

Ændringer af havniveauet i Danmark de næste 100–200 år

Resumé

Havniveauet ved alle danske kyster undtagen i Nordjylland er stigende, og stigningerne forventes at blive kraftigere i de næste 100–200 år på grund af klimaforandringer. Stigningsraten er forbundet med en del usikkerhed, især på grund af usikkerhed i bidraget fra smeltende gletsjere og iskapper, men havspejlet omkring Danmark forventes at stige $0,8 \pm 0,6$ m og maksimalt 1,5 m frem til år 2100. Stigningen kompenseres delvist af landhævninger, ligesom der er mindre forskelle i havspejlsændringerne mellem landsdelene. Ændringerne i havniveau vil sammen med ændrede vindmønstre føre til øgede stormflodshøjder.

Fortidig havniveau

Figur 1A viser udviklingen i det globale havspejl de seneste 140.000 år. Det globale havspejl i sidste mellemistid (Eem) for omkring 120.000 år siden var ca. 6 m højere end i dag. Temperaturen var samtidigt globalt set $1\text{--}2^\circ\text{C}$ højere end i dag. For ca. 22.000 år siden under sidste istids maksimum var det globale havspejl lavere end i dag, fordi store mængder vand var bundet i store isdækker på land. I perioden frem mod i dag (22.000 til for 5000 år siden) steg havspejlet ca. 120 m, først og fremmest fordi en stor del af den is, der havde været bundet i iskapper og gletsjere smeltede. De seneste 5000 år er havspejlet omkring Danmark i gennemsnit steget ca. 1 mm/år. Naturlige variationer i klimaet har betydet, at stigningsraten har varieret lidt.

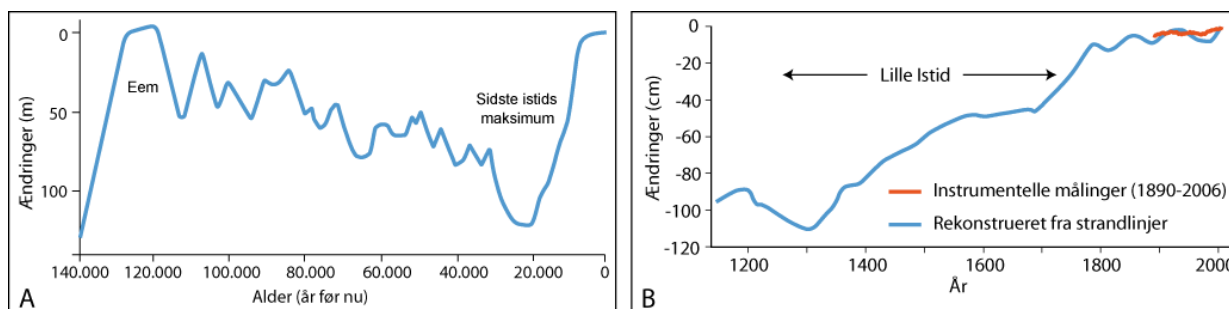
Faktaboks

Havniveau: havets middelhøjde i forhold til kysten, altså inklusiv landhævning.

Havspejl: havets middelhøjde i en absolut referenceramme, altså eksklusiv landhævning.

Sterisk bidrag: udvidelse af verdenshavet på grund af opvarmning.

Eustatisk bidrag: tilførsel af vand fra smeltende gletsjere og iskapper.



Figur 1. A. Globale havspejlsændringer i de sidste 140.000 år. B. Udviklingen af havspejlet i Danmark på basis af strandlinjer og målinger, korrigeret for lodrette bevægelser i undergrunden. De instrumentelle målinger er midlet over 19 år og viser derfor relativt små udsving.

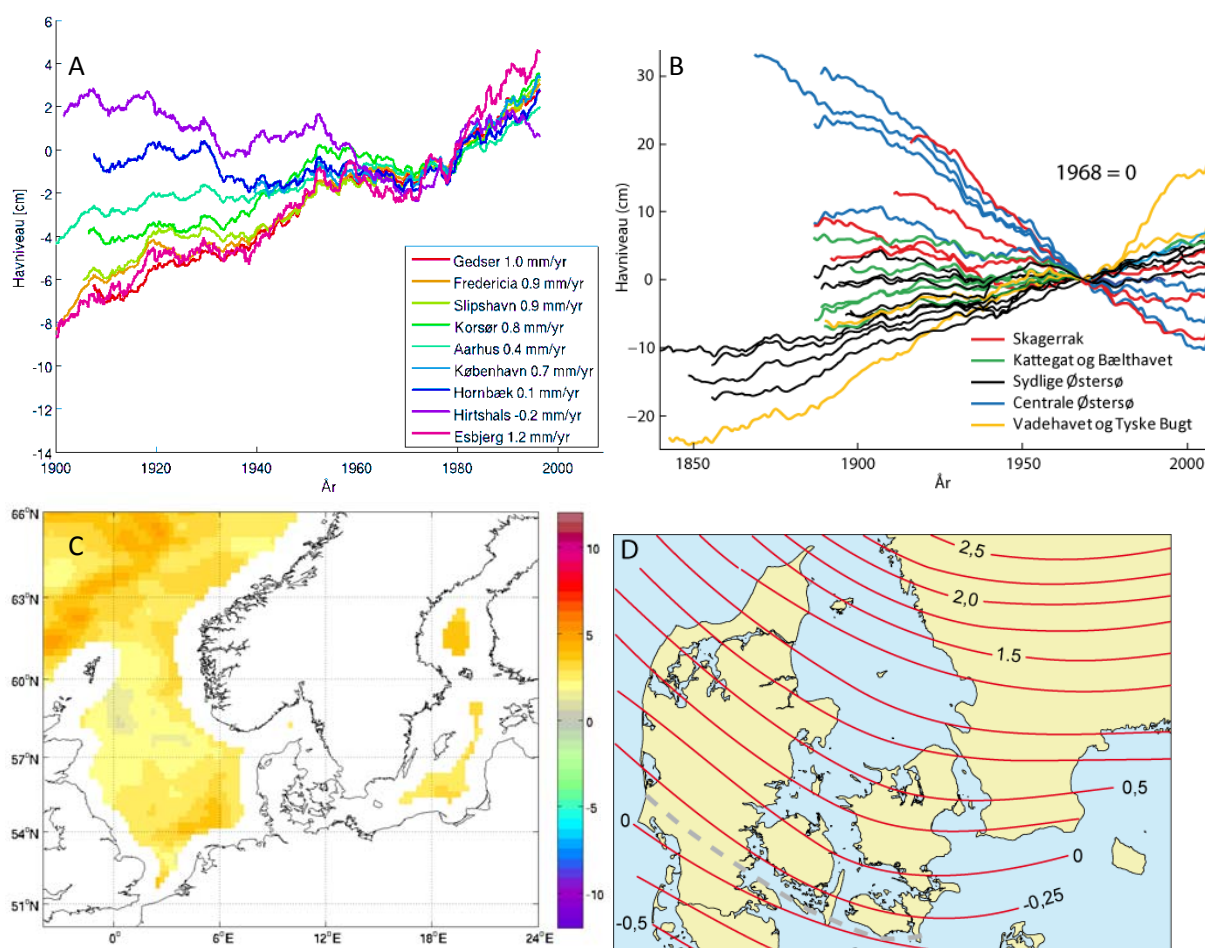
De seneste 900 år viser geologiske undersøgelser, at havspejlet omkring Danmark generelt har været stigende med rater mellem $1,6$ mm/år i Middelalderen og ca. $0,5$ mm/år i perioden efter 1750 (Figur 1B). Efter 1750 overlejres den generelle stigning i strandlinje-kurven af svingninger med godt 70 års mellemrum med toppe omkring 1790, 1860, 1920–50 og nu. De instrumentelle data strækker sig over en meget kortere periode (1890–2006) end de geologiske data, men viser ikke en periodisk svingning på godt 70 år (Figur 1B og 2).

Nutidige målinger

Havniveauet ved de danske kyster måles i dag af et stort antal vandstandsmålere. 10 af disse stationer har kvalitetssikrede data fra ca. 1890 og drives af DMI (Figur 2A). I Danmark og regionen umiddelbart omkring Danmark (dvs. mellem Stavanger, Stockholm, Swinoujscie og

Cuxhaven) findes i alt 29 vandstandsmåleserier af mere end 70 års varighed (Figur 2B). Disse målinger viser betydelige forskelle i de målte udviklingstendensen for vandstandene fra betydelige fald i regionens nordøstlige del til betydelige stigninger i regionens sydvestlige del. Dette skyldes, at undergrunden i det nordøstlige Danmark bevæger sig opad, mens der sker en indsynkning i det sydvestligste Danmark og Nordtyskland (Figur 2D), og at havspejlet i havene omkring Danmark generelt er stigende (Figur 2A og B). De lodrette bevægelser af undergrunden har afgørende betydning for korrektionen og dermed for fortolkningen af de målte vandstande.

Siden 1993 har det globale havspejl kunnet måles fra satellit. Den globale stigningstakt frem til i dag er $3,2 \pm 0,6$ mm/år. Stigningstakten varierer globalt, og i Nordsø-Østersø området ses stigningstakter på 1–4 mm/år (Figur 2C). Satellitproduktet kan ikke bruges i kystnære egne uden supplerende databehandling, og det bemærkes at satellitmålingerne generelt viser højere værdier for havspejlsstigningen (Figur 2C) end vandstandsmålingerne (Figur 2A).



Figur 2. A. 19 års løbende middelværdi af havniveauet ved 9 danske stationer med angivelse af den gennemsnitlige stigningstakt for år 1901–2000 (usikkerhed 0,2 mm/år). I figuren er middelværdien for år 1960–1990 fratrukket. B. 19 års løbende middelværdi af havniveauet ved danske stationer og stationer i vore nabolande (alle danske stationer ligger midt i kurvebilledet). Effekten af landhævning er stor i den centrale Østersø og i det nordlige Skagerrak, hvorfor der ses faldende havniveau. I den sydlige Østersø og i Vadehavet og Tyske Bugt er havniveauet stigende, da der i dette område er landsænkning eller kun svag landhævning. C. Havspejlets stigningstakt i mm/år for perioden oktober 1992 – december 2010, målt fra satellit. Data nærmere end 50 km fra kysten er masket ud.

Undergrundens lodrette bevægelser (mm/år). Den stiplede linje viser grænsen mellem to områder, der følger forskellige bevægelsesmønstre. Herved fremkommer to 0-linjer (Nissum Fjord-Nyborg-Præstø og Fanø-Sønderborg-Gedser), hvor undergrunden hverken stiger eller falder.

Fremskrivninger af klimaet

Beregninger af konsekvenserne af de menneskeskabte ændringer i mængden af atmosfæriske drivhusgasser har primært været fokuseret på et tidsperspektiv frem til år 2100. Der er dog specielt i de seneste år gennemført flere studier, som ser på, hvad et ændret niveau i drivhusgaskoncentrationerne betyder også flere århundreder efter 2100. Her er antagelsen typisk at emissioner af drivhusgasser ophører helt efter 2100. En nylig offentliggjort artikel gør en slags status og forholder sig til den langsigtede betydning af modvirkning af klimaændringer. Et resultat herfra er en klar sammenhæng mellem ageren på kort sigt og den langsigtede klimaudvikling frem til år 3000. Der er således sammenhæng imellem hvor hurtigt de globale drivhusgasudledninger topper, hvor hurtigt udledningerne efterfølgende aftager, og det niveau temperaturen efterfølgende kan stabiliseres på. Samtidig viser artiklen, at selv en fortsat udledning af drivhusgasser på 10% af de nuværende udledninger efter år 2100, under antagelse af en middel klimafølsomhed, vil medføre en fortsat temperaturstigning og dermed umuliggøre en opfyldelse af 2-graders målsætningen i løbet af de næste 1000 år.

Globale havspejlsændringer

Den globale havspejlsstigning består primært af et sterisk bidrag og et eustatisk bidrag (se faktaboks). Fysikken bag det steriske bidrag er i hovedtrækkene kendt, og usikkerheden på dette bidrag knytter sig mest til hvordan temperaturstigningerne bliver i fremtiden, og dermed til udledningerne af drivhusgasser. Det eustatiske bidrag afhænger også af temperaturudviklingen, men der forskes også intensivt i hvordan der vil ske dynamisk formindskelse af iskapperne på grund af øget flydehastighed.

Tabel 1: Forskellige vurderinger af globale havspejlsændringer i fremtiden (meter)

År 2100	År 2200	Kilde
0,18–0,58		IPCC (2007)
1 ± 0,5		AMAP (2009)
0,75–1,9		Vermeer & Rahmstorf (2009)
1,2		Grinsted et al. (2010)
0,57–1,1	0,6–4	Jerevjeva et al. (i tryk)
0,65–1,3	2–4	Deltacommissie (2008, Holland)

For øjeblikket vurderes det, at mindre lokale iskapper og gletschere bidrager med ca. 402 ± 95 gigaton vand pr. år, svarende til ca. 1 mm/år, hvis smeltevandet fordeles ensartet over oceanerne. Indlandsisen i Grønland bidrager med 250 ± 40 gigaton, svarende til ca. 0,6 mm/år, og isdækket i Vestantarktis bidrager med 200 ± 40 gigaton, svarende til ca. 0,5 mm/år. Samtidigt betyder det varmere klima, at temperaturen i havene stiger, og det betyder at havvandet udvider sig.

Landsdækkende havspejlsændringer, år 2100

Den globale stigning i vandstanden vil fordele sig ujævnt af flere grunde. Dels vil smeltende gletsjere og iskapper betyde et ændret globalt tyngdefelt, dels vil der være afledede effekter af

det steriske bidrag og ændrede strømforhold (dynamiske ændringer). Ændringerne i tyngdefeltet kan beskrives ved at de store iskapper i Grønland og Antarktis 'trækker i havvandet'. Hvis Grønlands iskappe skrumper, bevirker dette, at havspejlet falder omkring Grønland. Det betyder også, at massetabet fra Grønlands iskappe ved den samme afsmeltning betyder relativt mindre for havspejlet i havene omkring Danmark end massetabet fra Antarktis.

Fremtidige havspejlsstigninger i Danmark kan opdeles i den stigning der forventes for Danmark som helhed, og lokale variationer. De lokale variationer er mindre end den landsdækkende stigning. Tabel 2 giver et overblik over de bedste estimater af de forskellige bidrag til Danmarks havspejlsændringer samt et øvre estimat. Tallene i tabel 2 er højere end tallene i den seneste rapport fra IPCC fra 2007, der forudsiger en stigning i havspejlet på 18–58 cm ved år 2100. Det skyldes primært at der i IPCC rapporten er set bort fra hurtige isdynamiske ændringer i Grønland og Antarktis. Det skal understreges, at tallene i tabel 2 baserer sig på den antagelse, at der ikke sker bratte klimaændringer.

Tabel 2: De enkelte bidrag til havspejlsstigninger i Danmark omkring år 2100, antaget at drivhusgasudledningen vil følge SRES A1B scenariet, udarbejdet i samarbejde med ph.d. Aslak Grinsted, Københavns Universitet (Kilde: The BACC Author Team, 2014, under revision).

	Bedste estimat	Øvre estimat
Sterisk	0,2 ± 0,1 m	0,3 m
Gletsjere	0,2 ± 0,1 m	0,2 m
Grønlands iskappe	0,2 ± 0,2 m	0,3 m
Antarktis' iskappe	0,2 ± 0,4 m	0,4 m
Ændret grundvandsspejl	0 m	0,1 m
Tyngdeeffekter + dynamiske ændringer	0,0 ± 0,3 m	0,2 m
Total	0,8 ± 0,6 m	1,5 m

Lokale variationer i havspejlsændringerne

Når der ses bort fra undergrundens lodrette bevægelser (se nedenfor), forventes der kun at være små forskelle i ændringerne i havniveauet fra landsdel til landsdel. Øget vestenvind ved den jyske vestkyst kan give et bidrag til øget havspejl om vinteren på ca. 0,1 m i år 2100. Lokale ændringer i havets salt og temperatur vil påvirke havspejlet, men ændringerne forventes at være mindre end den naturlige variabilitet.

Havspejlsændringer, år 2200

Det forventede havspejl omkring år 2200 er svært at give et kvalificeret estimat på. Til dette tidspunkt vil udviklingen primært være bestemt af drivhusgaskoncentrationen, som vi i sagens natur kun kender i meget grove træk, idet den afhænger af fremtidens udledninger af drivhusgasser.

Det er rimeligt at antage at selvom det lykkes at nedbringe udledningen af drivhusgasser, så vil koncentrationen stadig ligge på et betydeligt højere niveau end nu, idet tidsskalaen for nedbrydning af kuldioxid i atmosfæren er af størrelsesorden 100 år. Ydermere er tidsskalaerne for både vertikal diffusion af varme i oceanet og iskappedynamik af samme størrelsesorden eller længere, hvilket betyder at vandstandsstigningen vil fortsætte i meget lang tid efter stabilisering af drivhusgasniveauet.

Samlet set indeholder Jordens iskapper en ismængde svarende til ca. 70 m stigning i vandspejlet. En total nedbrydningen af Grønlands iskappe, som repræsenterer en global stigning på 7 meter, er usandsynlig inden for de næste 1.000 år. Ligeledes tyder alt på at størstedelen af Antarktis' iskappe er stabil og endda vil vokse lidt i et varmere klima, med undtagelse den Vestantarktiske iskappe, med et potentiale på 3–5 m eustatisk stigning.

Tilgængelige estimater af den globale havspejlsstigning omkring år 2200 er listet i tabel 1, og spænder fra 0,6 m til 4 m.

Landhævning og kystprocesser

For at omregne havspejlsændringer til havniveauændringer, skal der tages højde for lodrette bevægelser af undergrunden (isostasi, tektonik m.m.) og ændrede kystprocesser som følge af ændrede vindmønstre og stormstyrker.

Isostasi (lodrette bevægelser af undergrunden) og lokale havniveauændringer

Lodrette bevægelser af Jordens faste skorpe er centrale for prognoserne for havspejlets højde. For det første er havniveauet de enkelte steder en sum af de globale/regionale havspejlsændringer og de regionale/lokale bevægelser af undergrunden. For det andet forudsætter bestemmelsen af oceanernes havspejl et godt kendskab til undergrundens bevægelser de pågældende steder. Imidlertid bygger hovedparten af de isostatisk bestemte bevægelser af bevægelserne under oceanerne og iskapperne på korte måleserier fra satellitter, mens de isostatisk bestemte bevægelser også er bestemt ved hjælp af klassiske metoder (hældning af gamle strandlinjer, langvarige vandstandsmålinger, geofysiske modeller m.m.) i de tidligere nedisede områder i Skandinavien, England og Nordamerika. Her ses ikke uvæsentlige forskelle i bestemmelsen af undergrundens bevægelser mellem klassiske metoder og satellitmålingerne. Der arbejdes på at opnå konsistens i de mål for landhævningen, der fremkommer ved de forskellige metoder, og som anvendes af forskellige institutioner i Danmark.

Kystprocesser

I takt med at klimaet ændrer sig, sker der en ændring i vindretninger og i stormstyrker og frekvenser. Dette er særligt vigtigt for de lokale kystprocesser, fordi ændrede vindretninger og højere vindhastigheder har betydning for de processer, der danner og vedligeholder kystens form. Nogle steder vil der lægge sig mere sand langs kysten, således at kysten udbygges og havspejlsændringer ikke vil have så stor betydning. Andre steder vil materiale blive fjernet, og der kan opstå øget mulighed for erosion af kysten og oversvømmelse af lavtliggende områder.

Stormfloder

Det største bidrag til ændringer i stormflodshøjder forventes at blive den generelle ændring i havniveauet og effekten på kystlinjen af de ændrede vindretninger. Derudover estimeres det at amplituden af en stormflod langs den jyske vestkyst kan øges med 0,3–0,5 m frem mod år 2100 på grund af ændrede vindmønstre, mens der ikke forventes øget amplitude i de indre danske farvande. Den øgede vandstand har stor betydning for, hvor ofte en given tærskelværdi vil blive overskredet. Ved en stigning i vandstanden på 0,8 m samt yderligere 0,3 m ved den jyske vestkyst vil det der i dag er en 400 års hændelse i Esbjerg statistisk set forekomme ca. hvert 10. år, mens det tilsvarende tal for København er ca. hvert 2. år.

Konklusion

Det dominerende bidrag til stigning i havspejlet omkring Danmark stammer fra den globale stigning. Havspejlet omkring Danmark forventes at stige med $0,8 \pm 0,6$ m frem til år 2100. Omkring år 2200 vurderes det globale havspejl at være steget med 0,6–4 m. På kortere sigt – over de næste årtier – er der enighed om, at der kan ventes flere og kraftigere storme, som kan føre til hyppigere oversvømmelser af lavtliggende kystområder, som vi allerede oplever nu. På længere sigt – i et perspektiv på et århundrede eller mere – vil havspejlsstigningen og effekterne af ændrede vindforhold spille sammen og føre til øgede stormflodshøjder.



Figur 3. Samlet vurdering af havniveaustigninger i år 2100 i forhold til i dag.

Fremtidigt arbejde

Der arbejdes i international sammenhæng med sigte på at bidrage til IPCC kommende 5. hovedrapport (AR5) med mere komplekse modeller til at se på forløbet i al fald frem til 2300. Et eksempel er Ice2Sea projektet under EU's 7. rammeprogram, bl.a. med deltagelse fra DMI og GEUS. Dette arbejde vil bl.a. forholde sig til, hvad sådanne scenarier betyder for massebalancen af Grønlands og Antarktis' Indlandsis. Resultaterne forventes først klar i løbet af første halvår 2012. Med de nye udslipsscenarier, som er udviklet med henblik på AR5, er der også i de kommende år åbnet for tiltag med kompleks modellering. DMI bidrager også til IPCC arbejdet med simuleringer med de nyeste globale klimamodeller, der er i stand til at beskrive udvekslingen af vandmasser igennem de indre danske farvande. En nøjere analyse af disse simuleringer kan derfor give et forbedret estimat af de dynamiske effekter.

DMI vil fortsætte de kvalitetssikrede danske vandstandsmålinger og vil fortsat deltage i EUMETSAT's Jason program til satellitmåling af havspejlet. DMI m.fl. har desuden foreslået et projekt til at kombinere kystnære satellitmålinger med kystbaserede vandstandsmålinger til bestemmelse af havspejlsændringerne ved de danske kyster, men endnu ikke opnået finansiering af dette. GEUS vil gerne deltage heri med levering af data for undergrundens lodrette bevægelser.

GEUS vil endvidere foretage en fremskrivning af de seneste 250 års naturlige niveauændringer af havområderne omkring Danmark og foretage en sammenligning med faktiske ændringer for at estimere bidraget fra menneskeskabte ændringer samt medvirke til en ensartet opfattelse af hvorledes isostasien i Danmark bedst kan vurderes.