istykkelse er også her beskrevet ved en modelsandsynlighed. Det vil sige, at det der vises i Figur 4-3 til Figur 4-6 er procentdelen af klimamodellerne i model-ensemblet, der fremskriver en istykkelse på mere end hhv. 25 cm og 50 cm. Et tænkt eksempel kunne være, at 7 ud af 25 modeller viser mere end 50 cm istykkelse i marts måned som gennemsnit i løbet af perioden 2031-2040 ud for Danmarkshavn (lille vejrstation ved Grønlands nordøstlige kyst) for SSP585-scenariet. Det svarer til 28% af modellerne. Sandsynligheden for mere end 50 cm havis ville således kunne aflæses til 20% - 40% på den pågældende figur.

Tæt langs de grønlandske kyster forekommer havisen tyndere end længere fra kysten. Dette skyldes alene de globale klimamodellers lave rummelige opløsning, og dermed mindre præcise repræsentation af kystlinjen.

4.2.1 Maksimum havisudbredelse

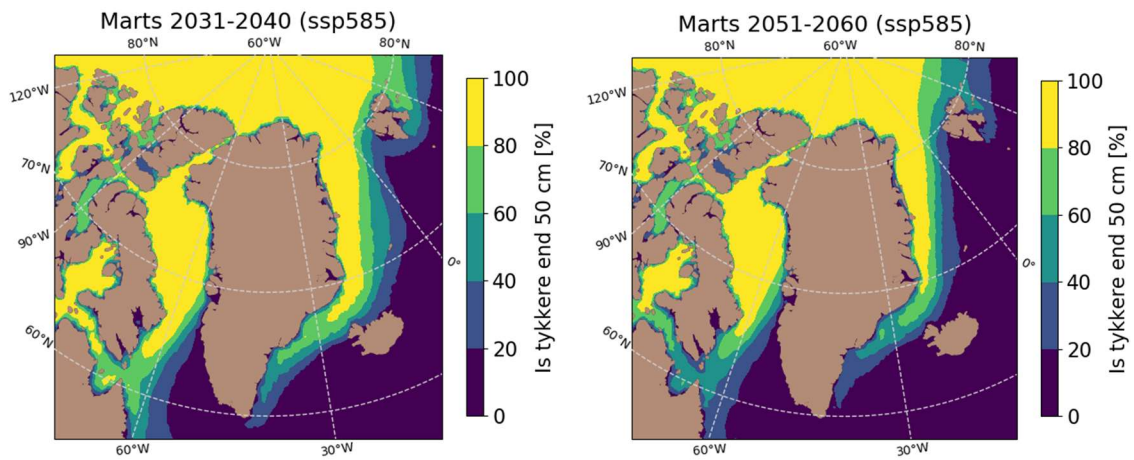
Herunder, i Figur 4-3, præsenteres sandsynligheden for havis omkring maksimumudbredelsen (marts) af en istykkelse på mere end 25 cm. Det vises for de årtierne 2031-2040 og 2051-2060.



Figur 4-3 Sandsynlighed for havis i marts måned omkring maksimumudbredelsen for det høje SSP585 scenarie af mere end 25 cm. Første og andet billede viser modelsandsynligheden for hhv. 2031-2040 og 2051-2060. Kilde: DMI og CMIP6.

I Figur 4-3 fremgår modelsandsynligheden for en istykkelse på mere end 25 cm relativt høj (ml 80-100 %) i marts omkring størstedelen af Grønlands kyster for både 2031-2040 og 2051-2060. Det er kun det sydlige Grønland hvor en mindre andel af modellerne indikerer mere end 25 cm havistykkelse. Ændringerne fra 2031-2040 og 2051-2060 er meget små, og mest synlige omkring den sydøstlige kyst.

Herunder, i Figur 4-4, præsenteres sandsynligheden for havis i marts måned omkring maksimumudbredelsen af en istykkelse på mere end 50 cm. Det vises for årtierne 2031-2040 og 2051-2060.

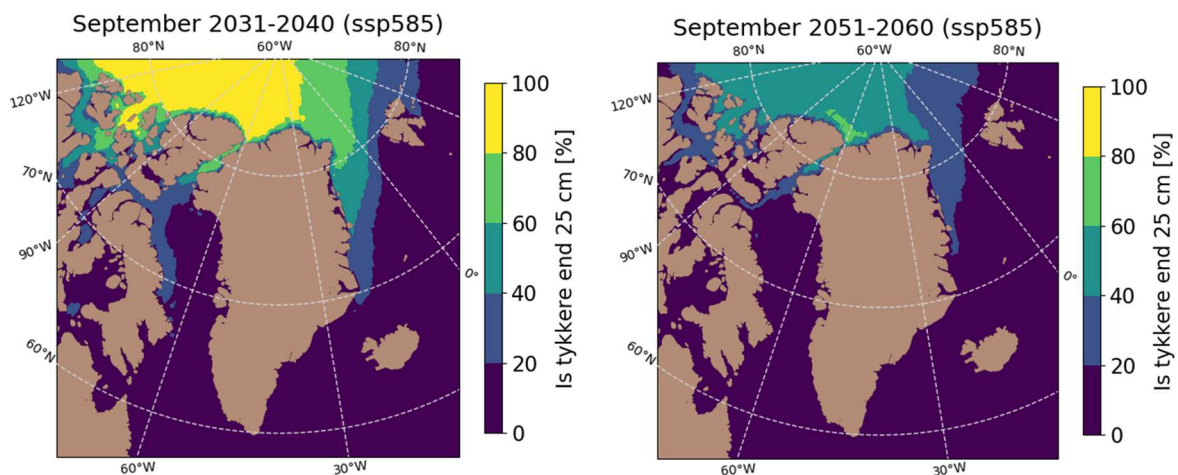


Figur 4-4 Sandsynlighed for havis i marts måned omkring maksimumdbredelsen for det høje SSP585 scenarie af mere end 50 cm. Første og andet billede viser modelsandsynligheden for hhv. 2031-2040 og 2051-2060. Kilde: DMI og CMIP6.

I Figur 4-4 fremgår modelsandsynligheden for en istykkelse på mere end 50 cm ligeledes høj (ml 80-100 %) omkring halvdelen af Grønlands nordlige kyster for både 2031-2040 og 2051-2060. I det sydlige Grønland indikerer en mindre andel af modellerne mere end 50 cm havistykkelse. Ændringerne fra 2031-2040 til 2051-2060 er som for den halve istykkelse meget små, og mest synlige omkring den sydøstlige kyst.

4.2.2 Minimum havisudbredelse

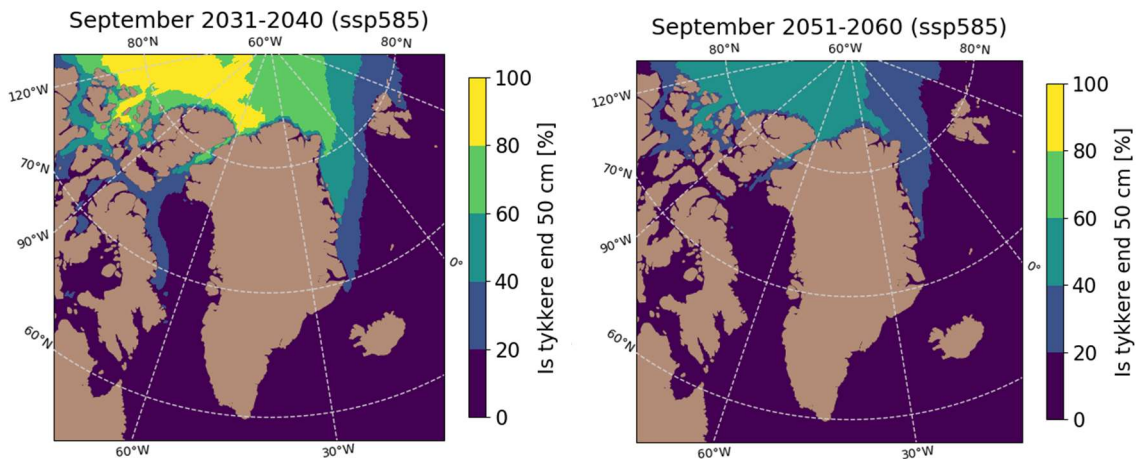
Herunder, i Figur 4-5, præsenteres sandsynligheden for havis i september måned omkring minimumdbredelsen af en istykkelse på mere end 25 cm. Det vises for årtierne 2031-2040 og 2051-2060.



Figur 4-5 Sandsynlighed for havis i september måned omkring minimumdbredelsen for det høje SSP585 scenarie af mere end 25 cm. Første og andet billede viser modelsandsynligheden for hhv. 2031-2040 og 2051-2060. Kilde: DMI og CMIP6.

I Figur 4-5 fremgår modelsandsynligheden for en istykkelse på mere end 25 cm lav (ml 0-40 %) i september omkring størstedelen af Grønlands kyster for både 2031-2040 og 2051-2060. Det er kun i det nordlige Grønland hvor omkring 60-100 % af modellerne indikerer mere end 25 cm havistykkelse i 2031-2040 og omkring 40-60% af modellerne i 2051-2060. Ændringerne i modelsandsynligheden for havistykkelse på mere end 25 cm fra 2031-2040 til 2051-2060 er forholdsvis store langs Grønlands nordlige kyststrækning.

Herunder, i Figur 4-6 præsenteres sandsynligheden for havis i september måned omkring minimumudbredelsen af en istykkelse på mere end 50 cm. Det vises for årtierne 2031-2040 og 2051-2060.



Figur 4-6 Sandsynlighed for havis i september måned omkring minimumudbredelsen for det høje SSP585 scenarie af mere end 50 cm. Første og andet billede viser modelsandsynligheden for hhv. 2031-2040 og 2051-2060. Kilde: DMI og CMIP6.

I Figur 4-6 fremgår modelsandsynligheden for en istykkelse på mere end 50 cm ligeledes lav omkring størstedelen af Grønlands kyster for både 2031-2040 og 2051-2060. Det er kun i det nordlige Grønland hvor omkring 60-100 % af modellerne indikerer mere end 50 cm havistykkelse i 2031-2040 og omkring 40-60% af modellerne i 2051-2060. Ændringerne i modelsandsynligheden for havistykkelse på mere end 50 cm fra 2031-2040 til 2051-2060 er også størst i det nordlige.

Figurene Figur 4-3 til Figur 4-6 viser, at istykkelsen reduceres gradvist over årtierne i både minimumudbredelsesperioden (september) og maksimumudbredelse (marts) i det høje SSP585 udledningsscenarie. Det skal bemærkes, at istykkelsen reduceres hurtigere for det høje udledningsscenarie SSP585 end det gør for det mellemhøje SSP245 scenarie som ses i Bilag.

Figurene viser, at der stadig er høj sandsynlighed for vinter-havis med en tykkelse af mere en 50 cm, der dækker det meste af Grønlands kyster. For sommer-havis er der en markant mindre sandsynlighed for havis af både 25 og 50 cm tykkelse omkring Grønlands kyster. Sandsynligheden for sommer-havis reduceres yderligere frem mod perioden 2051-2060.



4.3 Diskussion

Et vigtigt forbehold i denne vurdering af fremtidige istykkelser omkring Grønland er, at resultaterne er baseret på et ensemble af 25 globale klimamodeller. De globale klimamodeller er ikke perfekte, særligt ikke til at beskrive mere detaljerede lokale forhold, og ikke alle 25 modeller er lige præcise i beskrivelsen af det aktuelle isdække omkring Grønland. Når man som her betragter ændringerne i den nærmeste fremtid, har det naturligvis en stor indflydelse hvis modellerne som udgangspunkt har for meget eller for lidt is under nuværende forhold. Dette er også forsøgt illustreret i Kapitel 4 hvor vi sammenligner haviskoncentrationen fra modelkørslen med observationsdata i en sammenlignelig periode. Gennemsnittet af modelensemblet har generelt for meget is i området, dvs. at de er *biased* i forhold til det aktuelle klima (Wei et al. 2020). Det er af den årsag svært at konkludere meget præcist på den konkrete udvikling af havis i forskellige dele af farvandet omkring Grønland. At der under nutidige forhold er for meget havis i modellerne kan indikere at beregningerne har for lidt afsmeltning frem til i dag, hvilket også kunne gøre sig gældende fremover. Årsagerne til modellernes bias er dog ikke klarlagt, og dermed er det svært at spekulere i præcis, hvordan det kan påvirke den fremtidige udvikling. Det understreger, at der også i den nærmeste fremtid er en mærkbar usikkerhed på de konkrete estimater af havisens udvikling.

At vise udviklingen i havisudbredelse og havistykkelse alene ud fra modelsandsynligheden er forbundet med stor usikkerhed. I en mere omfattende analyse kunne den usikkerhed reduceres, f.eks. ved at 'bias-korrigerer' modellernes resultater med nutidens observerede havisudbredelse. I analysen til rapporten er der valgt at vise 10-års gennemsnit for at tydeliggøre den gradvise udviklingen gennem perioden. Klimatiske forhold beskrives normalt ved 30-års gennemsnit; de kortere perioder der præsenteres i rapporten her, er derfor forbundet med en større usikkerhed, da gennemsnittet kan være påvirket af tilfældige og naturlige variationer i vejret. Det betyder, at de relativt store naturlige og tilfældige år-til-år variationer i isdække og -tykkelse kan have forholdsvis stor indflydelse på de viste værdier. Det kan også være et resultat af forskelle mellem modellernes fordeling af forskellige istyper henover året. Modellerne har forskellige detaljegrader i beregningen af fordelingen af isflager med forskellige tykkelser; afhængig af disse beregninger kan resultatet også afhænge af, om den tilbageværende is primært er tykkere is eller en kombination af isflager i forskellige stadier. Samlet set er konklusionen dog klar: Den tykkeste is reduceres drastisk med årene og særligt i det høje udledningsscenarie. Området umiddelbart nord for Grønland er det sted, hvor den tykkeste havis typisk vil findes, og der hvor den tykkere havis vil forekomme længst tid fremover.

Det skal også understreges, at selv med en (ifølge klimamodellerne) meget lille sandsynlighed for isdække, vil der fortsat være store udsving fra år til år. Sandsynlighederne vi illustrerer igennem rapporten repræsenterer gennemsnitlige forhold, og de årlige variation i vejret vil give en større variation end gennemsnittene indikerer. Den årlige variation fremgår f.eks. af 5- og 95 percentilerne i observerede haviskoncentrationer i figur 3.1. Selvom Grønland i fremtiden samlet set oplever en mindre udbredelse af tyk havis vil der nogle år være større mængder havis, der overlever sommerens afsmeltning, og der vil derfor være mere udbredte områder med tykkere is. Sandsynligheden for et tykt isdække bliver blot mindre og mindre frem mod 2060.



5 Sammenfatning og konklusioner

Observationer fra 2000-2020 viser, at i år med stor isudbredelse kan Storisen øst for Grønland stadig nå ned omkring Kap Farvel, også i sommermånederne.

De konkrete estimater fra et ensemble af klimamodeller viser, at havistykkelsen både om sommeren og vinteren gradvist vil reduceres frem mod 2060 for både SSP245 og SSP585. Dog mere markant for det høje udledningsscenario SSP585 end for det lavere SSP245 scenario. Ved maksimumudbredelsen (marts) vil havis tykkere end 50 cm stadig dække de Grønlandske kyster, når vi nærmer os 2051-2060. Ved minimumudbredelsen (september) vil der dog, ifølge modellerne, ikke være meget havis at finde når vi nærmer os 2051-2060, og allerede i perioden 2031-2024 er der størst sandsynlighed for at finde havis i langs Grønlands nordlige kyster.

Fremtidsprojektionerne er som beskrevet i Kapitel 4 beregnet som gennemsnit over 10-årsperioder, hvorved eventuelle markante år-til-år-variationer i is-tykkelse reduceres kraftigt. Det er derfor vigtigt at understrege, at der fortsat kan forventes markante regionale variationer i istykkelse fra år til år.

Derudover er det vigtigt at bemærke, at de konkrete istykkelses-estimater fra klimamodellerne er usikre i det fremtidige klima. Selvom sommerens havisdække bliver reduceret markant, betyder det fortsatte vinterisdække, at skruninger og isrygge med markant højere istykkelse stadig kan forekomme gennem hele perioden. I vurderingen af udviklingen i havis indgår der ikke vurdering af risikoen isbjerge. Det betyder at i områder hvor modelensemblet indikerer havis-frit, kan der stadig forekomme isbjerge og -skosser. Isbjerge og -skosser vil fortsat udgøre en risiko i hele regionen, og vil forekomme så længe udløbsgletsjerne fra Indlandsisen er i kontakt med havet, hvilket forventes i hele perioden. Der er pt. ikke datagrundlag til at vurdere den tidlige udvikling. Med tilbagetrækningen af isen må det forventes, at bølger på havet ikke bliver dæmpet i samme grad som tidligere og at de kommer til at spille en gradvist større rolle i forhold til navigation i de grønlandske farvande samt give risiko for øget kysterosion samt potentielle konsekvenser for havne og kysnære anlæg. Konkrete effekter mv. er dog ikke kortlagt endnu og kan kræve yderligere analyse.



6 Referencer

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J. and Taylor, K.E., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), pp.1937-1958.

Wei, T., Yan, Q., Qi, W., Ding, M. and Wang, C., 2020. Projections of Arctic sea ice conditions and shipping routes in the twenty-first century using CMIP6 forcing scenarios. *Environmental Research Letters*, 15(10), p.104079.



7 Bilag

7.1 Bilag 1: Globale klimamodeller fra CMIP6

Globale klimamodeller fra CMIP6 anvendt i denne analyse:

Data for istykkelse:

ACCESS-CM2
ACCESS-ESM1-5
CESM2-WACCM
CMCC-CM2-SR5
CMCC-ESM2
EC-Earth3-CC
EC-Earth
EC-Earth3-Veg-LR
EC-Earth3-Veg
IPSL-CM6A-LR
GFDL-CM4
GFDL-ESM4
KACE-1-0-G
MIROC6
MPI-ESM1-2-HR
MPI-ESM1-2-LR
MRI-ESM2-0
NESM3
NorESM2-LM
NorESM2-MM

Added in VER4:

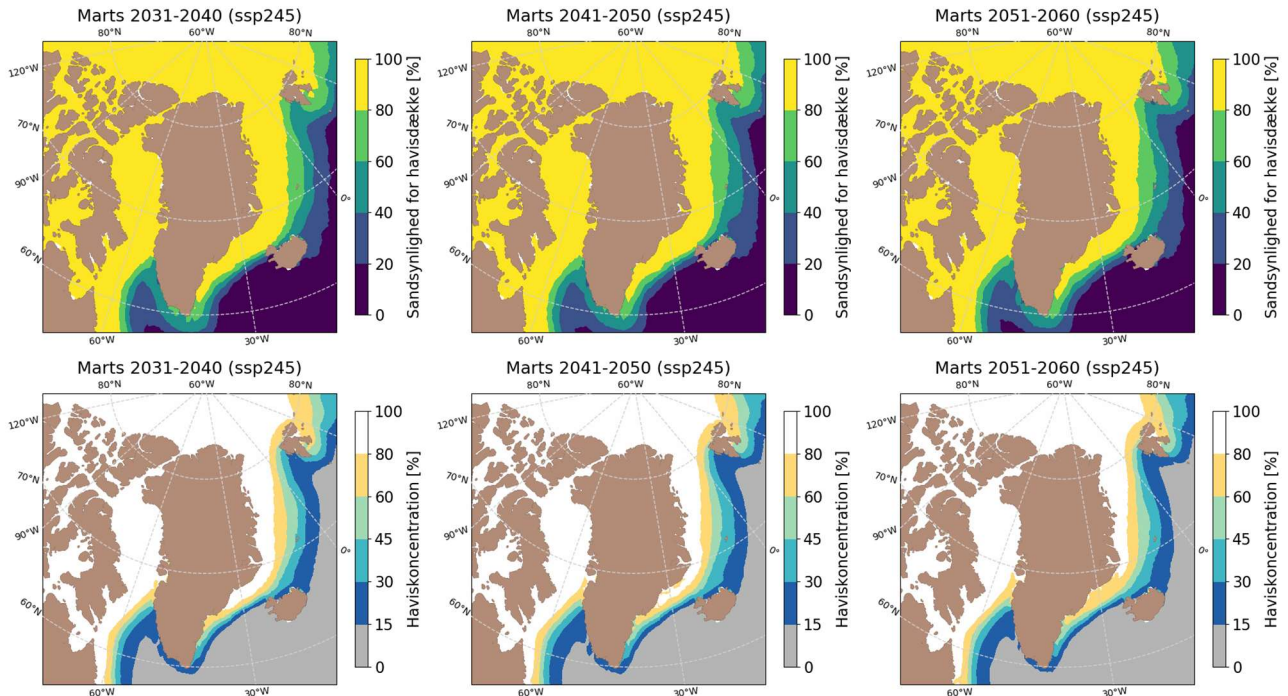
CNRM-CM6-1-HR
HadGEM3-GC31L
MIROC-ES2H
MIROC-ES2L
UKESM1-0-LL

Data for isudbredelse:

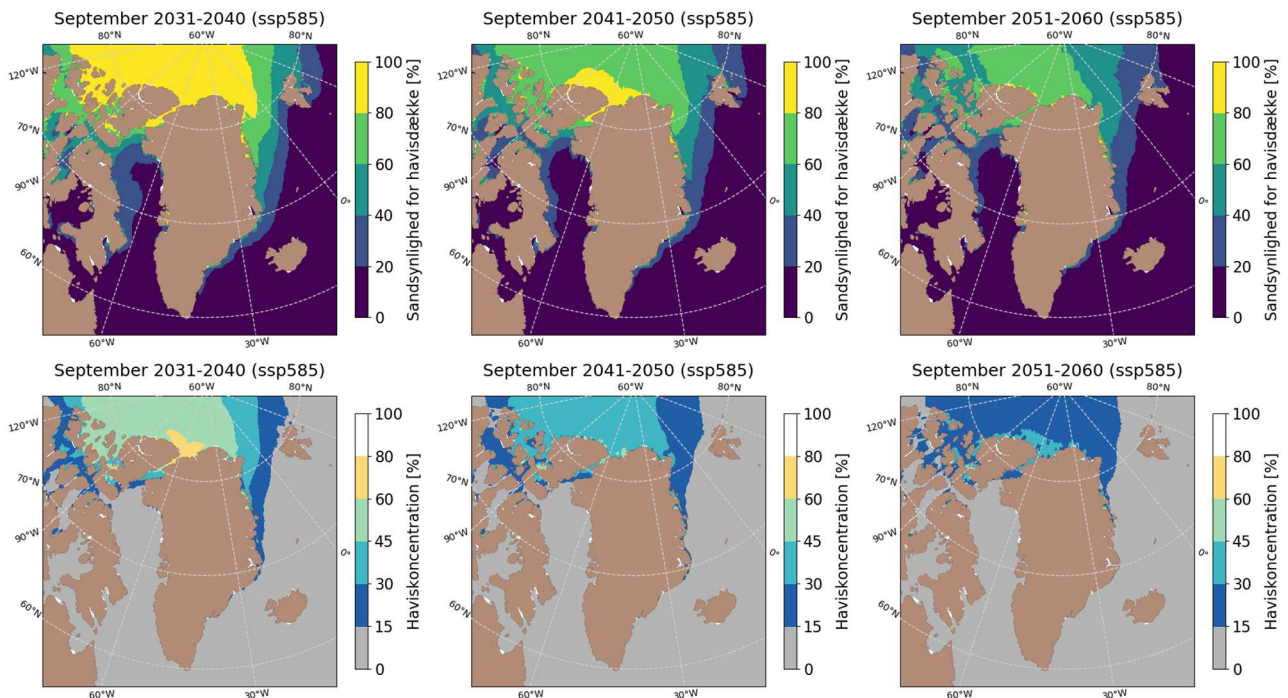
ACCESS-CM2
ACCESS-ESM1-5
BCC-CSM2-MR
CAMS-CSM1-0
CanESM5
CESM2-WACCM
CMCC-CM2-SR5
CMCC-ESM2
EC-Earth3-CC
EC-Earth3
EC-Earth3-Veg-LR
EC-Earth3-Veg
FGOALS-f3-L
FGOALS-g3
FIO-ESM-2-0
INM-CM4-8
INM-CM5-0
IPSL-CM6A-LR
MIROC6
MPI-ESM1-2-HR
MPI-ESM1-2-LR
MRI-ESM2-0
NESM3
NorESM2-LM
NorESM2-MM

DMI acknowledges the World Climate Research Programme, which, through its Working Group on Coupled Modelling, coordinated and promoted CMIP6. DMI thanks the climate modeling groups for producing and making available their model output, the Earth System Grid Federation (ESGF) for archiving the data and providing access, and the multiple funding agencies who support CMIP6 and ESGF.

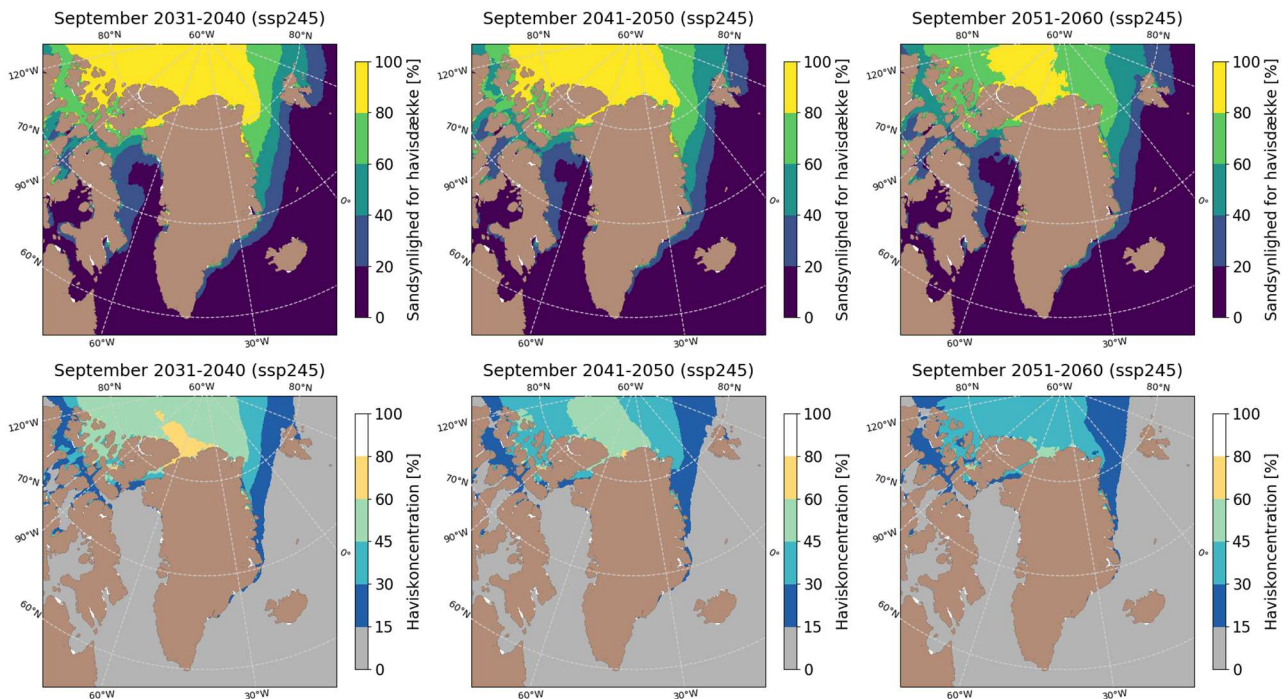
7.2 Bilag 2: Havisdække og haviskoncentration (SSP245 og SSP585)



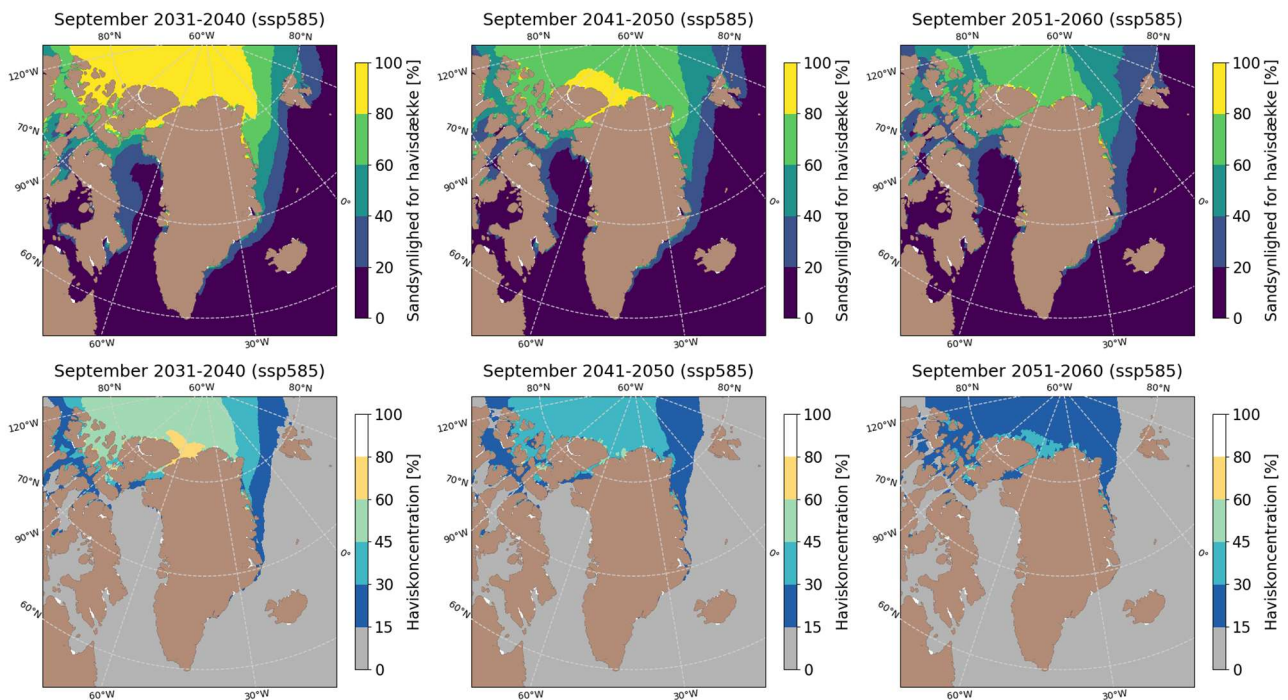
Figur 7-1 Sandsynlighed for havisdække (øverste række) og gennemsnitlig haviskoncentration (nederst) for det mellemhøje SSP245 scenarie i marts. Havens udbredelse i øverste række er defineret ved forekomsten af mere end 15% havis. Første, anden og tredje kolonne viser værdier for hhv. 2031-2040, 2041-2050 og 2051-2060. Kilde: DMI og CMIP6.



Figur 7-2 Sandsynlighed for havisdække (øverste række) og gennemsnitlig haviskoncentration (nederst) for det høje SSP585 scenarie i marts. Havens udbredelse i øverste række er defineret ved forekomsten af mere end 15% havis. Første, anden og tredje kolonne viser værdier for hhv. 2031-2040, 2041-2050 og 2051-2060. Kilde: DMI og CMIP6.

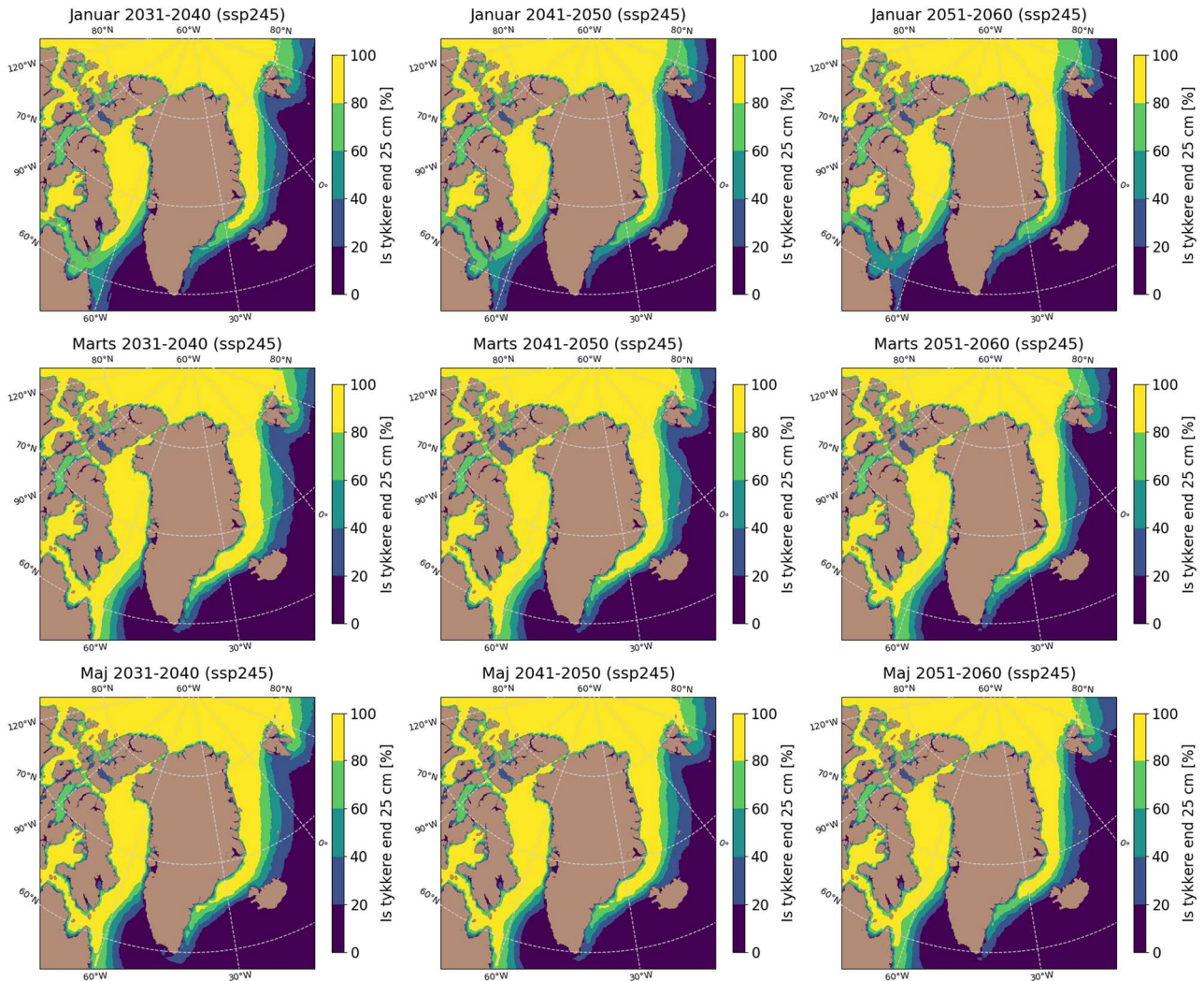


Figur 7-3 Sandsynlighed for havisdække (øverste række) og gennemsnitlig haviskoncentration (nederst) for det mellemhøje SSP245 scenarie i september. Havisens udbredelse i øverste række er defineret ved forekomsten af mere end 15% havis. Første, anden og tredje kolonne viser værdier for hhv. 2031-2040, 2041-2050 og 2051-2060. Kilde: DMI og CMIP6.

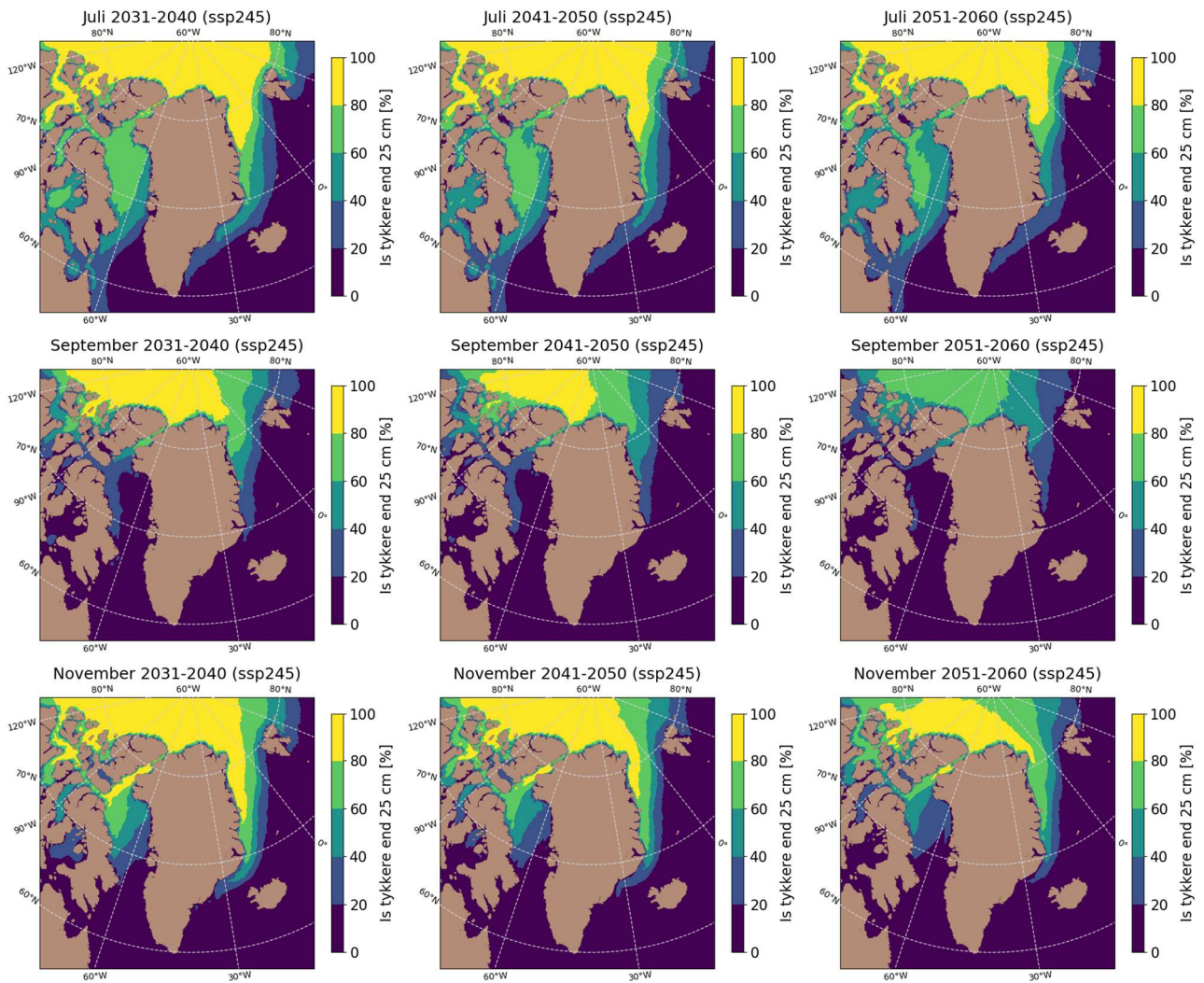


Figur 7-4 Sandsynlighed for havisdække (øverste række) og gennemsnitlig haviskoncentration (nederst) for det høje SSP585 scenarie i september. Havisens udbredelse i øverste række er defineret ved forekomsten af mere end 15% havis. Første, anden og tredje kolonne viser værdier for hhv. 2031-2040, 2041-2050 og 2051-2060. Kilde: DMI og CMIP6.

7.3 Bilag 3: Havis tykkere end 25 cm for SSP245

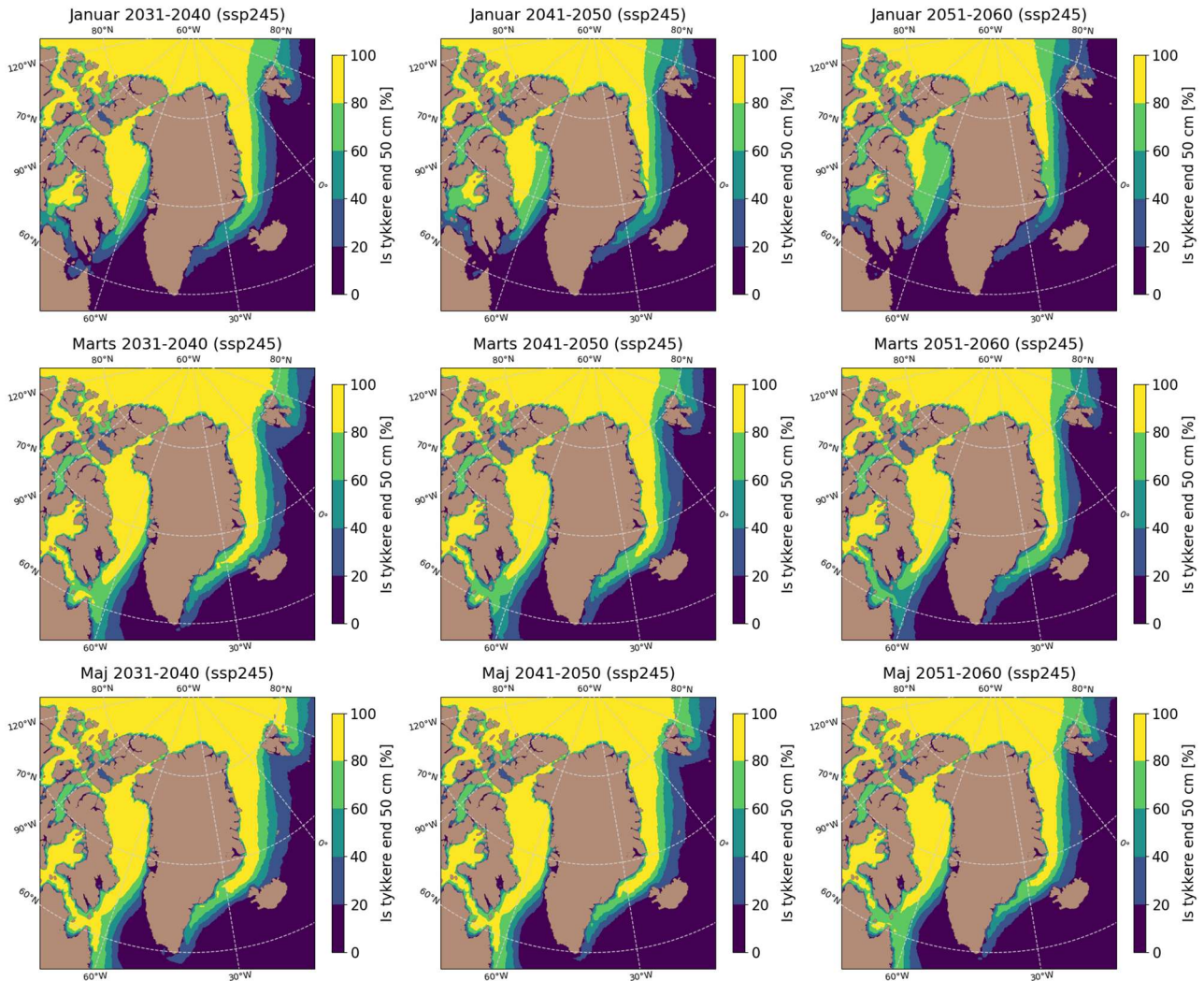


Figur 7-5 Sandsynlighed for havis i månederne omkring maksimumudbredelse for det mellemhøje SSP245 scenarie af mere end 25 cm tykkelse. Første, anden og tredje kolonne viser modelsandsynligheden for hhv. 2031-2040, 2041-2050 og 2051-2060. Kilde: DMI og CMIP6.

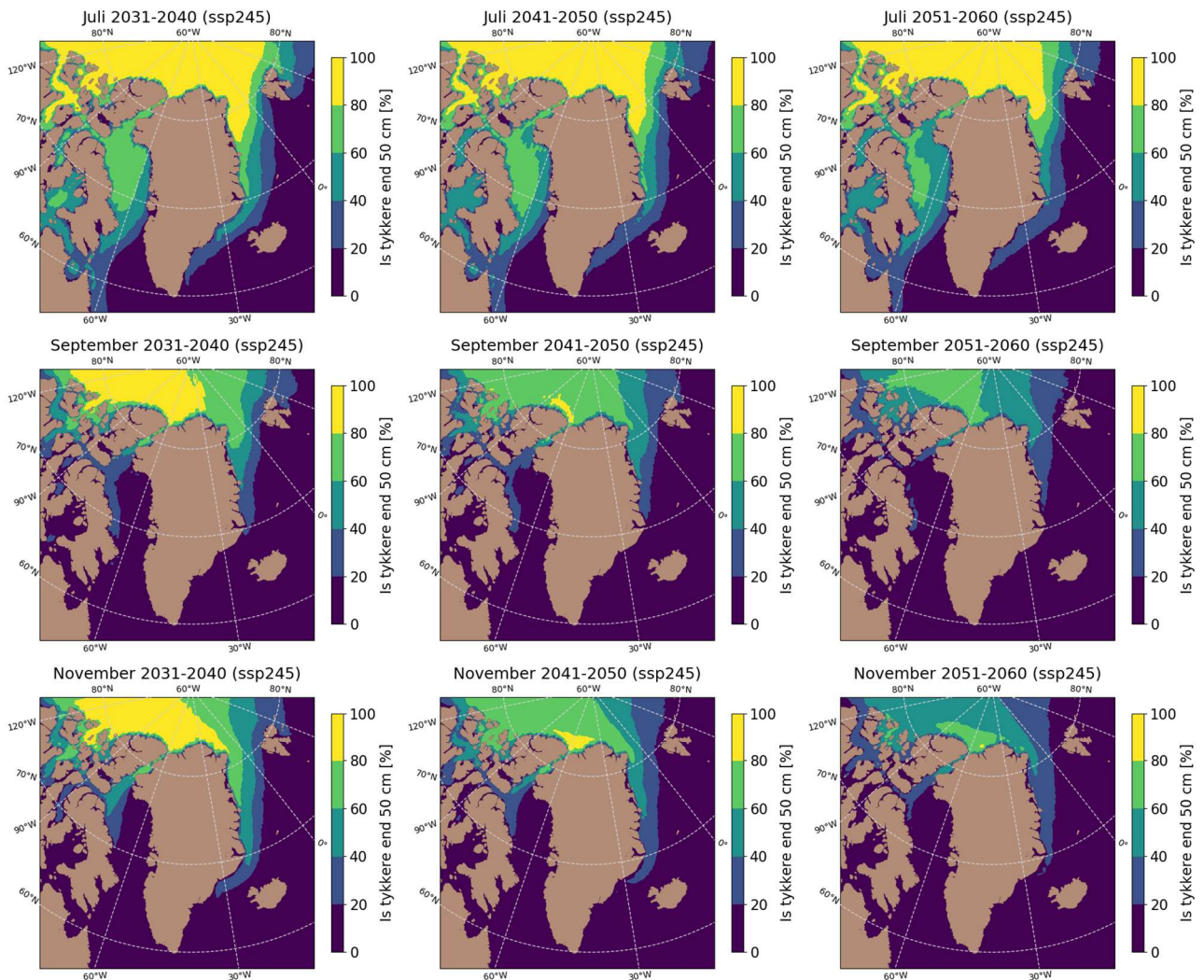


Figur 7-6 Sandsynlighed for havis i månederne omkring minimumudbredelse for det mellemhøje SSP245 scenarie af mere end 25 cm tykkelse. Første, anden og tredje kolonne viser modelsandsynligheden for hhv. 2031-2040, 2041-2050 og 2051-2060. Kilde: DMI og CMIP6.

7.4 Bilag 4: Havis tykkere end 50 cm for SSP245

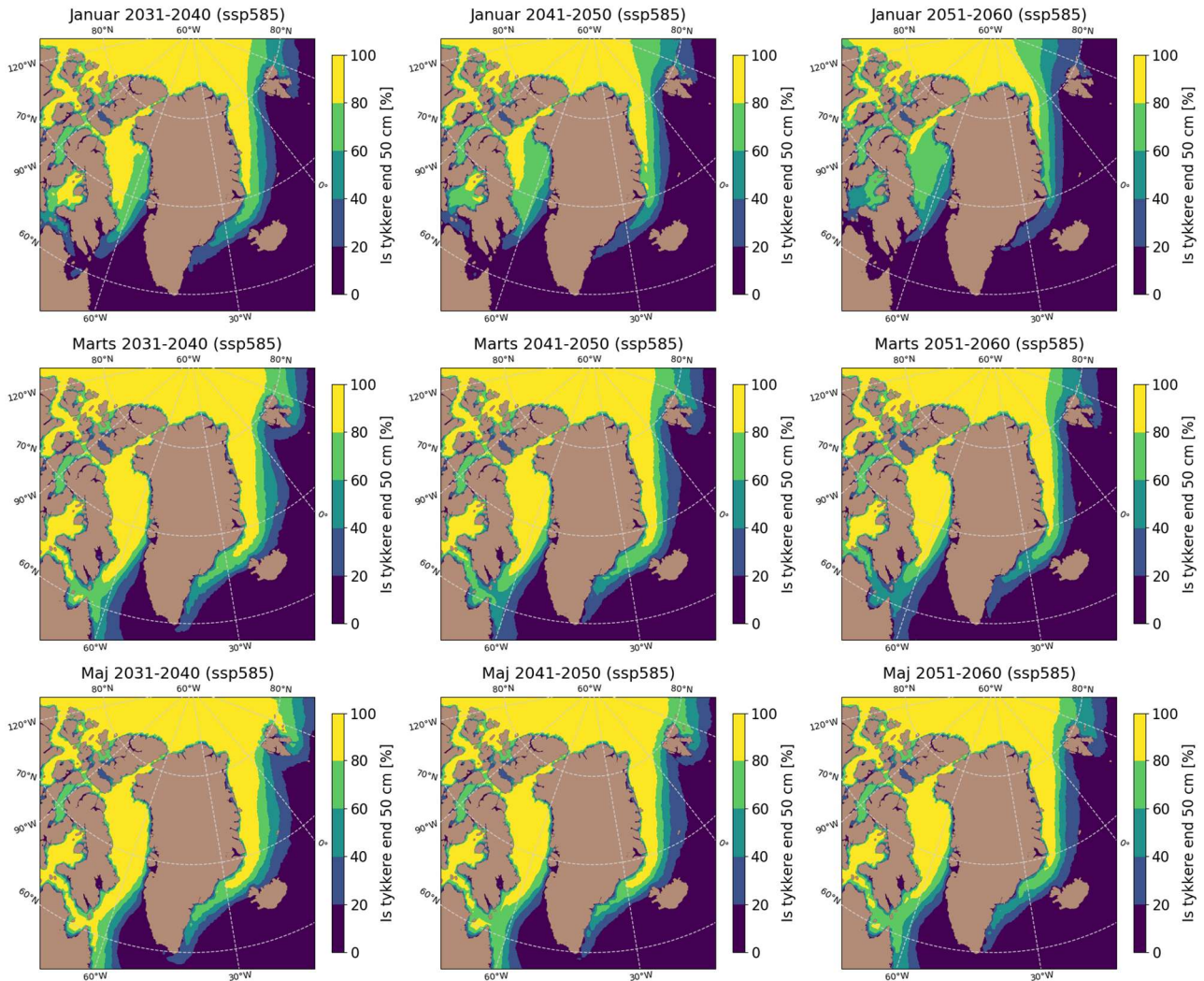


Figur 7-7 Sandsynlighed for havis i månederne omkring maksimumudbredelse for det mellemhøje SSP245 scenarie af mere end 50 cm tykkelse. Første, anden og tredje kolonne viser modelsandsynligheden for hhv. 2031-2040, 2041-2050 og 2051-2060. Kilde: DMI og CMIP6.

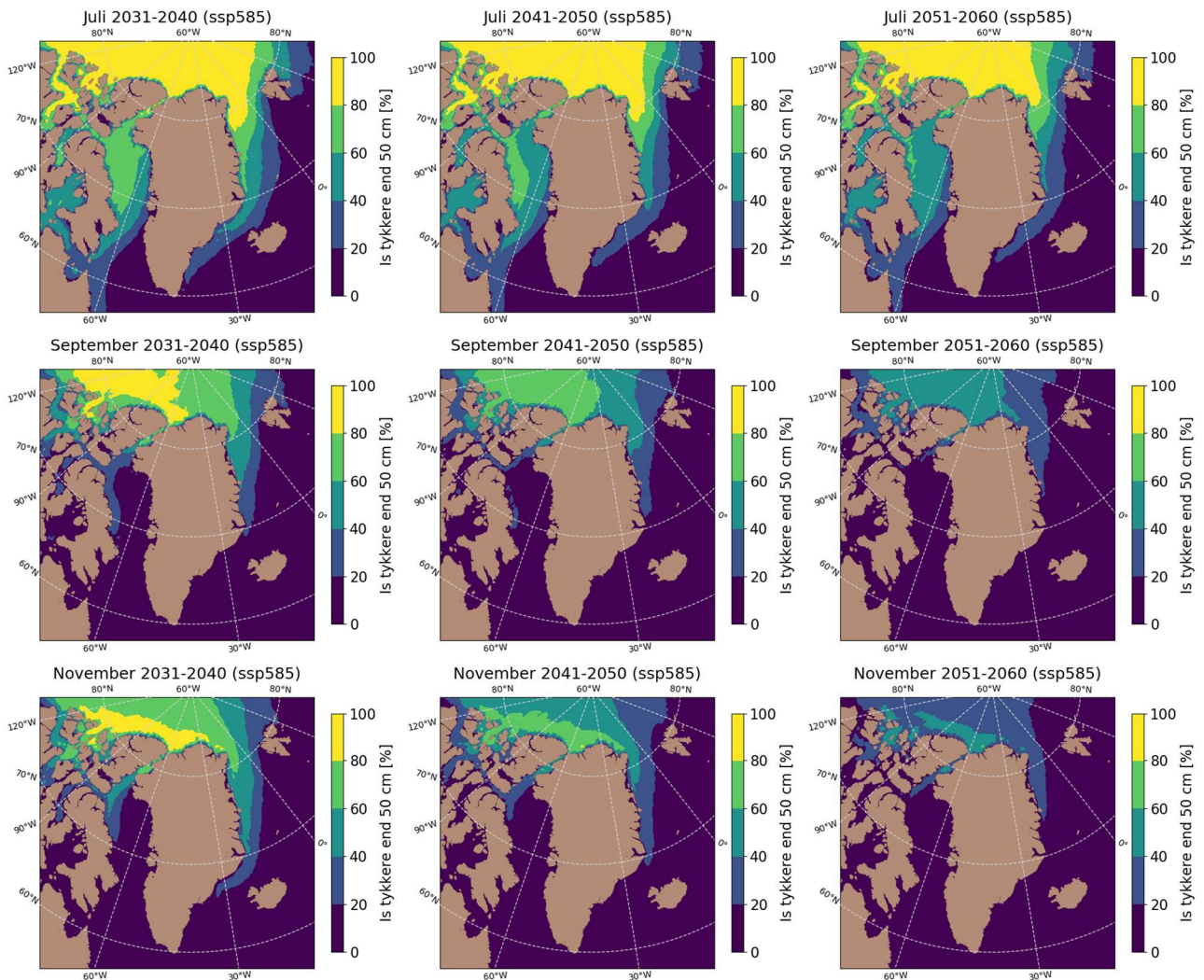


Figur 7-8 Sandsynlighed for havis i månederne omkring minimumudbredelse for det mellemhøje SSP245 scenarie af mere end 50 cm tykkelse. Første, anden og tredje kolonne viser modelsandsynligheden for hhv. 2031-2040, 2041-2050 og 2051-2060. Kilde: DMI og CMIP6.

7.5 Bilag 5: Havis tykkere end 25 cm for SSP585

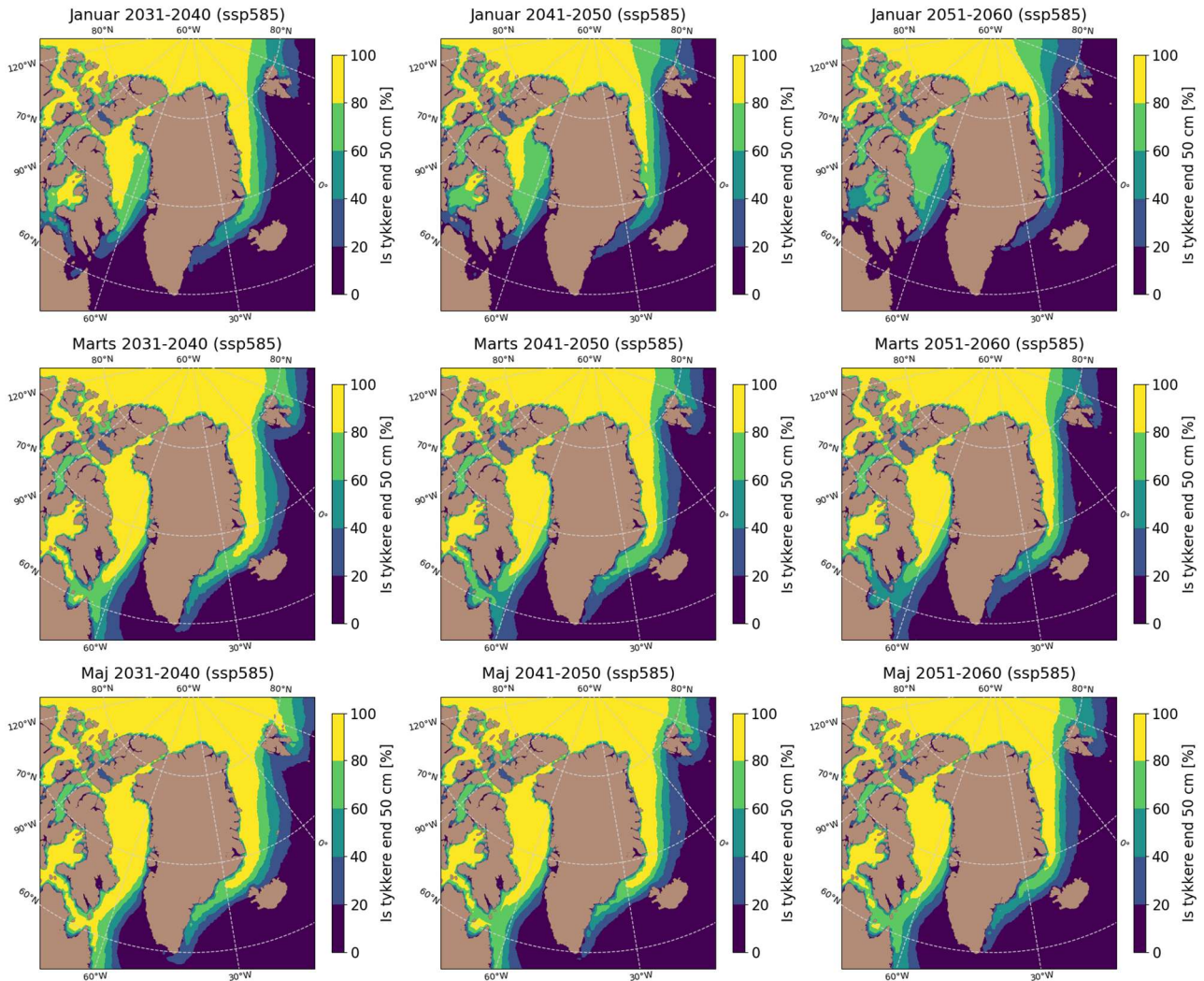


Figur 7-9 Sandsynlighed for havis i månederne omkring maksimumbredelse for det høje SSP585 scenarie af mere end 25 cm tykkelse. Første, anden og tredje kolonne viser modelsandsynligheden for hhv. 2031-2040, 2041-2050 og 2051-2060. Kilde: DMI og CMIP6.

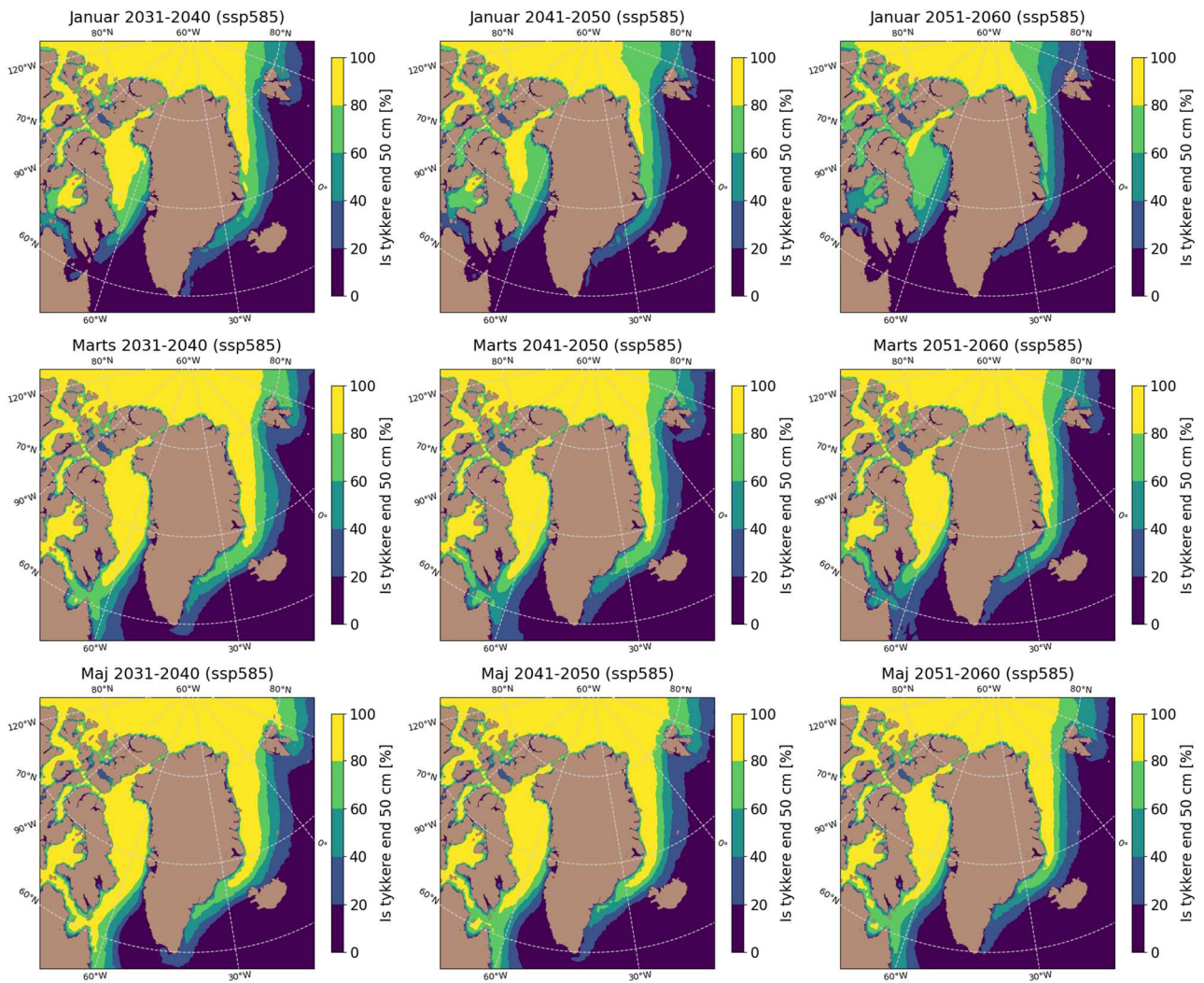


Figur 7-10 Sandsynlighed for havis i månederne omkring minimumudbredelse for det høje SSP585 scenarie af mere end 25 cm tykkelse. Første, anden og tredje kolonne viser modelsandsynligheden for hhv. 2031-2040, 2041-2050 og 2051-2060. Kilde: DMI og CMIP6.

7.6 Bilag 6: Havis tykkere end 50 cm for SSP585



Figur 7-11 Sandsynlighed for havis i omkring maksimumudbredelse for det høje SSP585 scenarie af mere end 50 cm tykkelse. Første, anden og tredje kolonne viser modelsandsynligheden for hhv. 2031-2040, 2041-2050 og 2051-2060. Kilde: DMI og CMIP6.



Figur 7-12 Sandsynlighed for havis i månederne omkring minimumudbredelse for det høje SSP585 scenarie af mere end 50 cm tykkelse. Første, anden og tredje kolonne viser modelsandsynligheden for hhv. 2031-2040, 2041-2050 og 2051-2060. Kilde: DMI og CMIP6.