



Danmarks Klimacenter rapport 09-07

Fremtidige havniveauændringer

Et resume af den aktuelle viden i foråret 2009

Anne Mette K. Jørgensen, Gudfinna Adalgeirsdottir, Kristine S. Madsen og Torben Schmith



Viden om fremtidige vandstandsstigninger er centrale for arealplanlægning og beslutninger om kystbeskyttelse. (Foto Anne Mette K. Jørgensen)



Kolofon

Serietitel:

Danmarks Klimacenter rapport

Titel: Fremtidige havniveauændringer

Undertitel: Et resume af den aktuelle viden i foråret 2009

Forfattere:

Anne Mette K. Jørgensen, Gudfinna Adalgeirsdottir, Kristine S. Madsen og Torben Schmith

Ansvarlig institution:

Danmarks Meteorologiske Institut

Sprog:

Dansk

Emneord:

Vandstand, klima

Url:

www.dmi.dk/dmi/dkc

Digital ISBN: 978-87-7478-583-5

ISSN:

1399-1957

Versionsdato:

August 2009

Link til hjemmeside:

www.dmi.dk

Copyright:

Forfatterne/DMI



Indhold:

Fremtidige havniveauændringer	1
Abstract	4
Resumé	4
1. Introduktion	6
2. Globale havniveauændringer	6
2.1 IPCC's fjerde hovedrapport	6
2.2 Nye vurderinger af globale havniveauændringer	7
3. Regionale vandstandsændringer	8
4. Lokale vandstandsændringer	10
5. DMI's udmeldinger for Danmark	11
6. Videre arbejde	14
Referencer	14
Tidligere rapporter	16



Abstract

Knowledge about future sea-level rise at regional and local levels is very important for risk assessments and cost effective adaptation to climate change. In the IPCC Fourth assessment Report (2007) a global sea-level rise of 0.18-0.59 cm by the end of this century relative to 1980–1999 is suggested for the SRES emission scenarios. It is, however, emphasized that contributions from changes in ice dynamics and uncertainties in carbon-cycle feedbacks are not included due to uncertainty. Since 2007 new studies have been published, showing that larger sea-level increases by 2100 cannot be ruled out. These studies are briefly described. It is well known that sea level changes are not spatially uniform, and therefore development of regional and local estimates are needed. Such estimates are generally not available for the Danish coasts, but implications of estimates on global and regional sea level rise from IPCC and later studies are assessed.

Resumé

Det er meget vigtig at etablere realistiske estimater af fremtidige vandstandsstigninger, fordi for lavt estimat fører til øget risiko for stormfloder og oversvømmelse, mens for højt fører til overinvestering i tilpasningstiltag.

Ændring i vandstanden i de danske farvande kan opfattes som sammensat af tre komponenter: Den globale ændring i vandstanden, regionale (Nordøstatlantiske) ændringer samt lokale ændringer.

Det globale havniveau stiger for tiden hovedsageligt af to grunde: varmeudvidelse af havet som følge af stigende vandtemperatur og smeltende gletschere og iskapper, som tilføjer vand fra landområder. Vandstandsstigningen er observeret at være øgende i den sidste del af det 20. århundrede og forventes at accelerere yderligere i fremtiden. Den gennemsnitlige stigning over det 20. århundrede er vurderet at være 1,8 mm per år (Jevrejeva et al., 2006), men i perioden 1993-2003 er den estimeret til 3,1 mm per år (IPCC, 2007).

I IPCC's fjerde hovedrapport fra november 2007 (IPCC, 2007, herefter betegnet AR4) er ikke anført en bedste vurdering af den øvre grænse for den globale havniveauændring frem til år 2100, fordi der i 2007 ikke var basis i den videnskabelige litteratur. I rapporten er de beregnede havniveauændringer, som ikke tager hensyn til fremtidige dynamiske ændringer i isstrømme eller usikkerheder i feedbacks i kulstofkredsløbet, mellem 0,18 og 0,59 m i år 2100 i forhold til 1980-1999 for SRES-scenarierne.

Siden AR4 blev udsendt, er der publiceret en række studier, som vurderer højere vandstandsstigninger frem til 2100. To nye og ret omtalte studier baseres på statistiske sammenhænge mellem vandstandsstigning og temperatur, mens et tredje ser på fysiske grænser for, hvor meget Grønlands indlandsis kan bidrage til global vandstandsstigning. Disse studier forudsiger globale vandstandsstigninger på mellem 0,5 og 2 m. Andre studier viser at vandstanden i lange perioder under sidste mellemistid steg med 0,7-1,6 m pr. århundrede.

Regionale nordatlantiske ændringer skyldes et samspil mellem en geografisk fordeling af temperatur- og salinitetsændringer og ændringer i oceancirkulationen som følge af ændringer i de meteorologiske forhold. Et hidtil ret upåagtet bidrag skyldes at afsmeltning af Grønlands Indlandsis og fra Antarktis vil føre til ændringer i gravitationsfeltet.



Lokale vandstandsændringer kan have mange årsager. De vigtigste for de danske kyster vurderes at være vindeffekter og landhævning. Hvis vestenvinden øges, vil det føre til højere vandstand på vestvendte kyster, specielt den jyske vestkyst, mens landhævninger påvirker vandstanden i nedadgående retning i den nordlige del af Danmark.

En samlet vurdering af resultaterne fra IPCC og nye studier fører til, at DMI vurderer, at den udmelding om fremtidig vandstandsstigning for A2-scenariet ved Vestkysten, som er anført i den danske strategi for klimatilpasning, stadig er et rimeligt bud. På det nuværende videnskabelige grundlag kan DMI imidlertid ikke angive en øvre grænse for vandstandsstigninger langs de danske kyster frem til år 2100, men anbefaler, at muligheden for højere stigninger end anført af IPCC og i tilpasningsstrategien indgår i risikovurderinger samt at der gennemføres studier af iskappernes dynamik og beregninger af fremtidige ændringer med koblede atmosfære-iskappe-oceanmodeller med fokus på både globale, regionale og lokale skalaer.



1. Introduktion

IPCC's hovedrapporter indeholder fremskrivninger af den globale vandstand for forskellige fremtidsscenerier. Fremskrivningerne er anført som bedste estimater, men der er ingen bedste vurdering af den øvre grænse for global vandstandsstigning. Siden udsendelsen af IPCC's seneste hovedrapport (den fjerde hovedrapport, herefter betegnet AR4) i 2007 er der publiceret en række studier, som viser højere vandstandsstigninger end dem, der er anført i AR4. I denne rapport ses nærmere på disse nye studier, og deres betydning for vurderingen af fremtidige havniveauændringer omkring Danmark diskuteres.

AR4 indeholder ikke kun globale fremskrivninger, men også en regional fremskrivning. Til planlægningsformål er der imidlertid behov for lokale fremskrivninger. Denne rapport gennemgår hvilke lokale bidrag, der kan være til vandstandsændringer omkring Danmark, i tillæg til de regionale ændringer. Desuden vises resultater fra danske beregninger og beregninger foretaget i vore nabolande.

2. Globale havniveauændringer

Globale havniveauændringer skyldes hovedsagelig to kilder: varmeudvidelse på grund af stigende havtemperaturer og smeltende gletschere og iskapper. Varmeudvidelsen er forholdsvis godt forstået og er estimeret at bidrage med omkring 10-30 cm i det 21. århundrede (IPCC, 2007). Smeltende gletschere og iskapper omfatter Antarktis, som indeholder omkring 90% af total isvolumen, Grønlands indlandsis, som indeholder omkring 9%, og de øvrige små gletschere og iskapper, som udgør mindre end 1% af det totale isvolumen. De små iskapper og gletschere er estimeret at indeholde omkring 0,5 m potentiel havniveaustigning og til at bidrage til havniveauet med 10-20 cm i det 21. århundrede (Raper og Braithwaite, 2006). Afsmeltingen fra de to store iskapper er derimod meget sværere både at måle og modellere, men det er et emne, der forskes i. Med flere og bedre målinger især fra satellitter får vi bedre forståelse af iskappernes dynamik. Satellit-målinger viser, at der er sket en acceleration af massetab fra både Antarktis og Grønland siden 1990 (Rignot et al, 2008, Lutcke et al., 2006), men hvorvidt massetabet bliver ved med at accelerere, er ikke entydigt forstået.

2.1 IPCC's fjerde hovedrapport

De beregnede havniveauændringer, som er anført i AR4, er mellem 0,18 og 0,59 m i år 2090-2099 for de såkaldte SRES-scenerier (IPCC, 2000) for udslip af drivhusgasser og andre stoffer, som påvirker klimaet, se tabel 1. Hovedparten af stigningen skyldes vandets varmeudvidelse, men fremskrivningerne indeholder også bidrag fra smeltning af gletschere og iskapper samt fra strømning af is i Grønland og Antarktis svarende til målingerne for perioden 1993-2003. Disse strømningshastigheder kan imidlertid vokse eller aftage i fremtiden, hvilket er en væsentlig kilde til usikkerhed. Hvis bidraget fra den voksende strømning vokser lineært med den globale temperaturændring, skal de øvre grænser for havniveaustigninger iflg. AR4 øges med 0,1-0,2 m. Herved kommer resultaterne på niveau med fremskrivningerne i IPCC's tredje hovedrapport fra 2001.

I AR4 anføres det, at de fremtidige globale havniveauændringer, som er anført for SRES-scenerierne, ikke kan betragtes som øvre grænser. Det skyldes, at beregningerne hverken tager hensyn til usikkerheden i feedbacks i kulstofkredsløbet eller til den fulde effekt af ændringer i isstrømme i bl.a. Grønland, fordi der i 2007 ikke var basis i den videnskabelige litteratur.

Scenario	Havniveauændring (m) i 2090-2099 i forhold til 1980-1999
B1	0,18-0,38
B2	0,20-0,43
A1T	0,20-0,45
A1B	0,21-0,48
A2	0,23-0,51
A1FI	0,26-0,59

Tabel 1. Modelberegnete globale havniveauændringer (ekskl. fremtidige hurtige ændringer i isens strømninger) for IPCC's SRES-scenarier (kilde IPCC, 2007).

IPCC anfører, at globale temperatur- og havniveauøstigninger vil fortsætte i århundreder, selv hvis drivhusgaskoncentrationen stabiliseres. Hvis fx drivhusgaskoncentrationen holdes konstant fra år 2100 på niveau svarende til B1- eller A1B-scenarierne, ventes temperaturen at stige yderligere ½ grad frem til år 2200. Vandstanden vil stige mellem 0,3 og 0,8 m frem til år 2300 i forhold til 1980-99 alene på grund af varmeudvidelsen, og den vil fortsætte med at stige i mange århundreder som følge af varmeudvidelse, fordi det tager lang tid at transportere varmen ned i dybhavet. Hertil kommer vandstandsstigninger som følge af smeltning af gletschere og iskapper.

2.2 Nye vurderinger af globale havniveauændringer

Siden udsendelsen af AR4 i november 2007 er der publiceret en række studier af globale vandstandsændringer. Disse studier viser ret forskellige resultater med vandstandsstigninger på mellem 0,5 og 2 m frem til år 2100, men hovedparten konkluderer at den mest sandsynlige stigning er under 1 m. Nedenfor beskrives disse studier kort.

Pfeffer et al. (2008) har gennemført et beregningseksperiment for Grønlands indlandsis, hvor de øger hastigheden af alle udløbsgletschere lige så meget, som der er blevet målt i de tre største udløbsgletschere. Dette eksperiment kan sætte fysiske grænser for, hvor meget Grønlands indlandsis kan bidrage til global havniveauøstigning. Den øvre grænse fremkommer ved at lade alle gletschere accelerere og fortsætte med den høje hastighed gennem hele århundredet. Dette kan – sammen med bidrag fra Antarktis - tilføje to meter, men de konkluderer, at det mere sandsynlige scenario med fortsat stor, men mere realistisk acceleration er, at isen samt 0,3 m termisk udvidelse tilføjer 0,8 m til havniveauet frem til år 2100.

Et andet model-eksperiment med en flow-line-model af Helheim-gletscheren (Nick et al., 2009) forsøger at forstå, hvordan udløbsgletscherne accelererer, og hvordan de kan blive ved med at flyde med høj hastighed. Deres konklusion er, at udløbsgletschere, som er i kontakt med havet, kan reagere meget hurtigt på ændringer i hav- og lufttemperatur, præcis sådan som vi har observeret i de sidste årtier fra satellitter, men at den øgede hastighed ikke kan blive ved, fordi gletscherne indstiller sig efter de nye temperaturforhold. Vi kan derfor forvente, at udløbsgletschere kan øge hastigheden hurtigt, men også indstille sig hurtigt, når de har nået en ny stabil beliggenhed. Derfor advarer Nick et al. mod at fremskrive den acceleration, som er observeret nu, langt ud i fremtiden, men de påpeger også, at udløbsgletschere er meget følsomme for ændringer og fluktuationer i hav- og lufttemperaturer.

Rahmstorf (2007) forudsiger 0,5-1,4 m stigning over niveauet i 1990 frem til år 2100 for SRES-scenarierne ved at opstille en statistisk sammenhæng mellem data for vandstand og global middeltemperatur i de sidste 120 år. Fra 1961 til 2003 er den globale vandstand i havene steget med en hastighed på 1,8 mm/år og fra 1993 til 2003 med 3,1 mm/år (IPCC, 2007). Rahmstorf anfører, at



hvis tendensen til øget årlig vandstandsstigning stopper i løbet af få år og fortsætter på det nuværende niveau, vil det føre til en global vandstandsstigning i 2100 på 0,38 m i forhold til 1990. Han konkluderer desuden, at vandstandsstigninger på over 1 m for SRES-scenarier med stor opvarmning ikke kan udelukkes, fordi det blot forudsætter, at den lineære sammenhæng, som er konstateret mellem global temperaturstigning og global vandstandsstigning i det 20. århundrede, også gælder i det 21. århundrede. Det skal nævnes at den anvendte statistiske metode har været kritiseret fra flere hold (Holgate et al, 2007, Schmith et al., 2007, von Storch et al., 2008,) men kritikken er besvaret af Rahmstorf (2008). Resultater fra en ny, forbedret model blev præsenteret på Klimakongressen i København i marts 2009. De nye resultater, som endnu ikke er publicerede, viser – i lighed med de tidligere – at globale vandstandsstigninger meget vel kan overskride én meter i 2100, hvis emissionerne af drivhusgasser fortsætter uden indgreb, og at langtidsstigninger over adskillige århundreder sandsynligvis vil være adskillige meter.

En lignende metode bruger en statistisk sammenhæng mellem havniveau og temperatur i de sidste 2000 år til at opstille en model til at forudsige sammenhængen i fremtiden (Grindsted et al., 2009). Resultater med denne model viser, at den sandsynlige havniveaustigning ligger mellem 0,7 og 1,6 m for IPCC's SRES-scenarier, hvilket er tre gange så meget, som IPCC vurderede i AR4. De konkluderer, baseret på modellen, at selv hvis temperaturen ikke stiger i de næste 100 år, vil det globale havniveau stige med 20-40 cm som følge af den opvarmning, der allerede er sket. (se: evt. <http://www.glaciology.net/Home/PDFs/Announcements/gslprojection>).

Anvendelsen af de statistisk baserede metoder er behæftet med stor usikkerhed. På den ene side forsøger de i forsimplet form at projicere såvel steriske¹ som eustatiske² bidrag til stigningen. På den anden side er de baseret på data fra perioder, hvor klimaet generelt har været koldere end det, klimamodeller peger på vil være fremtiden over de næste århundreder. Derved bliver estimerne for fremtiden i høj grad baseret på ekstrapolationer, hvorfor følsomheden over for naturlige udsving i udviklingen især over det seneste århundrede bliver betragtelig.

To artikler (Rohling et al., 2007 og Carlson et al., 2008) omhandler studier af vandstandsændringer under sidste mellemistid. Her var den globale middeltemperatur mindst 2 grader højere end i dag og det globale havniveau 4-6 m højere end det nuværende. Selv om det varmere klima i den sidste mellemistid havde andre årsager end den opvarmning, som forventes i dette århundrede, kan studier af forholdene den gang måske betragtes som et fortilfælde for hvad der kan ske som følge af menneskeskabte klimaændringer. Studiet af Rohling et al. har vist gennemsnitlige globale havniveaustigninger på 1,6 m pr. århundrede som følge af ændringer i isvolumen, mens studiet af Carlson et al. viser at afsmeltning fra en stor iskappe i Canada (Laurentide iskappen) førte til vandstandsændringer på hhv. 0,7 og 1,3 cm pr år i to varmeperioder af nogle tusinde års længde.

En helt ny review-artikel (Milne et al. (2009)) gennemgår, hvordan præcisionsmålinger fra satellitter har medvirket til at kortlægge og øge forståelsen af de havniveauændringer, der er sket, og hvordan disse resultater kan medvirke til at vurdere fremtidige ændringer. De konkluderer at de fleste studier begrænser globale vandstandsstigninger i dette århundrede til en meter, men at der vil være store afvigelser mange steder. De anfører endvidere at påvirkningen fra ændringer i isstrømme er den væsentligste kilde til usikkerhed.

3. Regionale vandstandsændringer

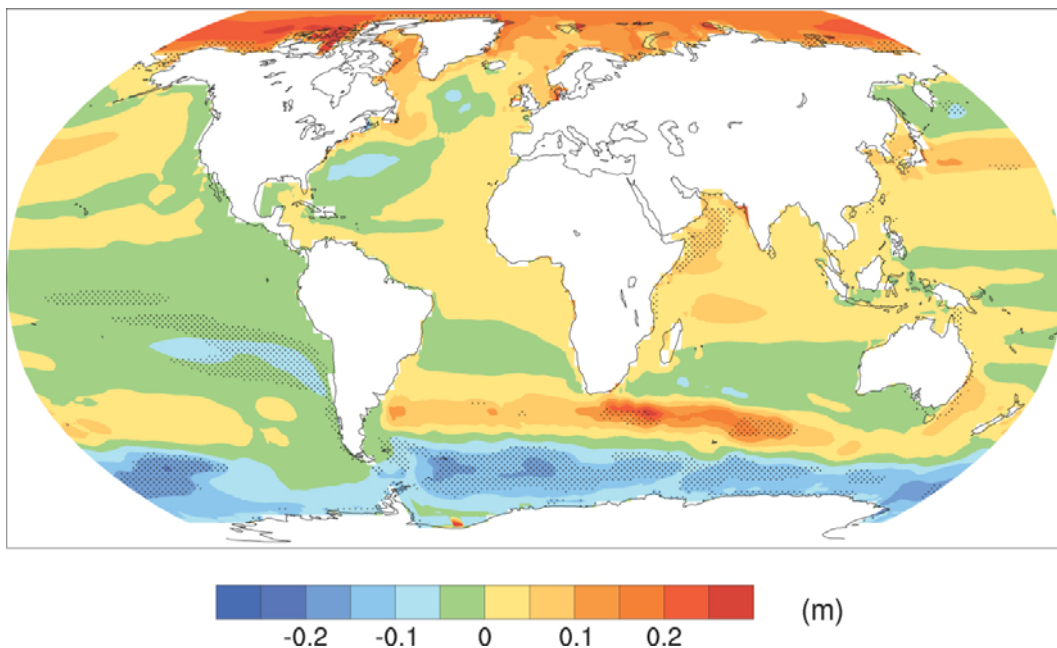
Som nævnt i kapitel 1 er der forskellige kilder til vandstandsændringer, og de giver ændringer, som er forskellige verden over. Havoverfladen er ikke ”vandret” – målt i forhold til Jordens centrum er

¹ Ændringer, som skyldes ændringer i vandets massefylde som følge af ændringer i temperatur og saltholdighed

² Ændringer, som skyldes ændringer i mængden af vand i oceanerne som følge af fx afsmeltning fra gletschere eller ændringer i oceanernes størrelse

der store variationer. Siden 1992 er der gennemført præcise målinger af havniveauet fra satellitter, og desuden har der siden 2000 været anvendt frit drivende bøger, som bevæger sig op og ned i oceanernes øverste 1-2 km. Sådanne målinger viser at vandstanden i gennemsnit stiger med 3 mm om året, men at der også er områder, hvor den stiger med mere end 10 mm om året. Der er desuden større områder, hvor vandstanden er faldet i perioden, særligt i den østlige del af Stillehavet. Dette understreger nødvendigheden af i klimatilpassingssammenhæng at have adgang til regionale og lokale data og ikke kun til globale gennemsnit.

AR4 udtaler sig ikke kun om globale havniveauændringer, men også om regionale ændringer i vandstanden. Her ser det ud til at store dele af Nordatlanten vil opleve en større stigning (omkring 0,1 m i gennemsnit) end det globale gennemsnit som følge af ændringer i massefylde og oceancirkulation, se figur 1.



Figur 1. Fremtidig vandstandsstigning (m) som følge af ændringer i massefylde og oceancirkulation i 2080-2099 i forhold til 1980-99 for IPCC's SRES A1B-scenario for udslip af drivhusgasser og andre stoffer, som påvirker klimaet. Tallene, som er baseret på beregninger fra 16 atmosfære-ocean-klimamodeller, viser afvigelser fra det globale gennemsnit. Positive værdier angiver ændringer, som er større end det globale gennemsnit. Prikkede områder viser områder, hvor modellerne giver meget forskellige resultater, som dermed er usikre. Fra IPCC, 2007.

Regionale nordatlantiske ændringer skyldes et samspil mellem en geografisk fordeling af temperatur- og salinitetsændringer og ændringer i oceancirkulationen (Landerer et al. 2007), dels ændringer i den termohaline cirkulation og dels ændringer i de horisontale gyrecirkulationer forårsaget af ændrede vindmønstre.

Desuden viser modelstudier at afsmeltning fra iskapperne i Grønland og Antarktis samt fra mindre gletschere har forskellig virkning geografisk set på grund af ændringer i gravitationsfeltet (Mitrovica et al., 2001 og 2009). Således giver afsmeltninger fra den grønlandske indlandsis størst vandstandsstigning i den nordlige del af Stillehavet og den sydlige del af Atlanterhavet og næsten ingen ændringer omkring Danmark, mens afsmeltning fra Antarktis giver størst vandstandsstigning i centrale dele af Stillehavet og stigning omkring Danmark tæt på det globale gennemsnit. Her er ikke taget hensyn til efterfølgende vertikale isostatisk landbevægelser, som foregår på tusindårs tidsskala.

Katsman et al. (2008) har gennemført beregninger af fremtidige vandstandsændringer for den



nordøstlige del af Atlanterhavet, hvor de tager hensyn til både vandets varmeudvidelse, afsmeltning af gletsjere og iskapper inkl. i Grønland og Antarktis samt ændringer i tyngdefeltet som følge af afsmeltning af is. Deres beregninger viser vandstandsstigninger for Nordvesteuropa på 0,3-0,55 m for et scenario med 2 graders global temperaturstigning i 2100 og mellem 0,4 og 0,8 m for et scenario med 4 graders global temperaturstigning. Det enkelte sted kan ændringen imidlertid være meget anderledes som følge af lokale effekter som fx vertikale landbevægelser.

Den hollandske Deltacommission har på baggrund af eksisterende litteratur opstillet en "sandsynlig øvre grænse" (plausible upper limit) for fremtidige vandstandsstigninger i Nordsøen, under den antagelse at der ikke sker abrupte ændringer. De har valgt at se bort fra effekter af ændringer i gravitationsfeltet, og deres vurdering af denne grænse er 0,55-1,2 m for år 2100 og 1,5-3 m for år 2200 (Vermann 2008).

4. Lokale vandstandsændringer

Vandstandsændringer et givet sted består af summen af globale, regionale og lokale ændringer. Ved de danske kyster er de vigtigste årsager til lokale vandstandsændringer vindeffekter og deraf følgende hydrografiske ændringer samt landhævning. For vurdering af oversvømmelsesrisiko bør desuden effekten af bølger inkluderes.

Landhævningen i Danmark skyldes primært isostatisk effekt efter sidste istid, og er på en tidskala på 100 år omtrent konstante og uafhængige af klimaforandringer. Der foregår i øjeblikket en bestemmelse af landhævningen i Danmark ved hjælp af moderne GPS målinger og modellering. De foreløbige resultater viser at landhævningen i den sydvestlige del af Danmark er tæt på 0, mens den i den nordlige del af Danmark er ca. 20 cm på 100 år (Knudsen et. al. 2008 samt personlig kommunikation med Per Knudsen, 2009). Dette stemmer godt overens med observerede trends i historiske danske vandstandsmålinger.

For at vurdere effekten af ændrede vejrforhold på vandstanden langs de danske kyster er der behov for beregninger med oceanografiske modeller for de forskellige scenarier. Sådanne beregninger findes indtil nu kun i begrænset omfang. Nedenfor refereres beregninger foretaget ved DMI og relevante beregninger foretaget i vore nabolande.

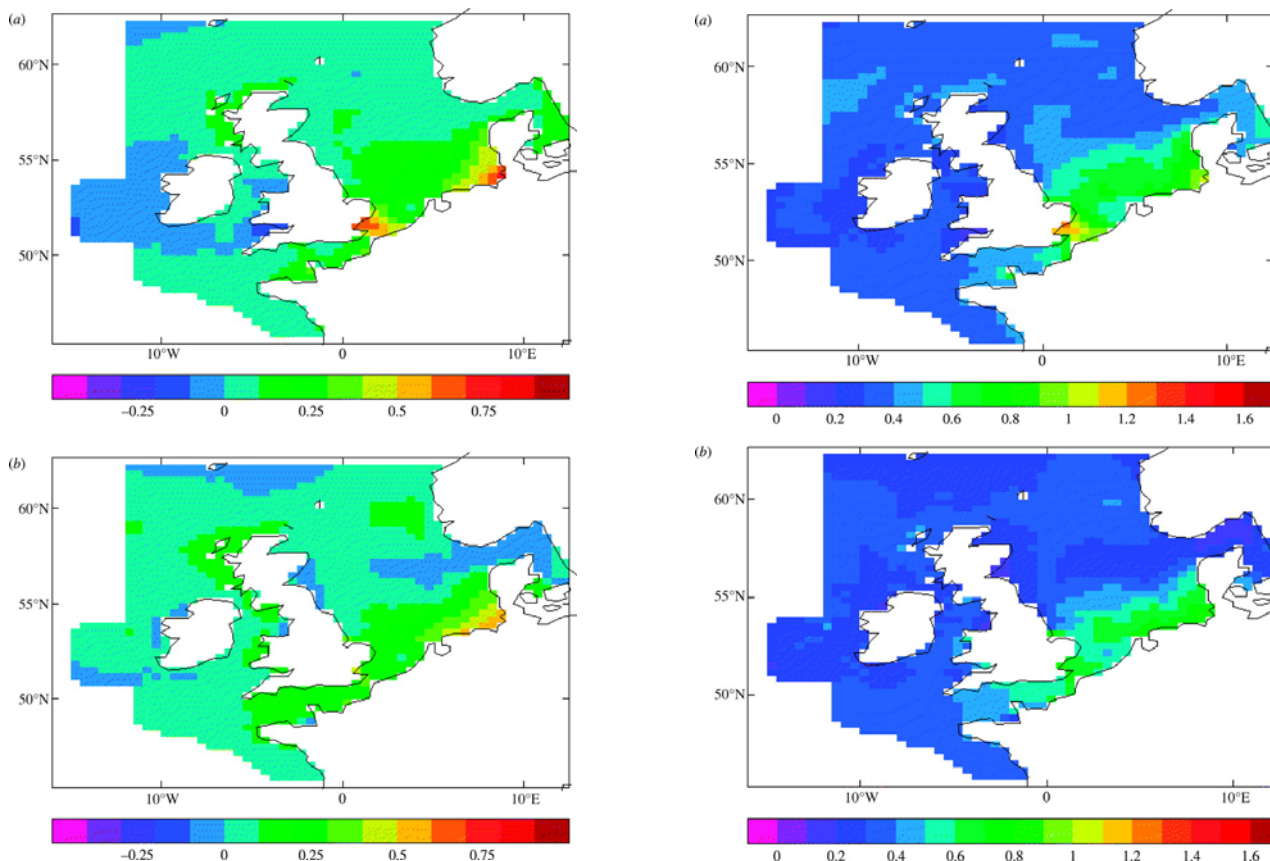
Regionale klimasimuleringer der giver scenarier for fremtidens klima, viser en mulig forøgelse af vestenvinden over havet omkring Danmark. Hvis vestenvinden øges, vil det føre til højere vandstand på vestvendte kyster, specielt den jyske vestkyst.

For Nordsøen viser de klimasimuleringer der er foretaget indtil nu, at effekten af den øgede vestenvind kun giver en lille forskel i den årlige middelvandstand, men en effekt på 10-15 cm på den jyske vestkyst i januar måned. Simuleringerne viser desuden en ændring i de kraftigste storme, således at effekten på stigningen i stormflodshøjder på den jyske vestkyst er omkring 30 cm (Woth 2005, Madsen 2009). Andre beregninger foretaget i England (Lowe og Gregory, 2005) for Nordsøen for A2- og B2-scenarierne viser at vandstanden i 50-årshændelserne i Vadehavet øges med mere end 0,5 m for A2-scenariet alene på grund af ændret stormklima og med næsten 1 m, når der også tages hensyn til landbevægelser og en moderat ændring i middelvandstanden, se figur 2. Det skal dog bemærkes at klimamodellerne har større usikkerhed i bestemmelsen af ændringer i vinden og deraf afledede størrelser end i fx temperaturændringen.

For Østersøområdet er der med en regional ocean-is-model foretaget beregninger af fremtidig vandstand for 2071-2100 for forskellige scenarier (Meier et al., 2004). Beregningerne inkluderer bidrag fra ændringer i atmosfærisk strømningsmønster og nedbør, globale vandstandsændringer og vertikale landbevægelser og indikerer at ændringer i middelvandstanden om vinteren vil ligge tæt

på den globale middelværdi i den sydlige Østersø.

I fremtidens klima er det som nævnt især vinde fra vestlige retninger, der bliver kraftigere over havet omkring Danmark. De indre danske farvande er relativt godt beskyttet mod ændringer i vestenvinden, og de to klimasimuleringer for de indre danske farvande, der er foretaget på DMI (to forskellige havmodeller, begge forceret med et moderat³ A2-scenarier) viser ingen signifikante ændringer i stormflodshøjden ud over ændringerne i middelvandstanden (Madsen 2009).



Figur 2. Ændringer i højden (m) af en 50-årshændelse på grund af ændring i stormklima alene (venstre figur) og ændring i stormklima, øget gennemsnitsvandstand og vertikale landbevægelser (højre figur). Ændringerne vises for 2080'erne i forhold til i dag for (a) A2-scenariet og (b) B2-scenariet. Bemærk de forskellige farveskalaer. (Fra Lowe og Gregory, 2005)

5. DMI's udmeldinger for Danmark

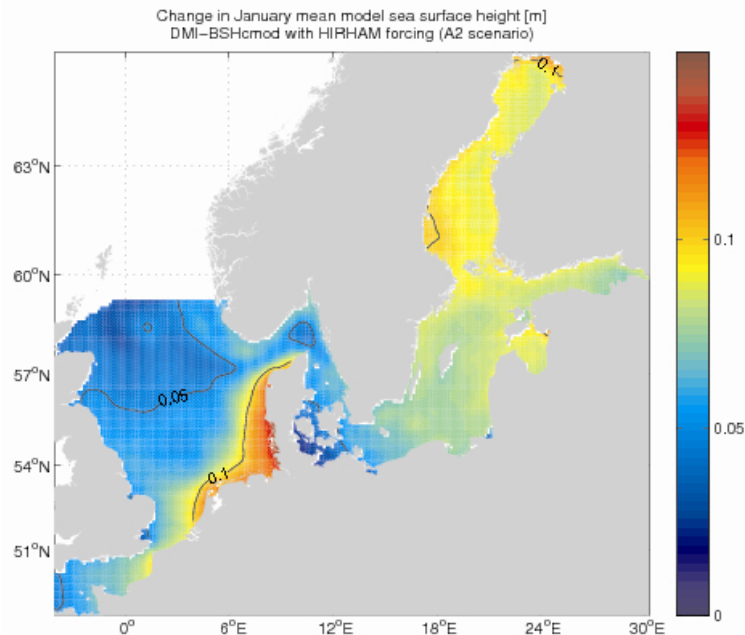
For vurdering af fremtidig vandstand omkring Danmark har vi – i mangel af regionale/lokale beregninger – hidtil benyttet de globale tal fra IPCC. Herved tages der ikke hensyn til regionale og lokale effekter, som er beskrevet i kapitlerne 3 og 4. Der er for A2-scenariet foretaget enkelte beregninger af ændringer i maksimal stormflodshøjde som følge af ændring i vind og hydrografiske forhold, jf. ovenfor.

Den beregning, der ligger til grund for den danske klimatilpasningsstrategi (Regeringen 2008), gælder for A2-scenariet for 2071-2100, hvor det vurderes at den maksimale stormflodshøjde vil

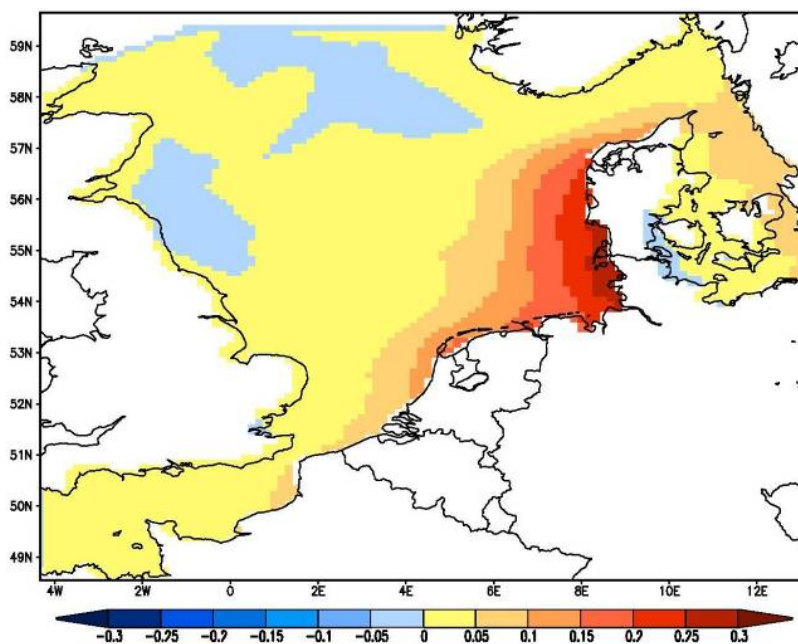
³ Forceringsdata stammer fra Prudence-databasen (<http://prudence.dmi.dk/>), som indeholder resultater fra en række forskellige klimamodelberegninger. De benyttede forceringsdata har relativt moderate ændringer i forhold til andre A2-beregninger.

stige med 1,05 m i Vadehavet som følge af højere vandstand og ændring i vindforholdene.

På basis af de nyeste videnskabelige arbejder, som er publiceret, kunne DMI's hidtidige udmelding synes at være for lav. Men hvorvidt de nye beregninger for *global* vandstandsstigning, som er nævnt i foregående afsnit, bør give anledning til ændring i DMI's udmeldinger, er ikke helt enkelt at afgøre, fordi det har stor betydning, hvad kilderne er til den ekstra stigning, jf. Mitrovica et al., 2001 og 2009.



Figur 3. Ændringer (i meter) i middelvandstanden i januar måned over de næste ca. 100 år forårsaget af ændrede vindforhold. Figuren er baseret på én modelberegning for A2-scenariet. (Madsen, 2009).



Figur 4. Modelberegnete ændringer i den maksimale stormflodshøjde som følge af ændringer i vinden for A2-scenariet. Hertil skal lægges ændringer i middelvandstand. Fra Woth, 2005.



DMI's tidligere udmeldinger har bl.a. været baseret på globale fremskrivninger fra IPCC's tredje hovedrapport fra 2001. De globale fremskrivninger der er anført i **IPCC's AR4**, ser umiddelbart ud til at være lavere, men i AR4-synteserapporten anføres at det kan begrundes at lægge 0,1-0,2 m til de globale fremskrivninger for at tage højde for ændringer i isstrømmene. Hertil kommer at dele af det nordatlantiske område vil opleve højere vandstandsstigninger end det globale gennemsnit, jf. figur 1. Derved kommer resultaterne i AR4 på niveau med fremskrivningerne i IPCC's tredje hovedrapport, og vurderingerne i AR4 giver således ikke i sig selv anledning til ændring i DMI's udmelding.

Hvis man vælger at benytte tallene fra **Grindsted et al. (2009)** er de globale stigninger tre gange højere end dem, der nævnes i AR4, nemlig 0,8-1,2 m for B2 og 0,9-1,4 for A2-scenariet. Der er tale om et statistisk studium, som ikke adskiller størrelsen af de forskellige bidrag til vandstandsstigningen fra de forskellige iskapper og gletschere. Det antages, at bidraget fra termisk udvidelse er velforstået og at små gletsjere og iskapper ikke kan bidrage væsentligt, hvorfor det ekstra bidrag i forhold til AR4-vurderingen iflg. Grindsted et al. mest sandsynligt skyldes accelererende massetab fra den grønlandske iskappe og fra den vestantarktiske iskappe som følge af dynamiske effekter. For A2-scenariet er forskellen mellem AR4-fremskrivningen og Grindsted et al.'s fremskrivning 0,7-0,85 m, og for B2 er forskellen 0,6-0,8 m. Hvis hele det ekstra bidrag kommer fra Antarktis, skal de danske fremskrivninger øges tilsvarende, jf. Mitrovica et al. Hvis derimod hele bidraget kommer fra den Grønlandske iskappe, får det ikke umiddelbart betydning for Danmark. De globale tal fra Grindsted et al. kan derfor ikke omsættes til ændringer omkring Danmark.

Rahmstorf (2007) forudsiger 0,5-1,4 m stigning for viften af SRES-scenarier. Også dette arbejde er et statistisk studium, som ikke adskiller størrelsen af de forskellige bidrag til vandstandsstigningen fra de forskellige iskapper og gletschere. Det betyder, at de globale tal ikke umiddelbart kan omsættes til ændringer omkring Danmark.

Pfeffer et al. (2008) beregner fremtidige globale vandstandsstigninger på mellem 0,8 m og 2 m i 2100 med 0,8 m som mest sandsynligt. Heri indgår 0,3 m fra termisk udvidelse og 0,17 -0,55 m fra gletschere og iskapper uden for Grønland og Antarktis. Denne vurdering indeholder endvidere 0,17 m vandstandsstigning fra afsmeltning af grønlandsk indlandsis for det lave scenario og 0,54 m fra det højeste. Inden for tidshorisonter på århundreder vil disse bidrag kun få lille effekt på vandstande i Danmark, jf. Mitrovica (2001). Fra Antarktis er bidragene ca. 0,14 m for det laveste scenario og 0,62 m fra det høje, men disse tal er særligt usikre. Hvis disse vurderinger skal omsættes til vandstandsstigninger i Danmark, bliver resultatet 0,6 m for det lave og 1,5 m for det høje med 0,6 m som mest sandsynligt.

Kilde Scenario	Globalt		Danmark	
	B2/lavt	A2/højt	B2/lavt	A2/højt
IPCC TAR	0,1-0,65	0,15-0,75	?	?
IPCC AR4 ⁴	0,20-0,43	0,23-0,51	?	?
Grindsted et al.	0,82-1,20	0,93-1,36	?	?
Rahmstorf	0,5	1,4	?	?
Pfeffer et al.	0,8	2,0 ⁵	0,6	1,5

Tabel 2. Oversigtstabel over vandstandsstigninger (m) vurderet i forskellige studier. Til tallene skal lægges ændringer som følge af lokale forhold samt ændringer i vindforhold.

Beregningerne i **Katsman et al. (2008)** for Nordvesteuropa viser stigninger i middelvandstanden på mellem 0,4 og 0,8 m frem til år 2100 for et højt scenario, men også her skal der tages hensyn til lokale effekter, hvis resultatet skal omsættes til ændringer ved danske kyster.

En samlet vurdering af resultater, som er vist i AR4, og de nye studier af globale vandstandsstignin-

⁴ Ekskl. ændringer som følge af fremtidige hurtige dynamiske ændringer i isstrømninger

⁵ Forudsat at alle variable hurtigt accelererer til ekstremt høje værdier. Pfeffer angiver de 0,8 m som mest sandsynligt



ger samt de nyeste undersøgelser af landhævning i Danmark viser, at den udmelding om fremtidig vandstandsstigning for A2-scenariet for Vadehavet, som er anført i den danske strategi for klimatilpasning (Regeringen, 2008), stadig er et rimeligt bud.

På det nuværende videnskabelige grundlag kan vi imidlertid ikke angive en øvre grænse for vandstandsstigninger frem til år 2100, men anbefaler, at muligheden for højere stigninger end anført af IPCC og i tilpasningsstrategien indgår i risikovurderinger.

6. Videre arbejde

Det er af stor betydning for mange brugere (regioner, kommuner, kystsikring, havnemyndigheder, miljømyndigheder etc.) at have oceanografiske data af høj opløselighed til rådighed for lokalområder og for hele perioden frem til 2100. Det drejer sig om parametre som vandstand, stormflodshøjder og -hyppighed, bølgehøjder, temperatur, saltholdighed, havstrømme, iltindhold og vandudskiftning. Sådanne data har betydning for beslutninger om fx kystbeskyttelse, arealanvendelse, miljøforhold og fiskeri.

Den danske strategi for klimatilpasning er baseret på tre fremtidsscenarier, nemlig A2 og B2 samt et scenario, der forudsætter højst to graders global temperaturstigning siden industrialiseringen (EU2C-scenariet). Der er hidtil kun gennemført oceanografiske beregninger for et moderat A2-scenario, men der er behov for beregninger hvor den oceanografiske model forceres med resultater fra forskellige klimamodeller for at belyse usikkerheder. Der er desuden behov for beregninger også for de andre scenarier.

Ved at bruge modeller kommer vi til bedre forståelse af klimasystemets sårbarhed og respons-tider. Ved DKC arbejdes med at koble en dynamisk iskappemodell til både regionale og global klimamodeller for at udforske, hvordan ændringer i klimaet påvirker iskappen. Forbedringer af nuværende iskappemodeller inkluderer en kælvingsmodell svarende til den, som benyttet i studiet af Nick et al. (2009), og kobling med klimamodeller giver viden om, hvordan klima og is påvirker hinanden.

For at omsætte de globale og regionale havniveauændringer til ændringer langs fx danske kyster skal lægges ændringer på grund af ændringer i vind og deraf følgende hydrografiske forhold samt vertikale landbevægelser. DTU Space, KMS, Kystdirektoratet, Farvandsvæsenet og DMI arbejder i øjeblikket sammen for at give en præcis vurdering af landhævningen. Hertil skal gennemføres dels beregninger med klimamodeller for relevante scenarier for fremtidige udslip af drivhusgasser og andre stoffer, som påvirker klimaet, dels beregninger med tilknyttede oceanografiske modeller. Det vil også være relevant at udføre studier af ændring i tidevandet ved den Jyske Vestkyst i et scenario med højere vandstand, ligesom en bølgemodell kan benyttes til at vurdere ændringer i bølgeforhold i farvandene, når vanddybden øges.

Referencer

1. Carlson, Anders E., Legrande, A.N., Oppo D.W., Came, R.E., Schmidt G.A., Anslow F.S., Licciaedi J.M. og Obbink, E., 2008: Rapid early Holocene deglaciation of the Laurentide ice sheet. *Nature geoscience*, doi:10.1038/ngeo285.
2. Grinsted, A., J. C. Moore, and S. Jevrejeva (2009), Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100AD, *Clim. Dyn.*, <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-008-0507-2>.
3. Holgate, S., S. Jevrejeva, P. Woodworth, and S. Brewer (2007): Comment on "A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise". *Science* 317, 1866, DOI: 10.1126/science.1140942.
4. IPCC, 2000: Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Nakićenović, N. et al., 2000. Cambridge University Press, pp. 598.



5. IPCC, 2001: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) J. T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden and D. Xiaosu (Eds.) Cambridge University Press, UK. pp 944
6. IPCC, 2007: Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC og Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp. En dansk oversættelse af synteserapportens sam-mendrag for beslutningstagere er tilgængelig på www.dmi.dk
7. Jevrejeva, S., A. Grinsted, J. C. Moore, and S. Holgate (2006), Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records, *J. Geophys. Res.*, 111, C09012, doi:10.1029/2005JC003229.
8. Katsman, C.A., W. Hazeleger, S.S. Drijfhout, G.J. van Oldenburg og G. Burgers, (2008): Climate scenarios of sea level rise for the Northeast Atlantic Ocean: a study including the effects of ocean dynamics and gravity changes induced by ice melt. *Climate change* 91, 351-374.
9. Knudsen, S.B., C. Sørensen, and P. Sørensen (2008): Analyse af Middelvandstande i Vadehavet. Kystdirektoratet, Danmark, 38p.
10. Landerer, F.W., J.H. Jungclauss, and J. Marotzke (2007): Regional Dynamic and Steric Sea Level Change in Response to the IPCC-A1B Scenario. *J. Phys. Oceanogr.*, **37**, 296–312
11. Luthecke et al. Recent Greenland Ice Mass Loss by Drainage System from Satellite Gravity Obs.Science 24 November 2006: 1286-1289 DOI: 10.1126/science.1130776.
12. Lowe J.A and J.M Gregory, 2005: The effects of climate change on storm surges around the United Kingdom. *Phil. Trans. R. Soc. A* 15 June 2005 vol. 363 no. 1831 1313-1328. <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/363/1831/1313.full>
13. Madsen, K.S. (2009): Recent and future climatic changes in temperature, salinity, and sea level in the North Sea and the Baltic Sea. Ph.d.-afhandling, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet. <http://www.gfy.ku.dk/~kristine/thesis> (under bedømmelse).
14. Meier H.E.M, Broman, B. og Kjellström E, 2004: Simulated sea level in past and future climates of the Baltic Sea. *Clim Res Vol. 27*, 59-75.
15. Milne, G.A., W.Roland Gehrels, Chris W. Hughes og Mark E. Tamisiea (2009): Identifying the causes of sea-level change. *Nature Geoscience*, 2, 471-478, DOI: 10.1038/NGEO544.
16. Mitrovica Jerry X., Mark E. Tamisiea, James L. Davis & Glenn A. Milne (2001) Recent mass balance of polar ice sheets inferred from patterns of global sea-level change. *Nature*, 409, 1026-29.
17. Mitrovica Jerry X., N. Gomez and P. Clark (2009): The Sea-Level Fingerprint of West Antarctic Collapse. *Science*, 323, 753
18. Nick, F. M, A. Vieli, I.M. Howat and I. Joughin (2009), Large-scale changes in Greenland outlet glacier dynamics triggered at the terminus, *Nature Geoscience* Published online: 11 January 2009 | doi:10.1038/ngeo394
19. Pfeffer, W.T., J.T. Harper, S.O'Neel, 2008. Kinematic Constraints on Glacier Contributions to 21st-Century Sea-Level Rise. *Science*, 321, 1340-1343.
20. Rahmstorf, S., 2007. A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise, *Science*, 315,368-370.
21. Rahmstorf, S., 2008. Response to Comments on "A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise". *Science*, 317,1866d.
22. Raper, S.C.B., and R.J. Braithwaite, 2006. Low sea level rise projections from mountain glaciers and icecaps under global warming. *Nature*, 439, 311-313
23. Regeringen, 2008: Strategi for tilpasning til klimaændringer i Danmark. Tilgængelig på <http://ens.dk/da-DK/KlimaOgCO2/Klimatilpasning/StrategiForKlimatilpasning/Sider/Forside.aspx>
24. Rohling, E.J., Grant K., Hemleben, Ch., Siddall M., Hoogakker B.A.A., Boæshaw M. og Kucera M., 2007: High rates of sea-level rise during the last interglacial period. *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo.2007.28



25. Schmith, T., S. Johansen, and P. Thejll, 2007: Comment on “A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise”. *Science*, 317, 1866, doi: 10.1126/science.1143286
26. von Storch, H., E. Zorita and J.F. González-Rouco, 2008: Relationship between global mean sea-level and global mean temperature and heat flux in a climate simulation of the past millennium, *Ocean Dyn.* doi 10.1007/s10236-008-0142-9
27. Veerman, C. C. (Chairman) (2008): Working together with water, A living land builds for its future. Findings of the Deltacommissie 2008. <http://www.deltacommissie.com/en/advies>
28. Woth, K., 2005: Regionalization of global climate change scenarios: An ensemble study of possible changes in the North Sea storm surge statistics. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften im Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg. Tilgængelig på http://coast.gkss.de/staff/woth/PAPER/Thesis_IMPRS_Woth.pdf
29. Woth, K., R. Weisse, and H. von Storch (2006) Climate change and North Sea storm surge extremes: an ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different regional climate models. *Ocean Dynamics*, 56, 3-15.

Tidligere rapporter

Tidligere rapporter fra Danmarks Meteorologiske Institut kan findes på adressen:
<http://www.dmi.dk/dmi/dmi-publikationer.htm>