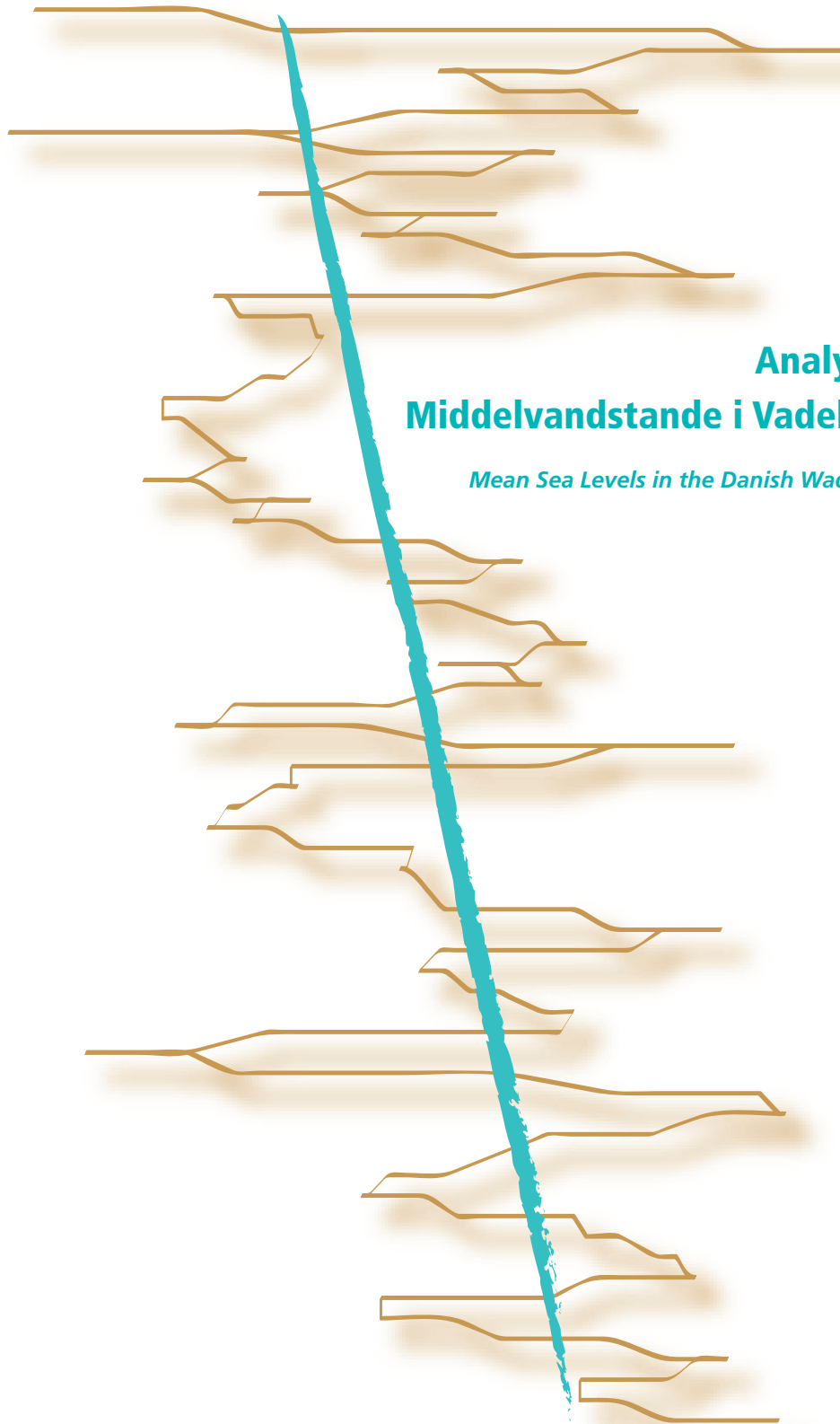


Middelvandstande i Vadehavet



Analyse af Middelvandstande i Vadehavet

Mean Sea Levels in the Danish Wadden Sea

Middelvandstande i Vadehavet



Projekt	Analyse af middelvandstande i Vadehavet
Startdato	Maj 2007
Slutdato	April 2008
Projektansvarlig (PA)	Per Sørensen
Projektleder (PL)	Carlo Sørensen
Projektmedarbejdere (PM)	Søren Bjerre Knudsen Carlo Sørensen Per Sørensen Irene Andersen Birgit Byskov Kloster
Timeregistrering	071.39
Kontering	071.39
Godkendt den 22.05.2008	

Rapport	Analyse af middelvandstande i Vadehavet
Forfattere	Søren Bjerre Knudsen Carlo Sørensen Per Sørensen
Nøgleord	Vadehavet, middelvandstande, påvirkninger af vandstande, vandstandsanalyse, Unscrambler
Distribution	www.kyst.dk, Transportministeriet, Det Kongelige Bibliotek
Refereres som	Knudsen, S.B.; Sørensen, C. & Sørensen, P. (2008). Analyse af Middelvandstande i Vadehavet. Kystdirektoratet. 38p.

Resumé

Analyse af middelvandstande i Vadehavet

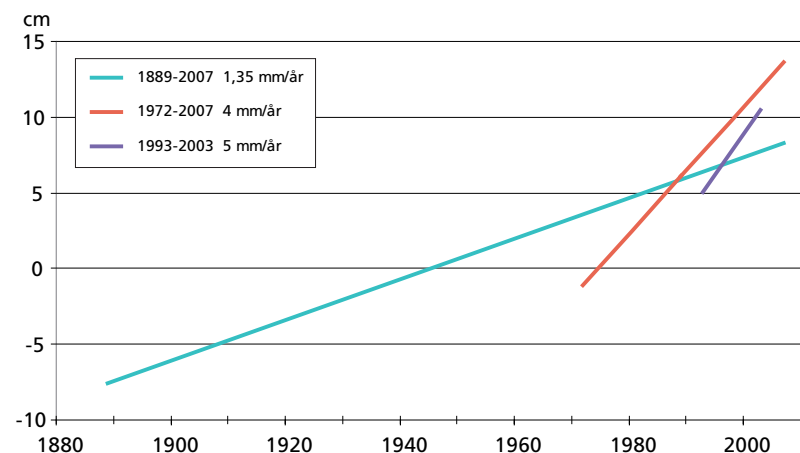
Knudsen, S.B.; Sørensen, C. & Sørensen, P, 2008. Kystdirektoratet. 38p.

Kystdirektoratet har undersøgt data fra vandstandsmålere i den danske del af Vadehavet for at beskrive langtidsudviklingen i middelvandstandene. Nogle vandstandsmålere måler ikke de laveste vandstande korrekt og andre har kun målt i en kort årrække. Disse er udeladt af analysen, der derfor er foretaget på vandstandsmålinger fra Esbjerg og Havneby (Rømø). I analysen er det forsøgt at fjerne vindens bidrag til middelvandstandene.

Vandstanden i Vadehavet varierer som følge af især tidevandet og meteorologiske forhold som vind og lufttryk. Tidevandet fører til vandstandsændringer på 1,2 - 2,0 m to gange i døgnet, medens storme kan forøge vandstanden med op til 5 meter. En vintermåned med megen vestenvind vil, alt andet lige, medføre en højere generel vandstand end en måned med roligt vejr eller østenvind. Denne generelle vandstand, middelvandstanden, udviser da også stor variation fra måned til måned og fra år til år. Hvis udviklingen i middelvandstanden ikke kan forklares ud fra de meteorologiske forhold, vil denne skyldes ændringer i havspejlets niveau, da landet tilsyneladende ikke hæver eller sænker sig nævneværdigt i Vadehavsområdet.

Resultaterne viser, at vandstanden stiger i Vadehavet, og at stigningstakten (den gennemsnitlige stigning pr. år) er øget de seneste 35 år. Der iagttages med andre ord en accelereret havspejlsstigning gennem de senere år.

Stigningen i middelvandstandene for perioden 1889-2006 er gennemsnitligt 1,35 mm/år i Esbjerg. Når en væsentlig del af den lokale vindpåvirkning er fjernet, ses en stigning på ca. 4 mm/år i perioden 1972-2007, og der ses en stigning på ca. 5 mm/år for perioden 1993-2003, jf. figuren. Resultaterne udviser god overensstemmelse med foreløbige resultater fra Dansk Rumcenter baseret på satellitmålinger.



Stigningstakter for middelvandstande i Vadehavet (Esbjerg) for tre forskellige perioder

Sammenlignes analysens resultater med gennemsnitlige stigninger beregnet ud fra satellitdata i perioden 1993-2003, stiger vandstanden mere i Vadehavet (5 mm/år) end både globalt (3 mm/år) og i Nordsøen (2,3 mm/år).

Den større vandstandsstigning i det danske Vadehav end i de globale midler er i overensstemmelse med resultater fra de hollandske og tyske dele af Vadehavet. Ligeledes har andre undersøgelser vist, at vandstandene på kysterne i perioder stiger mere end på åbent hav, medens det omvendte er tilfældet i andre perioder.

Rapporten forholder sig ikke til, hvorvidt den nuværende store stigning er udtryk for en længerevarende trend i vandstandsudviklingen (klimaændringer) eller er en svingning, men det konkluderes, at de fremlagte stigningstakter for middelvandstande i Vadehavet er reelle og ikke skyldes lokale meteorologiske forhold. Ligeledes konkluderes at stigningstakterne de senere år er højere end prognoserne fra FN's internationale klimapanel, IPCC, foreskriver. Der er således god grund til fortsat at følge udviklingen i middelvandstandene.

Rapporten "Analyse af middelvandstande i Vadehavet" kan hentes i sin helhed på Kystdirektoratets hjemmeside, www.kyst.dk .

English Summary

The report “Mean Sea Levels in the Danish Wadden Sea” presents an updated re-analysis of water level measurements from gauge stations in the Danish Wadden Sea.

Results show a rate of rise in the mean sea level of approximately 4 mm/y in the period 1972-2007 and a rise of approximately 5 mm/y is found in the period 1993-2003. This compares to an average rate of sea level rise of 1.3 mm/y in the 20th century at Esbjerg, and thus points to an increased rate in recent years. This is in accordance with published results from elsewhere in the North Sea region in recent years and with preliminary results from the Danish National Space Center from satellite measurements. As to whether the measured larger rate of sea level rise in the last 35 years is due to a long-term trend or is due to short-term climatic periodicities, the report remains inconclusive.

The Danish Meteorological Institute (DMI) has recorded water levels at Esbjerg since 1889 yielding a very good series for evaluating long-term trends (refer to Figure 9 for locations). From originally recording every hour the gauge station now records every 10 minutes. Further, at Højer DMI has measured since 1920. Since 1972 the Danish Coastal Authority (DCA) has maintained gauge stations at Esbjerg, Ribe, Ballum, Højer, and Havneby, since 1997 at Grådyb, and since 2000 at Brøns and Mandø. Due to the very short data series the latter three stations are excluded in the analysis. Further, the stations at Ribe, Ballum, and Højer do not represent low water levels properly and focus in the analyses therefore is on the series from Esbjerg (DCA; DMI) and Havneby (DCA).

All data are related to the Danish DVR90 datum. Methodologically the series have been investigated to locate periods without recordings and to find differences between series. A systematic deviation of 7 cm between the DMI and DCA series at Esbjerg 1972-1990 is unaccounted for but is probably due to either levelling errors or to previous and undocumented corrections. Instead of the total number of measurements in a series, the number of days or hours with at least one measurement are counted in the analyses, thus avoiding to have to take into account the theoretical number of measurements (e.g. when increasing the recording frequency). Trend analyses have then been performed on both the original series, on a corrected KDI-series from Esbjerg, and on series where periods without recordings have been substituted by mean water levels from neighbouring stations.

The weather influences the water level in the Wadden Sea and consequently also the mean water levels, regardless of whether the trends calculated are based on weekly, monthly or yearly means. Also, the start year, the end year, the length of the analysed period, and periods without measurements have implications on the results. Analyses have been made for weekly, monthly, and yearly means, where the weekly means are believed to yield the most correct results, and where meteorological conditions are taken into account. Here local wind measurements have been used.

By Unscrambler analysis 51 climatic variables have been investigated and the best correlation to water level variations ($r = 0.92$, 86% of the variance) is found by the variable:

$(0.8 + 0.065 * \text{Wind speed}) * (\text{Wind speed})^2 * \cos(\text{Wind direction} - 250^\circ)$, that takes into account the wind friction and projects the power of the wind on the direction 250° . A good correlation to the NAO-index is also found. According to Wakelin *et al.* (2003) a positive NAO-index leads to an increase in mean water levels at the Danish Wadden sea coast.

Table 1 gives an overview of the calculated results, where the short-term period 1993-2003 is chosen for a comparison to available global sea level measurements by satellite at the time of analysis. The sea level rise in the Danish Wadden Sea is currently larger than the global average, and a higher rate of rise is measured at the coast than is apparent in the local North Sea trend (Figure 7; data from 4° longitude, 56° latitude downloaded from <http://sealevel.colorado.edu/wizard.php>). The measured sea level rises are mainly due to eustatic effects as glacio-isostatic movements are believed to be small in the Danish Wadden Sea.

Indholdsfortegnelse

Resumé	3
English Summary	5
Forord	8
Konklusioner	9
Indledning	10
Vandstandsudvikling de seneste 120 år	12
Satellitmålinger af havspejlsniveau.....	14
Lokale trends og kobling til regionale fysiske forhold	16
Prognoserne fra IPCC	18
Datagrundlag og korrektion af dataserier	19
Arbejdsmetode	23
Vandstandsmålinger	23
Vindmålinger	23
Valg af perioder for analyse	24
Analyse og resultater	26
Årsmidlede vandstande 1889-2006 uden korrektion for isostasi	26
Undersøgelse i 2006 af KDI vandstande, Esbjerg 1972-2005	27
Udvikling i middelvandstanden, hvor vindens indflydelse er fjernet	28
Årlige middelvandstande fra KDI-måleren i Esbjerg	30
Månedlige middelvandstande fra KDI-måleren i Esbjerg	30
Månedlige middelvandstande fra DMI-måleren i Esbjerg	30
Ugentlige middelvandstande fra KDI-måleren i Esbjerg	31
Ugentlige middelvandstande fra DMI-måleren i Esbjerg	31
Ugentlige middelvandstande fra KDI-måleren i Havneby	31
Oversigt over de beregnede stigninger i vandstanden	31
Diskussion	33
Referencer	36
Bilag	
Scripts og regler for udvælgelse af data.....	Bilag 1
Påvirkning af middelvandstande - undersøgte udtryk i Unscrambler.....	Bilag 2
Resultater af datakørsler.....	Bilag 3

Forord

Set over de seneste 120 år hersker der ikke tvivl om, at middelvandstanden i den danske del af Vadehavet er steget. Vi ved også, hvor stor stigningen har været set over hele perioden.

Satellitmålinger viser en stigning i den globale vandstand på omkring 3 mm/år de senere år. Der er regionale forskelle, og målinger har vist en mindre stigning for Nordvesteuropa. Prognoser antyder dog, at der vil ske en betydelig stigning i vandstanden i den danske del af Vadehavet som følge af både en generel vandstandsstigning og flere og mere ekstreme storme i fremtiden.

Variationer i vandstanden er en kontinuerlig proces. Der sker ændringer over tid - fra sekunder, over timer og år til århundreder, og der er mange faktorer, der påvirker vandstanden. En første forudsætning for at kunne tolke målinger af vandstande er imidlertid, at kvaliteten af data er i orden.

Analysearbejdet i denne rapport er resultat af et ønske om at kunne præsentere så komplette og korrekte serier af middelvandstande i Vadehavet som muligt. Dette sker i erkendelse af, at selvom data generelt er gode, er der mangler og uoverensstemmelser mellem de forskellige målere. Endvidere har det været ønsket at bidrage til klimadebatten med opdaterede kurver over udviklingen i middelvandstande i Vadehavet og med metodeovervejelser, der relaterer til de fysiske og meteorologiske forhold, til andre målemetoder og til prognoser for fremtiden.

Det er en teknisk rapport og skal ses som sådan. I præsentation og diskussion af analyseresultaterne er det dog tilstræbt at gøre disse alment tilgængelige.

"Analyse af middelvandstande i Vadehavet" er udarbejdet som en del af Kystdirektoratets Udviklingsprogram 2006-2009 (KUP 06-09) og såvel rapport som bilag kan hentes fra Kystdirektoratets hjemmeside, www.kyst.dk.

Konklusioner

I analyse af middelvandstande i Vadehavet på vandstandsmålinger fra Esbjerg (DMI hhv. KDI) og Havneby (KDI) i perioden 1972-2007 er vindens indflydelse på vandstanden søgt fjernet. I beregningerne er der som udgangspunkt talt antal timer eller dage med målinger som baggrund for udregning af uge-, måneds- og årsmidler, og der er i analysen opstillet 51 matematiske udtryk til forklaring af meteorologiske påvirkninger.

En væsentlig del af de observerede variationer i middelvandstanden er forklaret ud fra vindobservationer ved udtrykket:

$(0.8 + 0.065 * \text{Vindhastighed}) * (\text{Vindhastighed})^2 * \cos(\text{Vindretning} - 250^\circ)$, der tager højde for vindens friktion, og hvor vindens kraft projiceres ind på kompasretningen 250 grader.

Serierne af middelvandstande er forbedret ved erstatning af middelvandstande fra nabomålere, når der har været huller i dataserien, hvorved der er konstrueret nye serier af middelvandstande med større dækning end de originale.

Middelvandstandene beregnet på ugemidler anses for mest pålidelige og viser en stigning i den relative vandstand i Esbjerg på ca. 4 mm/år fra 1972 til 2007 og ca. 5 mm/år fra 1993 til 2003. Dette er en klar forøgelse af den gennemsnitlige stigning på 1,3 mm/år fra 1889 til 2006 beregnet på grundlag af årsmidler. Selvom der er usikkerheder i beregningerne, er der ikke tvivl om, at middelvandstanden er steget mere de seneste 35 år henholdsvis 10 år, end middelvandstanden i gennemsnit steg i det 20. århundrede. Den øgede stigning er i overensstemmelse med målinger af globale/regionale middelvandstande fra satellit.

Rent kystteknisk er det uden betydning, om det er vandet, der stiger, eller landet der sætter sig. Det er det imidlertid ikke, når IPCC's antagelser om fremtidige vandspejlstigninger benyttes lokalt. Et mål for fremtidige undersøgelser må være at adskille de isostatisk fra de eustatiske ændringer. KDI's vurdering er, at Esbjerg ligger tæt på vippelinien. Dette er i overensstemmelse med foreløbige vurderinger fra Dansk Rumcenter baseret på GPS-målinger.

Hvorvidt den nuværende store stigning i middelvandstanden er en svingning eller er et udtryk for en længerevarende trend i udviklingen, kan ikke afgøres på det foreliggende grundlag; - men der er grund til at følge udviklingen.

Indledning

Selv om vi for de danske farvande har vidnesbyrd om vandstandsvariationer langt tilbage i tiden, begyndte man først omkring år 1890 med egentlige systematiske, mekaniserede og kontinuerte målinger af vandstande. Her opsatte Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) målere på 10 lokaliteter i Danmark. Siden er der blevet opsat målere på en lang række andre lokaliteter.

Måling af vandstandsvariationer og udregning af årsmidler blev lagt til grund for nulpunktet i det tidligere danske højdesystem Dansk Normal Nul i 1891, ligesom middelvandstanden i 1990 er det for det nuværende højdesystem, DVR90, jf. evt. KMS (2002). Skift af højdesystem skete, fordi havniveauet ændrer sig med tiden i forhold til landoverfladen og med store forskelle på tværs af landet.

Ændringer i landoverfladen, isostasi, skyldes, at Danmark fortsat oplever en tilpasning af undergrunden efter sidste istids enorme trykpåvirkning af landområderne. Konsekvensen er, at der sker en større relativ vandstandsstigning i den sydvestlige del end i den nordøstlige del af landet. Den større relative stigning i Vadehavet sker i geografisk set sårbare områder, hvor store arealer er meget lavtliggende.

Ændringer i havniveauet, eustasi, kan ske som konsekvens af global opvarmning/afkøling, og set i geologisk perspektiv har den globale vandstand varieret med over 100 meter.

Middelvandstanden udviser nogen variation fra år til år, men medens der i perioden 1891-1990 kunne iagttages et fald i middelvandstanden mod nord i Danmark (Duun-Christensen, 1990, 1992), ses i de senere år en stigende tendens ved alle danske målestationer (Binderup, 2006).

Hidtil har det været vanskeligt entydigt at adskille den globale vandstandsstigning i de danske vandstandsdata fra de isostatiskke ændringer, da vandstandsmålere kun er i stand til at måle de relative ændringer, men med fremkomsten af GPS- og satellitmålinger af vandstanden vil det med tiden være muligt at adskille bidrag fra landbevægelser (isostasi) og vandstandsændringer (eustasi).

For borgeren, hvis hus er truet, er det for så vidt ligegyldigt, om vandstandsstigninger skyldes isostasi eller eustasi, men for at vurdere hvordan klimaændringer i fremtiden vil påvirke vores kyster, og i at kunne sammenligne med alternative metoder og målinger fra andre dele af verden, er denne adskillelse væsentlig.

Samtidig er lange og komplette serier af vandstandsmålinger vigtige i vurdering af effekterne af klimaændringer på de danske kyster og til vurdering af, om prognoserne fra FN's klimapanel (IPCC, 2007) holder for Danmark. Viden om vandstandsændringerne i Vadehavet skal ses i lyset af den generelle udvikling i dette meget dynamiske landskab og i forhold til, hvad der kan forventes i fremtiden.

I Esbjerg har DMI målt vandstande siden 1889, Kystdirektoratet (KDI) har målinger tilbage til 1972, og endvidere har Esbjerg Havn haft en måler opsat i perioder. KDI har endvidere vandstandsmålinger fra Ballum, Højer, Mandø, Havneby, Ribe, Brøns og Grådyb med serier af 7-36 års varighed.

På trods af at målingerne generelt er af kvalitetsmæssig god standard, forekommer der udfald på målestationerne, og ikke alle forskelle mellem registreringer på stationerne kan forklares ud fra forskellige placeringer af målerne og meteorologiske forhold.

I erkendelse af at serierne af vandstandsmålinger på nogle områder ikke har været optimale, er opstået et ønske hos KDI om at gennemgå serierne igen for at sammensætte en komplet og mere korrekt dataserie fra især Esbjerg, samt at kunne tolke den hidtidige udvikling i middelvandstande på baggrund af analyse af data.

Formålet med nærværende analyse er således:

- At forbedre og verificere de samlede tidsserier af middelvandstandsdata i den danske del af Vadehavet.
- At præsentere en opdateret tidsserie af middelvandstandsdata for Esbjerg.
- Analysere og vurdere udviklingen i middelvandstande over de seneste 35 år; herunder at afdække sammenhænge mellem de fænomener, der påvirker middelvandstanden.
- Anvise metode til på en mere kvalificeret og ensartet måde at analysere vandstandsstigninger, ud fra vandstandsmålinger, der fremadrettet kan sammenlignes med prognoser og satellitmålinger.
- Vurdere, hvorledes de i analysen fremkomne resultater og metoder relaterer til den globale havspejlsstigning.

Rapporten vil på et overordnet plan relatere til globale vurderinger af den historiske og nutidige havspejlsstigning som baggrund for videre undersøgelser. Formålet er således IKKE at give en uddybende gennemgang af den omfattende litteratur om teorier og metoder, idet der dog refereres til relevant litteratur.

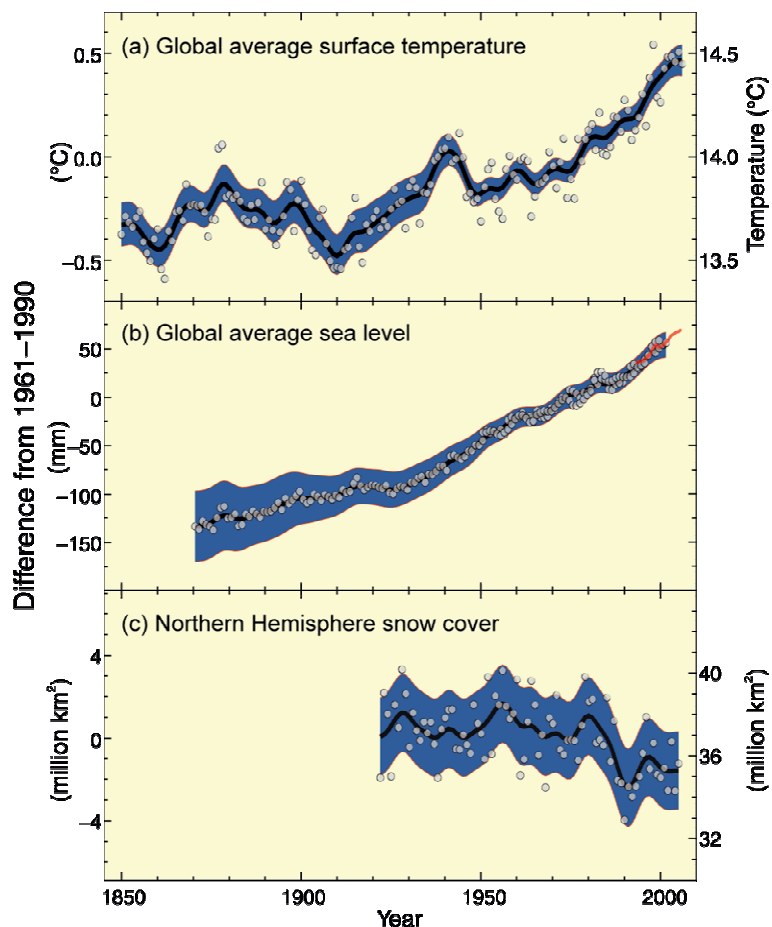
Vandstandsudvikling de seneste 120 år

Som nævnt varierer middelvandstanden fra år til år, og derudover iagttages en langtidsvariation i vandstandsudviklingen – lokalt, regionalt og globalt.

Mange har sammensat én kurve for den globale vandstandsudvikling frem til i dag, men dels er der stor forskel på, hvor meget vandstanden er steget/faldet ved de enkelte lokaliteter, dels er der problemerne ved fastsættelse af den absolutte stigning, og dels er der kvaliteten i målingerne, hvor datagrundlaget naturligt bliver mere sparsomt, jo længere man bevæger sig tilbage i tiden.

Der er dog en generel enighed om, at der i det 20. århundrede har kunnet iagttages en gennemsnitlig stigning i den globale vandstand på 1,5 – 1,8 mm/år (se f.eks. Bindoff *et al.*, 2007; Douglas, 2001).

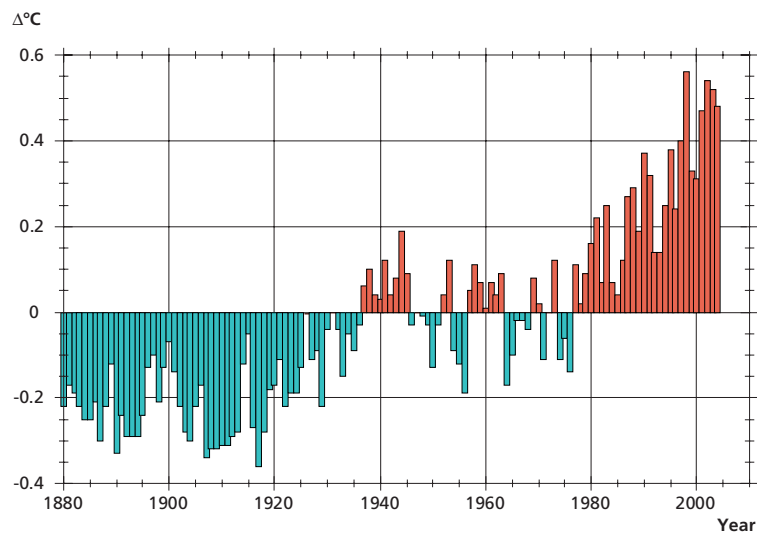
Vandstandsstigningerne følger øgede globale luft- og havtemperaturer, ligesom der konstateres et mindre snedækket areal på den nordlige halvkugle, figurer 1 & 2. Samtidig er udstrækningen af arktisk havis om sommeren mindsket med mere end 20 % siden 1978 (Lemke *et al.* 2007).



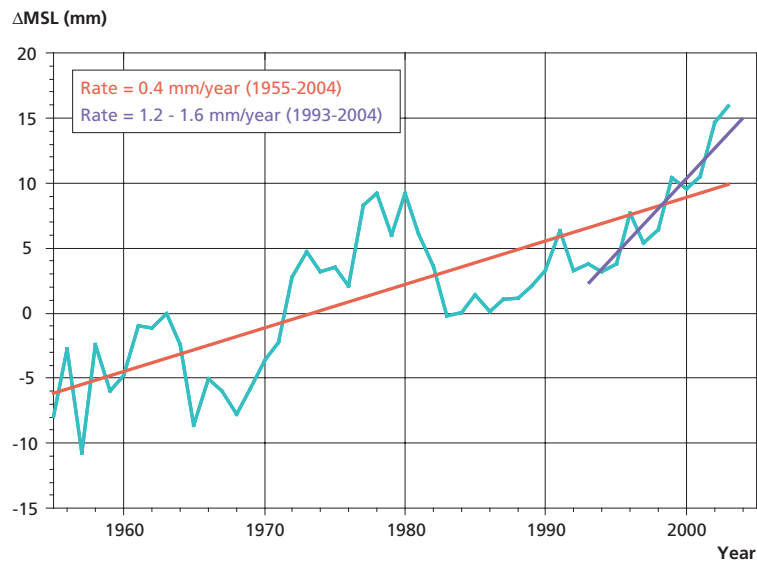
Figur 1: Observerede ændringer i global middel overfladetemperatur (a), globalt havspejlsniveau (b) og snedækket på den nordlige halvkugle (c) oplyst i forhold til perioden 1961–1990. De udglattede kurver viser 10-års midler og de blå områder deres usikkerhed. (Grafik: IPCC, 2007).

Af den globale vandstandskurve figur 1 (a) ses, at vandstanden var relativt konstant fra 1915-1930, herefter er den generelt stigende, dog med perioder med stagnation, frem til 1990. Efter 1990 ses tilsyneladende en øget stigning frem til i dag.

Temperaturerne siden ca. 1980 har alle ligget over middelværdien, figur 2, og en stor del af havspejlsstigningen siden 1955 kan forklares ud fra de øgede temperaturer alene, figur 3. Samlet set er den termostatistiske stigning på 0,4 mm/år for hele perioden 1955-2004, medens den for 1993-2004 er på 1,2-1,6 mm/år. For Europa gælder, at overfladetemperaturerne i de senere år med stor sandsynlighed er de højeste de seneste 500 år (Luterbacher *et al.*, 2004).



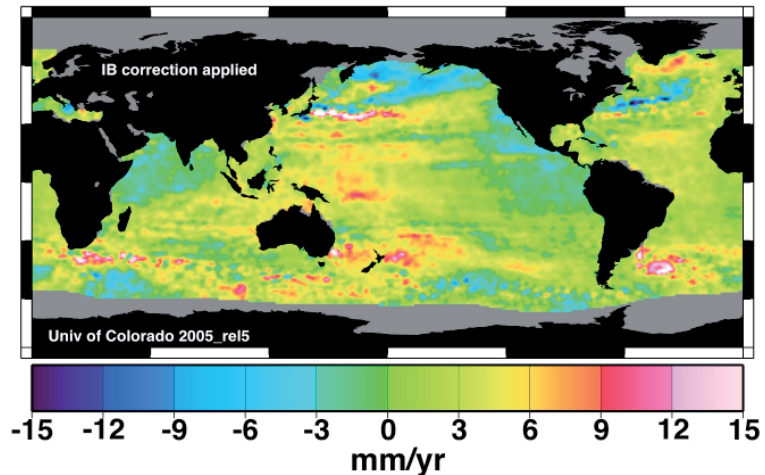
Figur 2: Den globale overfladetemperatur afvigelse fra middeltemperaturen, 1880-2004. (Nerem, 2005 efter Hansen *et al.*, 2005).



Figur 3: Ændringer i den globale termostatistiske (steriske) havspejlsstigning. Middellinien for 1955-2004 er vist med rød og for 1993-2004 med lilla (Nerem, 2005 efter Levitus *et al.* 2005 og Antonov *et al.*, 2005).

Satellitmålinger af havspejlsniveau

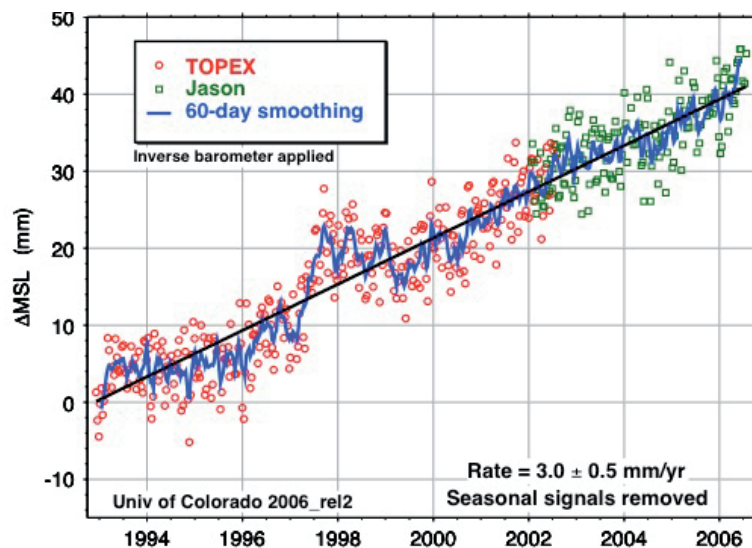
Siden starten af 1990'erne har satellitmålinger kunnet anvendes til vurdering af ændringer i havniveauet. Satellitterne Topex/Poseidon (opsendt 1992) og Jason (opsendt december 2001) har observeret ændringer i havspejlsniveauet fra 1992 til i dag og beregner globalt middel havspejlsniveau hver 10. dag med en usikkerhed på 4-5 millimeter (Nerem, 2005). Globalt ses både områder, hvor havspejlet er faldende og områder, hvor det er stigende, figur 4.



Figur 4: Lokale havniveau-tendenser fra 1993-2003, målt af TOPEX/Poseidon-satellitterne. Det er tydeligt, at det gør en stor forskel, hvor på kloden man måler (Grafik: Nerem, 2005).

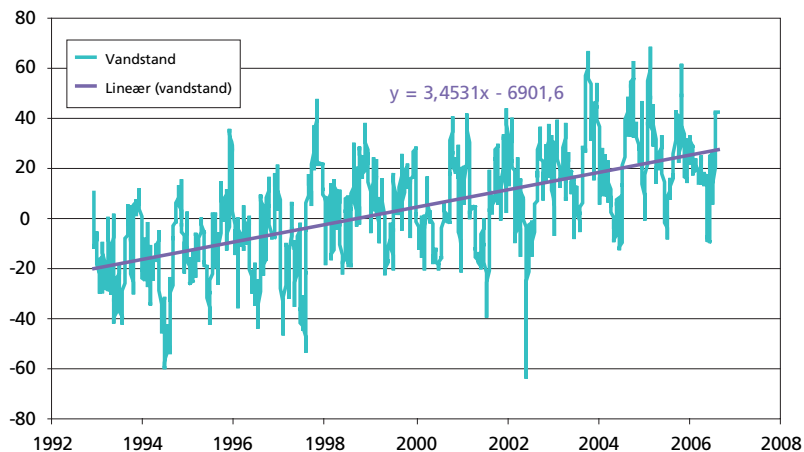
Opmålinger fra Topex/Poseidon viser, at selvom det globale havniveau stiger med 3 mm/år, figur 5, er ændringen i havniveauet i Vesteuropa generelt lille, figur 4.

For Atlanterhavet som helhed er stigningen på 3,5 mm/år i perioden 1992-2006, figur 6.



Figur 5: Globalt havspejlsniveau (10-dages middel) fra satellitterne TOPEX/Poseidon (røde punkter) og Jason-1 (grønne punkter) for perioden 1993 til 2006. Den blå kurve viser 60-dages løbende middel og den sorte linie udviklingen i middelvandsstand (Grafik: Nerem, 2005).

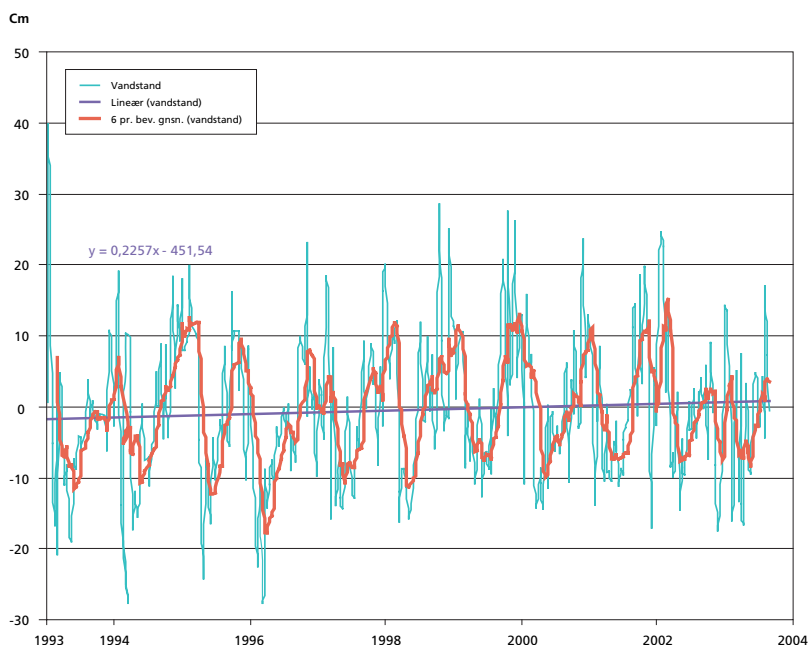
Vandstand i Atlanterhavet (mm)



Figur 6: Satellitmålinger (Topex/Poseidon) af vandstand i Atlanterhavet fra 1992-2006. Den rette linie (lilla) viser en gennemsnitlig stigning på 3,5 mm/år.

Vedrørende den lokale trend for Nordsøen kan data hentes fra internettet (<http://sealevel.colorado.edu/wizard.php>). Længde er valgt til 4 grader og bredde til 56 grader. De tilgængelige målinger er fra slutningen af 1992 til 2003. Målingerne viser en stigning på 2,3 mm/år, figur 7.

Udover en årlig stigning i middelvandstanden på 2,3 mm/år er det tydeligt (den røde kurve), at vandstanden normalt er højere om vinteren end om sommeren primært grundet årstidsvariationer i lufttrykket (Bernsten, 1931 og andre).



Figur 7: Topex/Poseidon målinger fra Nordsøen 1993-2004. Den røde kurve viser 60 dages middell, og den lilla linie angiver den gennemsnitlige udvikling i vandstanden.

Lokale trends og kobling til regionale fysiske forhold

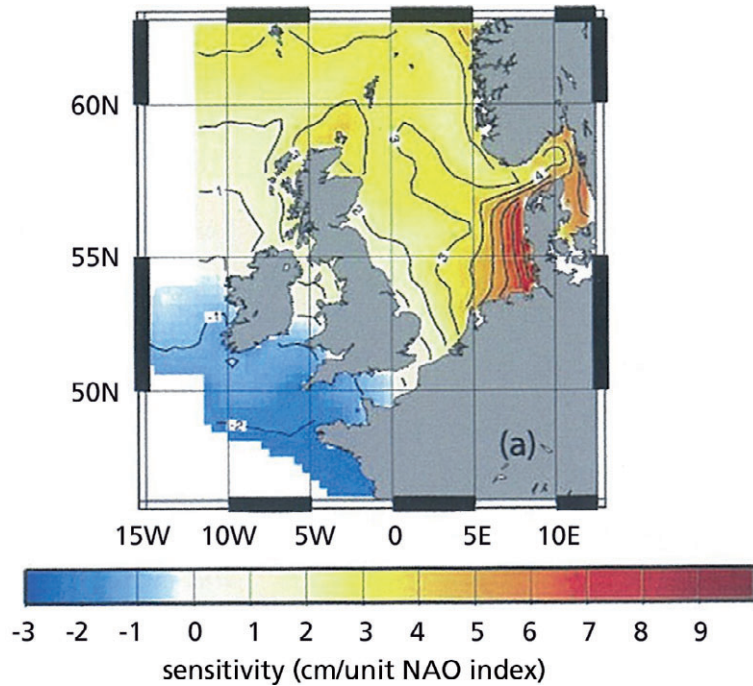
Duun-Christensen (1990, 1992) fandt en gennemsnitlig relativ stigning i vandstanden ved Esbjerg for perioden 1890-1990 på 1,1 mm/år, samt at der var en øget vandstandsstigning for perioden 1970-1989. Christiansen *et al.* (2001) fandt en stigning på 4,21 mm/år for perioden 1973-1997.

En del forfattere har observeret en øgning af tidevandsamplituden i Vadehavet. (Führböter og Jensen, 1985; Hvidberg-Knudsen *et al.*, 1994). Højvandsniveauet er steget mere end lavvandsniveauet er faldet (Jensen og Mudersbach, 2004; Mudersbach og Jensen, 2006).

I relation til den generelle klimaudvikling undersøgte Barring og von Storch (2004) målinger af lufttryk fra Lund og Stockholm i Sverige tilbage til år 1800. De fandt ingen langtidstrend i data. I perioden 1980-midten af 1990'erne sås en øget stormfrekvens, som dog lå indenfor den naturlige variabilitet i data. Weisse, Von Storch og Feser (2005) fandt en øget stormfrekvens for Nordsøen fra 1960 og frem, der toppede omkring 1990-1995, hvorefter kun ses en svag stigning eller endog et fald. Heller ikke Weisse og Plüss (2006) finder en signifikant udvikling for det 20 århundrede for Nordsøen, selvom der er nogen variation, og de konkluderer, at der i vandstandsudviklingen langs Nordsøens kyster er et betragteligt bidrag, der ikke kan redegøres for ud fra ændringer i vindklimaet.

En anden anvendt metode til beskrivelse af vandstandsvariationer på er det såkaldte NAO-index (North Atlantic Oscillation), der beskriver variationen mellem subtropiske højtryk over Azorerne og lavtryk over Island i vintermånederne. I år med et højt/positivt NAO-index er højtrykket over Azorerne og lavtrykket over Island kraftigere end normalt. Den forøgede trykforskel betyder kraftigere storme over den nordlige del af Atlanterhavet, og resultatet er varme og våde vintre i Europa. Ved negativt NAO-index er højtrykket over Azorerne og lavtrykket over Island svækkede, hvilket betyder færre og svagere storme med koldt og tørt vejr til følge (Hurrell *et al.*, 2003).

Der er en sammenhæng mellem NAO-index og (vinter) middelvandstanden, figur 8. En stigning i NAO-indekset på 1 betyder en stigning i middelvandstanden i Vadehavet på 10 cm. Ifølge Hoepffner *et al.* (2006) er NAO indekset steget med 2 enheder de seneste 40 år, hvilket betyder en stigning i middelvandstanden på ca. 20 cm på grund af vind og lufttryk.



Figur 8: Havniveauets følsomhed for ændringer i middel vinter NAO-index (cm/NAO-index enhed) beregnet med 2D-model. Bemærk de store stigninger i den sydøstlige del af Nordsøen, hvor hver enhed NAO-indexet øget, betyder en stigning i middel vinter vandstanden på 10 cm (Hoepffner et al., 2006 efter Wakelin et al., 2003).

Fleire faktorer, både afhængigt og uafhængigt af hinanden, har indflydelse på vandstandsudviklingen i Vadehavet, og ikke alle sammenhænge er fuldt belyst. Middelvandstanden udviser stor variation og skal vurderes med forsigtighed, så det undgås at tolke korttids variationer som langtids trends.

Prognoserne fra IPCC

FN's Internationale klimapanel, IPCC, har i 2007 opdateret prognoserne for den forventede globale havspejlsstigning i det 21. århundrede (www.ipcc.ch; IPCC, 2007).

Med udgangspunkt i middelvandstanden i perioden 1980-1999 angives forventede stigninger frem til 2090-2099 for 6 hovedscenarier. Scenarierne beskriver samfundsudviklingen under forskellige vilkår og de deraf afledte effekter for klimaudviklingen. Spændet i prognoserne med hensyn til vandstandsstigningen er 18-59 cm i den ovennævnte periode. Her er dog usikkerhed vedrørende en potentiel kraftig forøgelse af afsmeltningen i Arktis, der kan øge stigningerne betragteligt. Set over hele perioden vil den gennemsnitlige globale vandstandsstigning forventet være af en størrelsesorden på 2-6 mm/år.

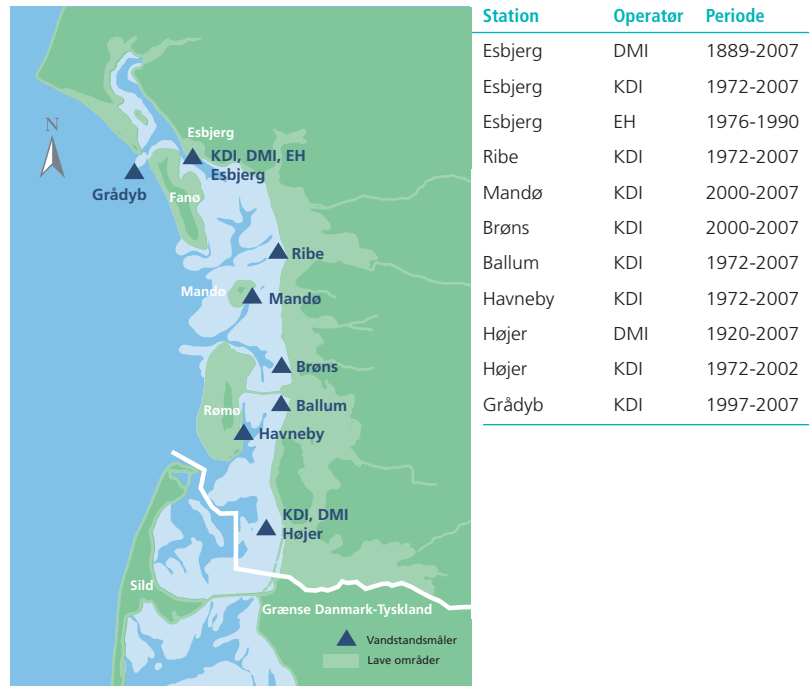
I den forrige rapport fra IPCC (McCarty *et al.*, 2001) var prognoser for vandstandsstigningen i det 21. århundrede direkte angivet som kurver. Her sås en moderat stigning i starten, der forøgedes kraftigt i den sidste halvdel af århundredet. Den seneste prognose er, selvom kurverne ikke er vist, i overensstemmelse hermed, og hvor den kraftigste stigning forventes i den anden halvdel af århundredet. Vandstandsstigningen øges i takt med, at klimaændringerne indtræffer. Præsentation af intervaller tillader, at vandstandsudviklingen følger et andet forløb; herunder at der er store naturlige klimatiske variationer.

Hvorom alting er, diskuteres den fremtidige udvikling af vandstanden intenst i disse år, og den nuværende udvikling følges nøje; ikke kun i Vadehavet men langs hovedparten af Jordens kyster.

Datagrundlag og korrektion af dataserier

Der er i analysen anvendt serier af vandstandsdata fra Esbjerg, Ribe, Brøns, Ballum, Havneby, Mandø, Højer og Grådyb, figur 9.

Der er endvidere anvendt vindmålinger, figur 10.



Figur 9: Beliggenhed, operatør og måleperioder af de i analysen anvendte måleserier af vandstande i Vadehavet.



Figur 10: Vindmålere i Vadehavet; placering og måleperiode.

Danmarks Meteorologiske Instituts (DMI) måleserie af vandstand fra Esbjerg er klart den længste med en samlet måleperiode på 118 år.

Kystdirektoratet (KDI) har målt vandstande ved 5 stationer (Esbjerg, Ballum, Højer, Ribe og Havneby) siden 1972. Antallet af stationer er med tiden blevet forøget med Grådyb i år 1997 og Mandø og Brøns i år 2000.

I Højer måler både KDI og DMI i hele perioden 1972-2007 og i Esbjerg måler KDI og DMI i hele perioden og Statshavsadministrationen i Esbjerg, nu Esbjerg Havn (EH) i dele af perioden.

Målerne ved Højer er i slutningen af 1980 flyttet ca. 1400 meter mod vest fra Højer Sluse til foran slusen ved det fremskudte dige i forbindelse med etableringen af dette.

Ved Ribe målerne er der foretaget uddybning i forbindelse med forstærkningen af diget, hvilket kan have indflydelse på vandstanden.

For målerne ved Ballum, Højer og Ribe antages disse delvist at måle å-vandstande og er således påvirket af afstrømning fra oplandet og af dybdeforholdene umiddelbart vest for målerne. De vil således ikke altid måle de reelle vandstande ved lavvande.

Udover de ovenfor nævnte stationer har der gennem tiden været foretaget vandstandsmålinger i kortere tidsrum og af forskellige operatører, f.eks. i forbindelse med monitorings- og forskningsprojekter. Endvidere har KDI siden 2000 målt vandstand på vaden foran Ribe for at kunne vurdere vindstuvning under ekstreme stormsituationer. Disse dataserier er ikke søgt inddraget i analysen.

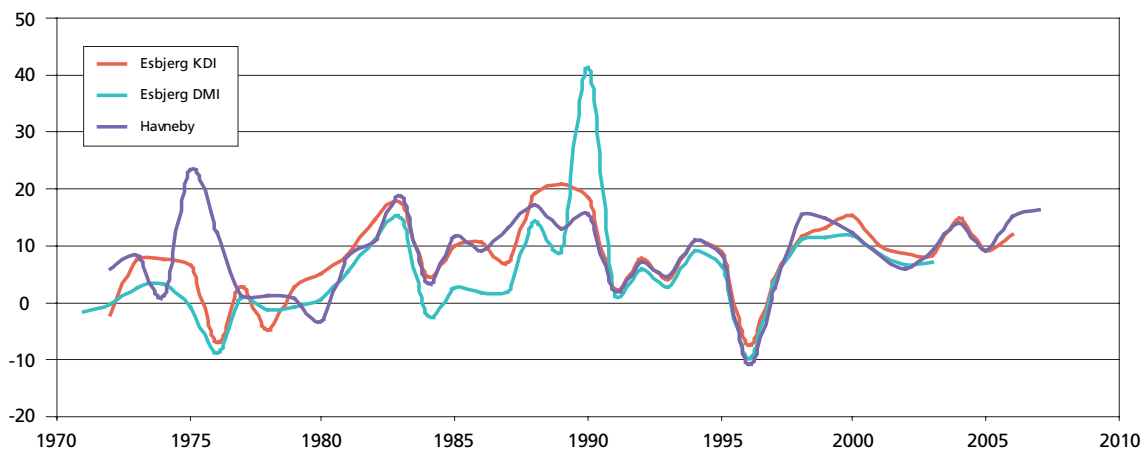
Alle vandstandsdata og resultater angives i højdesystemet DVR90 (i cm).

De enkelte dataserier er gennemgået og sammenlignet med hinanden. Her ved er uoverensstemmelser i middelvandstande mellem målere på samme lokaliteter og mellem lokaliteter identificeret. En (af DMI) opdateret korrektion af DMI's vandstandsmålinger er benyttet ved Esbjerg, hvorved der har kunnet redegøres for en del af tidligere uoverensstemmelser mellem serierne.

Der er dog en systematisk afvigelse mellem KDI og DMI's målinger i Esbjerg før 1990, som det ikke er muligt at redegøre for. Årsagen kan være tidligere foretagne korrektioner, som det ikke er lykkedes at finde dokumentation for, og forskelle i koterings af målerne.

Da målerne har stået i samme brønd i perioden 1972-1990, burde de årlige middelvandstande være næsten ens. Det er de ikke, figur 11. Efter 1990 ses god overensstemmelse. Det er derfor valgt at lave en rettet serie af KDI's data for Esbjerg (ESB_KDI), hvor middelvandstandene 1972-1990 er fratrukket 7 cm (ESB_KDI_RET), men i øvrigt er identisk.

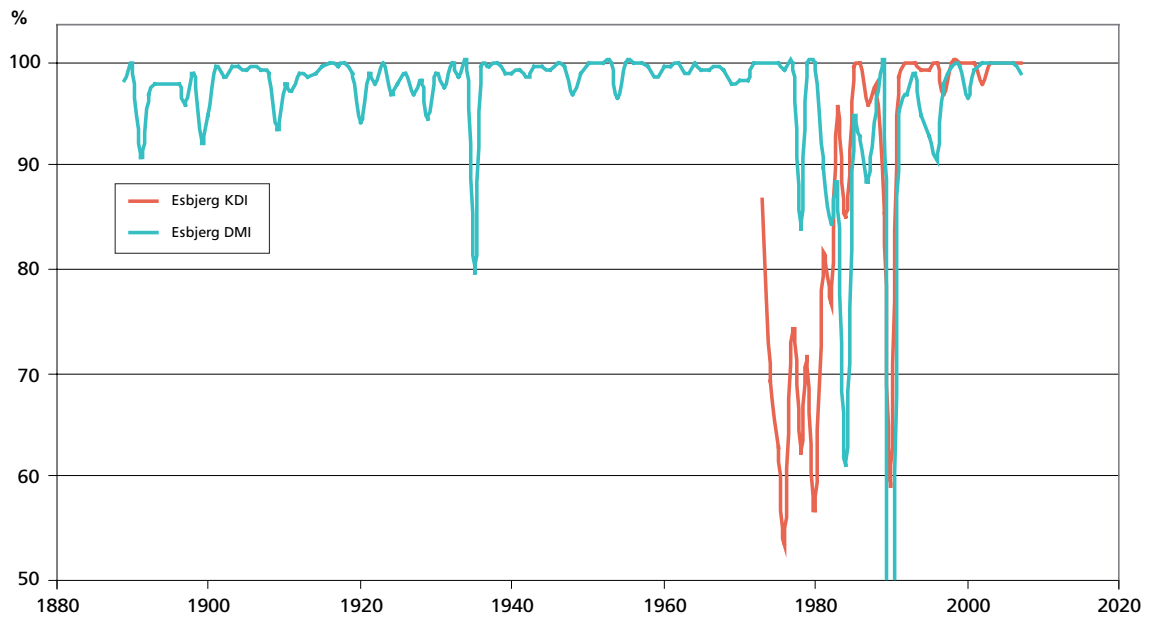
Middelvandstand



Figur 11: Årlige middelvandstande i cm fra Esbjerg og Havneby, 1972-2005.

Endvidere er huller i serierne identificeret. Dette giver mulighed for at konstruere mere komplette serier, hvor der er overlap mellem målestationerne, at kompensere for manglende data i de videre beregninger, samt at kunne rekonstruere/vurdere mulige middelvandstande ved sammenligning af målinger fra andre stationer med datadækning. Der redegøres for de konstruerede serier og beregninger i analysedelen.

Data i den første del af perioden fra 1972 til 2007 er af dårligere kvalitet end i den anden, og der er mange korte perioder uden data. Før 1980 er der f.eks. kun indsamlet ca. 70 % af det teoretiske antal målinger i Esbjerg KDI, figur 12. Forbedringer af vandstandsmålere/-målinger er indført i takt med den tekniske udvikling, og selvom kvaliteten af de ældre målinger i dag anses for dårlig, var kvaliteten god, da de blev målt. Heri indgår også, at målehyppigheden er forøget med tiden. I DMI's dataserie blev der i begyndelsen målt hver time, medens der i dag registreres vandstand hvert 10. minut.



Figur 12: Datadækning i % for DMI og KDI's måleserier af vandstandsdata fra Esbjerg.

Serierne fra Grådyb, Mandø og Brøns er grundet de korte måleperioder ikke inddraget i den videre analyse af middelvandstanden, ligesom Ribe, Ballum og Højer udelades grundet ovennævnte problematik angående målinger ved lavvande. Serierne anvendes dog i validering af måleserierne for Esbjerg og Havneby.

Til brug for de videre analyser er således primært anvendt vandstandsserier for Esbjerg og Havneby.

Der er målt vindstyrke på en række stationer i Vadehavsområdet gennem tiden, fig. 10. Vindmålingerne fra Nordby på Fanø er ikke benyttet, da målestationen har været placeret en række forskellige steder i og omkring Nordby. Desuden anses målingerne for upålidelige (Aagaard *et al.* 1995). Vindmålingerne er anvendt til at undersøge vindens påvirkning af middelvandstanden.

Arbejdsmetode

Dokumentation af arbejdsprocessen for analyserne og basisresultaterne for de præsenterede analyser er refereret i bilag.

Her redegøres kort for arbejdsprocedurerne for beregning af middelvandstand og vindpåvirkning.

Vandstandsmålinger

Vandstandsmålingerne er registreret i en database, hvorfra der med datatræk (sql-scripts) dannes års-, måneds- og ugemidler af vandstande, ligesom der konstrueres serier sammensat af målinger fra forskellige stationer. Scripts og regler for udvælgelse af data fremgår af bilag 1.

Enkle og let forståelige datatræk er tilstræbt, hvilket også letter kontrol og fejlfinding. Datatræk kan gøres både væsentligt mindre og hurtigere, men det har ikke været målet.

Det første script beregner middelværdien for Esbjerg KDI, Esbjerg DMI og Havneby for henholdsvis år, måned og uge. Desuden beregnes antallet af dage eller antallet af timer, hvor måleren har målt mindst én måling.

Ved at tælle antallet af dage eller timer med målinger i stedet for antallet af målinger, undgås det at skulle tage hensyn til, hvor ofte måleren har foretaget en måling. Tælles antallet af målinger, skal der tages hensyn til det teoretiske antal målinger per dag. Målefrekvensen ændres gennem tiden og der er sket skift fra 24, 48, 96 og til 144 målinger per dag. Efterfølgende er år, måneder eller uger med få eller ingen målinger erstattet med bedre målinger fra nærliggende stationer. Herved fås de tre serier ESB_KDI_PLUS (KDI målinger der er suppleret med data fra nærliggende stationer), ESB_DMI_PLUS (DMI målinger der er suppleret med data fra nærliggende stationer) og ESB_KDI_RET_PLUS (KDI målinger der er suppleret med ekstra data fra nærliggende stationer, samt justeret med -7 cm før 1990). De præcise regler for at bruge vandstande fra andre stationer fremgår ligeledes af bilag 1.

Vindmålinger

Tidligere projekter har både givet erfaring i beregning af vindens påvirkning af vandstand og viden om mangler ved traditionelle beregninger.

Vandets overfladeruhed og dermed friktion forøges, jo højere bølgerne bliver. Der findes en række udtryk for friktion. I denne analyse anvendes et simpelt udtryk:

$$C = (0,8 + 0.065 \cdot V) / 1000,$$

hvor C er friktionen, og hvor V er vindens hastighed i 10 meters højde (Wu, 1980).

Den samme vindstyrke blæser langt mindre vand ind i Vadehavet om sommeren end om vinteren. Selvom der tages hensyn til, at luften er tungere om vinteren end om sommeren, er det ikke nok til at forklare forskellen. Ifølge litteraturen har vindhastighed, forskelle mellem vand- og lufttemperaturer samt luftfugtighed betydning for friktionen. Sammenhængen er ikke simpel, og beregning kræver målinger af luftfugtighed og temperatur, som ikke er til rådighed. Det er derfor valgt ikke at tage hensyn til temperatur og luftfugtighed.

Efterfølgende er der på grundlag af vindobservationer fra Vadehavet og Vestkysten beregnet 51 forskellige udtryk for påvirkninger af hver middelvandstand på grund af vindstyrke, vindretning, lufttryk og temperatur, bilag 2.

Udtrykkene for vindens påvirkning er undersøgt for at se, hvor stor en del af afvigelse fra den generelle udvikling i middelvandstanden, der kan forklares ud fra de meteorologiske forhold.

Til beregning af de 51 udtryk og til analyse af udtrykkene i relation til middelvandstanden er anvendt programmet Unscrambler (Camo, 1998).

I Unscrambler's terminologi arbejdes med variable. En variabel skal i denne sammenhæng ses som et udtryk for de fysiske påvirkninger, der benyttes til at forudsige middelvandstanden for et år, en måned eller en uge. For hver variabel vil programmet således beregne, hvor stor en del af variationen i middelvandstanden, der kan forklares ved brugen af denne; en såkaldt variansanalyse.

Valg af perioder for analyse

Der er udført analyser af middelvandstande for flere forskellige tidsintervaller. Udvælgelsen er sket som følge af de tilgængelige data og som basis for sammenligninger, idet der er tilstræbt så lange perioder som muligt. Følgende 4 perioder er analyseret:

1889 -2006 (2007), der dækker hele DMI's måleserie fra Esbjerg.

1972 – 2006 (2007), der er længden af dataserier fra KDI.

1982 – 2006 (2007), der er perioden med vinddata fra Blåvand.

1993 – 2003, der er perioden med behandlede satellitmålinger af vandstanden i Nordsøen.

Stigningen i middelvandstande undersøges i de to perioder 1972-2007 og 1993-2003. Den valgte periode har stor betydning for den beregnede stigning i middelvandstanden, da middelvandstanden har periodiske svingninger, og der fås en enkel kontrol af, hvad perioden betyder ved at vælge to perioder. Perioden 1972 til 2007 er naturligt valgt ud fra tilgængelighed af KDI data og 1993-2003 er valgt fordi udvikling i middelvandstanden fra vandstandsmaalerne direkte kan sammenlignes med satellitmålinger fra Nordsøen (data hentet fra <http://sealevel.colorado.edu/wizard.php>); en sammenligning der på sigt kan afklare, hvad der er havspejlsstigninger, og hvad der er land-

sænkninger. For Atlanterhavet er det dog muligt at hente middelvandstanden fra 1992-2006, figur 6. Stigningen i vandstanden i Atlanterhavet på 3,5 mm/år anses ligesom den globale stigning på 3,0 mm/år for perioden 1993 til 2007 (fig. 5) for bedste bud på den øjeblikkelige havniveaustigning, da stigningen for store geografiske områder er langt mindre påvirket af vejret end lokale områder som Vadehavet.

Ved sammenligning af de korte perioder på ca. 35 henholdsvis 10-15 år med en lang periode på over 100 år, undersøges om det er muligt at se en effekt på middelvandstanden af de klimaændringer, der er sket. Desuden forsøges at give et bud på de isostatisk og eustatisk ændringer. Ved korte perioder har start år, slut år, periodens længde og manglende målinger, som nævnt, stor betydning for resultatet. En lang periode på over 100 år fastlægger den relative stigning med en meget lille standardafvigelse, selvom der er år med få målinger.

Analyse og resultater

I dette kapitel gennemgås de udførte analyser af middelvandsstanden med fokus på metoder i udregning af middelvandstande og forskelle mellem disse; herunder inddragelse af vindmålinger i korrektion af vandstandsmålinger fra Esbjerg og Havneby. Først præsenteres resultaterne af analyser uden inddragelse af vind. Herefter redegøres kort for modelkørsler med analyser på uge-, måneds- og årsmidlede vandstande, hvor der er taget højde for vindens påvirkning.

Årsmidlede vandstande 1889-2006 uden korrektion for isostasi

De samlede serier af målinger fra Esbjerg er undersøgt. Da der i dataserien fra DMI er enkelte år (f.eks. i 1990) med større dataudfald, er det forsøgt at forbedre serien fra 1972 og frem ved at erstatte hele års DMI målinger med KDI målinger, såfremt der i et år er målt under 350 dage, og KDI har målt flere dage det pågældende år.

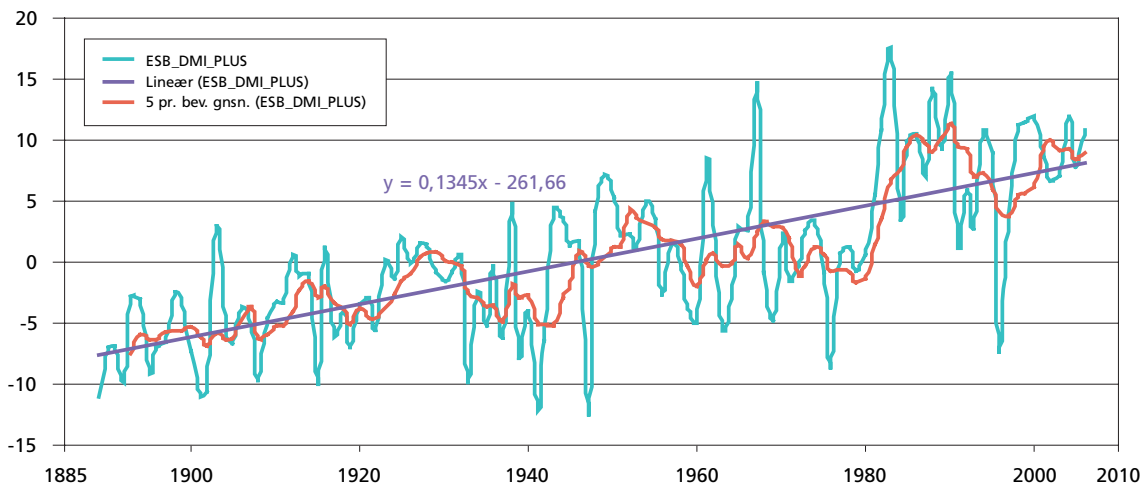
Herved undgås så vidt muligt, at et års middelvandstand er et resultat af få måneders data, og hvor middelvandstanden generelt er høj om vinteren og lav om sommeren.

Udviklingen i den årlige middelvandstand viser en gennemsnitlig stigning på 1,35 mm/år i perioden 1889-2006, svarende til en stigning på 15,8 cm over de 117 år, figur 13.

Der ses store udsving i middelvandstanden fra år til år, ligesom der er perioder med en faldende tendens, tydeliggjort ved det 5-års glidende gennemsnit. Afvigelser fra en jævn gennemsnitsstigning i f.eks. 1976, 1983 og 1996 gør, at stigningen i en periode på 20-30 år vil være påvirket af periodens længde og startår, og at der derfor også skal udvises forsigtighed ved tolkning af vandstandsudvikling på baggrund af korte tidsserier. Udregnes udviklingen i perioden 1950-1980 fås et fald i årsmiddel vandstand på 0,1 mm/år, ligesom der iagttages en faldende tendens i 1930-40'erne.

Middelvandstanden i 2006 er 3 cm over og de seneste 5 år i gennemsnit 1 cm over den lineære udvikling i Esbjerg.

Middelvandstand i Esbjerg cm



Figur 13: Årsmidlet vandstand i Esbjerg, 1889-2006. De enkelte års middelvandstand (lysblå), den lineære udvikling (mørkblå) og udviklingen set som 5 års glidende gennemsnit (rød) er vist.

Undersøgelse i 2006 af KDI vandstande, Esbjerg 1972-2005

For fuldstændighedens skyld og som baggrund for senere diskussion medtages beregninger udført i 2006 på KDI's dataserie.

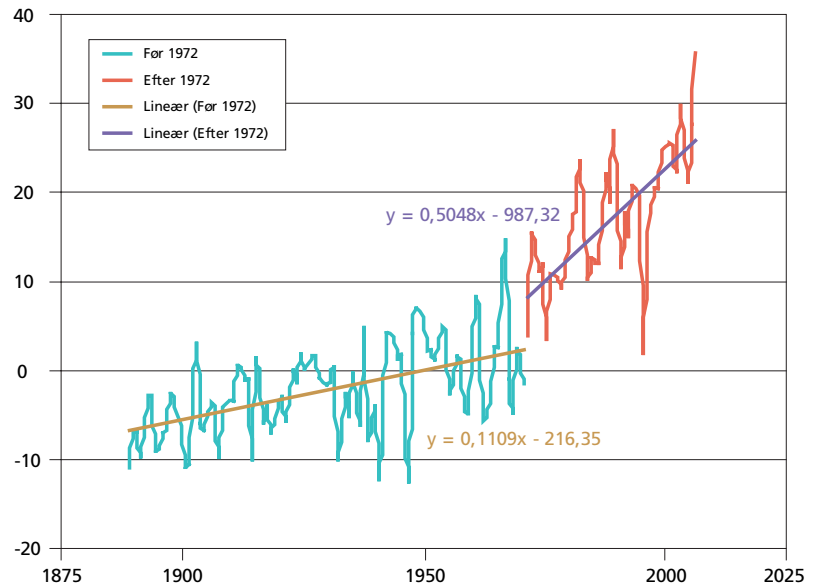
Begningerne bekræftede, at vandstandene fra Ballum, Højer og Ribe ikke er egnede til vurdering af udviklingen i middelvandstand og førte endvidere til ønsket om yderligere analysearbejde.

Udvikling i årsmidlede vandstande fra 1972 til 2005, beregnet ved hjælp af traditionel lineær regression (gennemsnitlig udvikling) for hver station, giver:

Esbjerg (KDI) =	$2,3 \cdot X - 44,8$ mm	hvor X er årstallet
Ballum =	$3,0 \cdot X - 55,4$	
Højer =	$0,6 \cdot X - 8,9$	
Ribe =	$-0,7 \cdot X + 15,9$	
Havneby =	$1,5 \cdot X - 27,2$	

Den beregnede stigning i middelvandstanden for samtlige målere (fig. 14) viser, at både middelvandstanden som stigningen vokser efter 1972. Grunden til de høje middelvandstande efter 1972 er at antallet af stationer der ikke kan måle lavvandet korrekt stiger, hvorfor kun Havneby og Esbjerg benyttes. Et bud på vandsstandstigningen i Vadehavet kunne da være $(2,3 + 1,5)/2 = 1,9$ mm/år = 0,19 cm/år.

Cm (DVR90)



Figur 14: Årsmiddele vandstande af samtlige stationer i Vadehavet og den gennemsnitlige udvikling før og efter 1972.

For at reducere indflydelsen af huller i dataserierne, er programmet S-plus (www.insightful.com/products) anvendt til beregning af en lineær model med vægtede månedsmidler. En enkelt måned med en ekstrem middelværdi, der er baseret på få målinger; - f.eks. under en storm, hvorefter udstyret er ude af drift resten af perioden, giver problemer i en normal lineær model, da stormen får for stor indflydelse på middelværdien. I den vægtede model tildeles denne ekstreme middelværdi lille betydning, fordi den er beregnet på grundlag af få målinger. Der tages således hensyn til antallet af målinger.

En lineær model med vægtede månedsmidler giver en stigning i Esbjerg på 2,1 mm/år med en standardafvigelse på 1,1 mm/år og i Havneby på 1,2 mm/år med en standardafvigelse på 1,1 mm/år. De målte vandstande i Esbjerg og Havneby er således gennemsnitligt steget $(2,1+1,2)/2 = 1,75$ mm/år = 0,175 cm/år i perioden fra 1972 til 2005.

En forskel i udvikling af middelvandstanden mellem Esbjerg og Havneby på $33 \cdot (2,1 - 1,2) \sim 30$ mm = 3 cm på 33 år anses for usandsynlig, og antages at skyldes den mindre gode kvalitet af data fra før 1990 og i de tidligere nævnte forskelle i middelvandstande i forhold til DMI's målinger før 1990.

Da usikkerheden (standardafvigelsen) på den beregnede stigning over 33 år er betydelig, er det undersøgt, hvorvidt hensyn til vindens påvirkning af vandstanden ville give en mindre standardafvigelse på vandstandsstigningen. Er det f.eks. er muligt at forklare middelvandstandens afvigelse fra gennemsnittet ud fra vindmålinger, vil usikkerheden på den beregnede stigning blive mindre.

Udvikling i middelvandstanden, hvor vindens indflydelse er fjernet

Vejret har stor indflydelse på vandstanden i Vadehavet og dermed på middelvandstanden, uanset om middelvandstanden beregnes for et år, en måned eller en uge, og der fås forskellige resultater for udviklingen afhængigt af periodens længde og starttidspunkt og af, om der tages hensyn til vejret.

I det følgende er udsvingene i middelvandstanden fra den gennemsnitlige udvikling forsøgt forklaret ud fra vejret.

Der er opstillet modeller (i Unscrambler) med en korrelation på over 0,92, svarende til at ca. 86 % af variansen i middelvandstanden kan forklares ved hjælp af de beregnede påvirkninger. Planen var oprindeligt at beregne den årlige stigning i middelvandstanden ved koefficienten til tiden. En række tests viste imidlertid, at koefficienten til tiden er påvirket af de valgte variable og af antallet af variable. For at undgå at en stigning i middelvandstand delvis forklares af en stigning eller fald i f.eks. lufttrykket, er det valgt kun at bruge det bedste af de 51 udtryk (jf. Bilag 2) for påvirkningerne.

Den bedst korrelerede med vandstanden af de 51 beregnede variable er:

$$BLA_VV_250 \sim (0.8+0.065*V)*V^2*\cos(\text{vindretning}-250^\circ).$$

BLA_VV_250 beregnes som friktionskoefficienten $\sim (0.8+0.065*V)$, der er en funktion af vindhastigheden V , ganget med V^2 projiceret ind på kompasretningen 250 grader. Anvendelse af friktionskoefficienten forbedrer korrelationen i forhold til udelukkende at anvende V^2 eller V^3 .

Beregningerne gennemføres for årsmiddel, månedsmiddel og ugemiddel for at se, hvor stor indflydelse længden af perioden, der midles over, har på resultatet.

For at beskrive de beregnede variable er følgende forkortelser benyttet Blåvand \sim BLA, Vind hastighed i m/s \sim V, Esbjerg \sim E, Sæddenstrand \sim S, RET står for, at vandstanden er rettet, og PLUS står for, at huller og perioder med få målinger er erstattet med målinger fra andre stationer.

Der er valgt de to variable BLA_VV_250, eller B_S_VV250, og TID i samtlige udregninger i de følgende afsnit, hvor B_S_VV250 beregnes fuldstændig som BLA_VV_250, idet der bruges vinddata fra Sæddenstrand fra 1972 til 1981, middel af vind fra Sæddenstrand og Blåvand fra 1982 til 1991 og vind fra Blåvand fra 1992 til 2007. TID står for den tidlige udvikling.

Erfaringen viser, at det er vanskeligt at finde den årlige stigning i middelvandstanden, hvis der medtages mange variable. Dette skyldes sandsynligvis, at nogle variable tilfældigt forklarer en del af den årlige stigning i middelvandstanden.

Data fra 2007 medtages ikke i analysen af årsmidler, da der kun er målt nogle få vinter måneder i 2007, da beregningen blev udført.

Det månedlige NAO indeks fra 1972 til 2003 er hentet fra Hurrell *et al.* (2003) og indsat i en Unscrambler analyse. Analysen viser, at der er en signifikant sammenhæng mellem NAO-index'et og den månedlige middelvand-

stand. Analysen viser dog også, jf. ovennævnte, at BLA_VV_250 bedre beskriver de lokale variationer i vandstanden.

Resultaterne fra de enkelte kørsler ses i bilag 3.

Årlige middelvandstande fra KDI-måleren i Esbjerg

Perioden fra 1982 er valgt, fordi der er målt vind i Blåvand i denne periode. Stigningen i middelvandstand i Esbjerg fra 1982 til 2006 fundet til 1,8 mm/år.

I perioden fra 1972 til 2006 findes en stigning i middelvandstanden for E_KDI_RET_Plus på 3,4 mm/år.

I perioden fra 1993 – 2003 findes en stigning i middelvandstanden for E_KDI_RET_Plus på 6,4 mm/år.

En periode på 10 år er for kort. Når vandstanden i Esbjerg stiger mere end i Atlanterhavet og Nordsøen, må det delvis skyldes eventuelle sætninger og den del af vindpåvirkningen, der ikke forklares med den valgte variabel BLA_VV250.

Månedlige middelvandstande fra KDI-måleren i Esbjerg

I perioden 1972 - 2007 findes en stigning i den månedlige middelvandstand for E_KDI_RET_Plus på 4,3 mm/år.

Den tilsvarende undersøgelse af KDI's vandstande uden at rette data og udfylde huller ~ E_KDI giver en stigning på 3,0 mm/år.

Tilpasning af KDI data giver dermed en vandstandsstigning der er 1,3 mm/år højere end ved blot at benytte rådata.

Benyttes i stedet perioden 1993 – 2003 findes en stigning i månedlige middelvandstanden for E_KDI_RET_Plus på 6,4 mm/år.

De tilsvarende kørsler for E_KDI (Esbjerg KDI uden rettelser) for 1993-2003 giver en stigning på 6,3 mm/år.

For denne periode ses kun en lille forskel, idet måleserien er næsten komplet fra 1990 og frem.

Der ses en større relativ vandspejlsstigning end de 2,3 mm/år, der findes på grundlag af satellitmålinger (fig. 7). Forskellen mellem 2,3 og 6,4 mm/år må forklares med den korte periode, og at satellitmålingen dækker et sted i Nordsøen (længde 4 grader bredde 56 grader) og vandstandsmålingerne et sted i Esbjerg Havn.

Månedlige middelvandstande fra DMI-måleren i Esbjerg

I perioden 1972-2007 findes en stigning i den månedlige middelvandstand ESB_DMI_PLUS på 3,3 mm/år.

Resultatet er 1 mm/år under ovenstående resultat fra E_KDI_RET_PLUS på 4,3 mm/år.

I perioden 1993–2003 findes en stigning i den månedlige middelvandstand ESB_DMI_PLUS på 5,7 mm/år.

Resultatet ligger 0,7 mm/år under ovenstående resultat fra E_KDI_RET_PLUS på ca. 6,4 mm/år.

Ugentlige middelvandstande fra KDI-måleren i Esbjerg

I perioden 1972-2007 findes en stigning i den ugentlige middelvandstand E_KDI_RET_Plus på 4,2 mm/år.

Perioden fra 1993 – 2003 giver en vandspejlsstigning på 5,4 mm/år.

Ugentlige middelvandstande fra DMI-måleren i Esbjerg

I perioden 1972-2007 findes en stigning i den ugentlige middelvandstand E_DMI_Plus på ca. 3,4 mm/år.

Perioden fra 1993 til 2003 giver en vandspejlsstigning på ca. 5,3 mm/år.

Ugentlige middelvandstande fra KDI-måleren i Havneby

I perioden 1972-2007 findes en stigning i middelvandstanden for måleren i Havneby (H_K_T) på 1,9 mm/år.

Perioden fra 1993 – 2003 giver en vandspejlsstigning på ca. 4,7 mm/år.

Oversigt over de beregnede stigninger i vandstanden

Vandstand		1972-2007	1982-2006	1993 -2003
E_KDI_RET_PLUS	Årlig	3,4 mm/år	1,8 mm/år	6,4 mm/år
E_KDI_RET_PLUS	Måned	4,3 mm/år		6,4 mm/år
E_KDI	Måned	3,0 mm/år		6,3 mm/år
E_DMI_PLUS	Måned	3,3 mm/år		5,7 mm/år
E_KDI_RET_PLUS	Uge	4,2 mm/år		5,4 mm/år
E_DMI_PLUS	Uge	3,4 mm/år		5,3 mm/år
H_K_T	Uge	1,9 mm/år		4,7 mm/år
Global satellit (fig. 5)				3,0 mm/år
Atlantehavet (1993-2006) (fig. 6)				3,5 mm/år
Nordsøen satellit (fig. 7)				2,2 mm/år

Tabel 1: Oversigt over beregnede stigninger i middelvandstanden i mm/år for forskellige perioder på basis af års- henholdsvis måneds- og ugemidler for Esbjerg (og Havneby).

Der iagttages en væsentlig ændring i den beregnede stigning på baggrund af årsmidler og månedsmidler for den korrigerede serie for Esbjerg, KDI (E_KDI_RET_PLUS) for perioden 1972-2007. Ændringen af den beregnede stigning i middelvandstanden mellem månedsmiddel og ugemiddel er mindre. Da det er groft ikke at benytte 11 måneder, hvis der mangler en måneds målinger i et år, anses beregninger af middelvandstanden på grundlag af månedsmiddel bedre end årsmiddel. Tilsvarende er ugemiddel bedre end månedsmiddel. Der vil sandsynligvis ske en minimal forbedring af resultatet, hvis der benyttes dagsmidler, men en 7-dobling af datamængden.

Umiddelbart burde forskellen mellem den største og den mindste beregnede årlige stigning være større ved den korte periode fra 1993 til 2003 end ved den lange periode fra 1972 til 2007, men det er ikke tilfældet. At forskellen mellem mindste og største stigning kun er $(6,4-4,7) = 1,7$ mm/år ved den korte periode og $(4,3-1,9) = 2,4$ mm/år ved den lange periode, antages at skyldes den dårligere kvalitet af målingerne før 1990.

Diskussion

Der er foretaget analyse af middelvandstande i Vadehavet i perioden 1972-2007, hvor vindens indflydelse på vandstanden er søgt fjernet. Analyserne er foretaget på vandstandsmålinger fra Esbjerg (DMI hhv. KDI) og Havneby (KDI). De øvrige vandstandsmålere i Vadehavet vurderes ikke at måle lavvandet korrekt og/eller har for korte tidsserier, hvorfor der ikke er udført egentlige analyser for disse.

I beregningerne er der som udgangspunkt talt antal timer eller dage med målinger som baggrund for udregning af uge-, måneds- og årsmidler af vandstande i Vadehavet. Eksempelvis er der talt antal timer med mindst én måling i stedet for at tælle det samlede antal målinger. Ved denne beregningsmetode er det ikke nødvendigt at opdele serien afhængigt af måleinterval.

Kvaliteten af middelvandstandene afhænger dels af præcisionen på målingerne og dels af, hvor store huller, der er i datasierne. De enkelte målinger kan således godt være af høj kvalitet selvom der er store huller i dataserien, og omvendt er fuld data dækning ingen garanti for, at de enkelte målinger er korrekte/præcise. I sammenligning af serierne af middelvandstande er der konstateret en systematisk forskel på 7 cm mellem KDI og DMI's målinger fra Esbjerg 1972-1990. Denne har der ikke kunnet redegøres for. Efter 1990 er der overensstemmelse, ligesom der ved stationerne er høj datadækning.

For at forbedre serierne af middelvandstande er middelvandstande bestemt på grundlag af under 90% af det mulige antal tidsstep (timer eller dage) erstattet med middelvandstande fra nabomåleren, når denne har haft større dækning. Herved er der konstrueret nye serier af middelvandstande med større dækning end de originale.

Vindens indflydelse på de lokale middelvandstande i Vadehavet er søgt fjernet. Der er i analysen opstillet 51 matematiske udtryk til forklaring af meteorologiske påvirkninger. Her er fundet, at de observerede variationer i middelvandstanden bedst beskrives ved udtrykket: $BLA_VV_250 \sim (0.8 + 0.065 * V) * V^2 * \cos(\text{retning} - 250)$, der tager højde for vindens friktion og hvor vindens kraft projiceres ind på kompasretningen 250 grader. Herved er en væsentlig del af variationerne i middelvandstandene forklaret.

Ved at fjerne en væsentlig del af de meteorologiske påvirkninger på vandstanden kan man tillade sig at beregne trenden for kortere perioder af middelvandstande, end hvis der benyttes traditionel regression til vurdering af trenden i middelvandstanden.

Middelvandstandene er beregnet på baggrund af årsmidler, månedsmidler og ugemidler, hvor resultaterne beregnet på ugemidler anses for de mest pålidelige og refereres i det følgende. Dog er stigningen fra 1889 til 2006 beregnet på grundlag af årsmiddel. Stigningen i den relative vandstand i Esbjerg er ca. 4 mm/år fra 1972 til 2007 og ca. 5 mm/år fra 1993 til 2003, tabel 1. Det er en klar forøgelse af den målte gennemsnitlige stigning på 1,3 mm/år fra 1889 til 2006.

Selvom det er forsøgt at forklare en væsentlig del af vindens indflydelse på middelvandstanden, er det klart, at stigningen i den relative vandstand stadig er påvirket af periodens start år og periodens længde. Da det udelukkende er danske vandstande, der undersøges, kan en del af stigningen i middelvandstanden skyldes svingninger i f.eks. NAO-indexet.

Hvis der også tages hensyn til de globale stigninger i vandstanden, er det indlysende, at de globale stigninger i vandstanden ikke kan skyldes vinden, men hovedsageligt må skyldes tilførsel af vand til verdenshavene, fordi is og sne smelter, samt opvarmning af vandet. Vandstandsmaalinger fra det 20. århundrede viser, at den globale vandstand er steget med ca. 1,7 mm/år samtidig med at jordens overfladetemperatur er steget med ca. 0,6 grader.

Maalinger med satellitterne Topex og Jason viser globale stigninger fra 1992 til 2006 på 3,0 mm/år. Når man ser på de globale stigninger målt fra satellit, er det vigtigt for tolkningen, at udsvingene fra den gennemsnitlige stigning er forholdsvis lille. Når dette sammenholdes med den globale stigning i temperaturen (fig. 2), og den del af vandstandsstigningen, der skyldes opvarmningen (fig. 3), kan der ikke være tvivl om, at vandstanden globalt er steget mere de sidste 35 år og de sidste 10 år, end vandstanden er steget i gennemsnit i det 20. århundrede.

Globalt er der således målt en forøget stigning i middelvandstanden de sidste 15 år og i Vadehavet er der målt en forøget stigning i middelvandstanden de sidste 35 år og i perioden fra 1992 til 2003. På dette grundlag ses, at middelvandstanden stiger mere end middelvandstanden i gennemsnit er steget i det 20. århundrede, og at det sandsynligvis skyldes klimaændringer.

Rent kystteknisk er det uden betydning, om det er vandet der stiger eller landet, der sætter sig. Imidlertid er de isostatiskke ændringer ikke uden betydning, når den fremtidige udvikling skal vurderes, og IPCC's antagelser om fremtidige vandspejlsstigninger skal benyttes lokalt. På grundlag af maalinger fra det 20. århundrede er vandstanden i Esbjerg steget med 13 cm, mens vandstanden globalt er steget med 18 cm. Når der ses på maalinger fra 1992 til 2003 er vandstanden lokalt steget med 5 mm/år, mens de globale vandstande er steget med 3 mm/år. Medens stigningen i Vadehavet i det 20. århundrede var mindre end den globale stigning, er det omvendte tilfældet i de senere år.

På baggrund af disse resultater er det ikke muligt at afgøre, om Esbjerg sætter sig eller er udsat for en landhævning. Da en periode på 100 år bør tillægges større vægt end en periode på 10 år, anses det for sandsynligt, at Esbjerg er tæt på "vippelinien" eller endog er udsat for en lille landhævning. Dette er i overensstemmelse med analyser af middelvandstande i den tyske del af Vadehavet, der har tilsvarende stigninger som i Danmark og anser de isostatiskke ændringer for små i forhold til de eustatiske ændringer (se f.eks. Jensen og Mudersbach, 2004; Mudersbach og Jensen, 2006) og i overensstemmelse med kommunikation med KMS og Dansk Rumcenter (KMS, 2001; Dansk Rumcenter, 2007), hvor sidstnævntes resultater baseres på foreløbige resultater fra GPS-maalinger.

Hvis IPCC's prognoser om at temperaturen stiger mellem 3 og 6 gange så meget i det 21. århundrede som i det 20. århundrede (IPCC, 2007), kan der ikke være tvivl om, at der vil komme en accelererende stigning i middelvandstanden.

Det er konstateret, at middelvandstanden stiger mere i de undersøgte perioder, end middelvandstanden er steget i gennemsnit i det 20. århundrede.

Hvorvidt den nuværende store stigning i middelvandstande er en svingning eller et udtryk for en længerevarende trend i udviklingen, kan ikke afgøres på det foreliggende grundlag.

Referencer

- Antonov, J.I., Levitus, S. & Boyer, T.P. (2005): Thermosteric sea level rise, 1955-2003. *Geophys. Res. Lett.*, 32(12), L12602.
- Aagaard, T., Nielsen, N. & Nielsen, J. (1995). Skallingen - origin and evolution. *Meddelelser fra Skalling-Laboratoriet, Institute of Geography, Univ. of Copenhagen*, bind XXXV, 85p.
- Bärring, L. & von Storch, H. (2004). Scandinavian storminess since about 1800. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L20202, 1-4.
- Bernsten, F. (1931). The Annual Fluctuation of the Sea-Water Stage on the Coasts of Scandinavia and Denmark. *Geografiska Annaler*, 13, 197-240.
- Binderup, M. (2006). Nutidens kyster og klitter. I Larsen, G. (red.): *Naturen i Danmark – Geologien*. Gyldendal. Denmark. 395-436.
- Bindoff, N.L., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quéré, S. Levitus, Y. Nojiri, C.K. Shum, L.D. Talley and A. Unnikrishnan (2007). Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (red.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Camo (1998). *The Unscrambler User Manual*, Camo ASA. www.camo.com
- Christiansen, C., Bartholdy, J., Hansen, T., Lillie, S., Nielsen, J., Nielsen, N. & Pejrup, M. (2001). Salt marsh accretion during sea-level rise and an outlook on the future. I Jørgensen, A.M., Fenger, J., Halsnæs, K. (red.), *Climate Change Research -Danish Contributions*. Gads Forlag. 263-276.
- Dansk Rumcenter (2007). Personlig kommunikation med Per Knudsen.
- Douglas, B. C. (2001). An introduction to sea level rise. I: Douglas, B. C., Kearney, M. S. & Leatherman, S. P. (red.). *Sea Level Rise –History and Consequences*. International Geophysics Series 75, Academic Press, U.S.A. 1-11.
- Duun-Christensen, J. T. (1990). Long-term variations in sea level at the Danish coast during the recent 100 years. *Proceedings of the Skagen Symposium. Journal of Coastal Research*, S19, 45-61.
- Duun-Christensen, J. T. (1992). Vandstandsændringer I Danmark. I Fenger, J. & Torp, U. (red.) *Drivhuseffekt og klimaændringer*. Miljøministeriet. 93-102.
- Führböter, A. & Jensen, J. (1985). Longterm Changes of Tidal Regime in the German Bight (North Sea), 4th Symposium on Coastal and Ocean Management, Baltimore.

- Hansen, J., L. Nazarenko, R. Ruedy, Mki. Sato, J. Willis, A. Del Genio, D. Koch, A. Lacis, K. Lo, S. Menon, T. Novakov, Ju. Perlwitz, G. Russell, G.A. Schmidt & N. Tausnev (2005). Earth's energy imbalance: Confirmation and implications. *Science*, 308, 1431-1435. Se også <http://pubs.giss.nasa.gov>
- Hoepffner, N., M. D. Dowell, M. Edwards, S. Fonda-Umani, D.R. Green, B. Greenaway, B. Hansen, C. Heinze, J.-M Leppänen, E. Lipiatou, E. Özsoy, K. Philippart, W. Salomons, A. Sanchez-Arcilla, W. Schrimpf, C. Schrum, A. Theocharis, M. Tsimplis, F. Veloso Gomes, F. Wakenhut & J.M. Zaldivar (2006). *Marine and Coastal Dimension of Climate Change in Europe - A report to the European Water Directors*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 120 pp. EUR - Scientific and Technical Research series; ISSN 1018-5593. ISBN 92-79-03747-1.
- Hurrell, J.W., Kusnir, Y., Ottersen, G. & Visbeck, M. (red.) (2003). *The North Atlantic Oscillation - Climatic Significance and Environmental Impact*. Geophysical monograph, 134. Washington, USA. ISSN 0065-8448. ISBN 0-87590-994-9.
- Hvidberg-Knudsen, M., Bolding, K., Nielsen, J. & Brink-Kjær, O. (1994). *Analyse af tidevand i Esbjerg*. DHI, Hørsholm.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (red.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Jensen, J. og Mudersbach, C. (2004). *Analyses of Variations in Water Level Time-Series at the North Sea Coastlines*. I: Littoral 2004, 7th International Symposium in Aberdeen (UK), vol. 2, EUROCOAST, Aberdeen.
- KMS (2001). Brev fra Kort- og Matrikelstyrelsen (Sigvard Stampe Villadsen) til Kystdirektoratet af 9. marts 2001 vedrørende 'Vurderinger af sætninger ved Rejsby diget'.
- KMS (2002). www.kms.dk/NR/ronlyres/5212E0EE-8441-4B6A-8F7F-9EFAB-7F9C45E/0/dvr90.pdf med flere
- Lemke, P., J. Ren, R.B. Alley, I. Allison, J. Carrasco, G. Flato, Y. Fujii, G. Kaser, P. Mote, R.H. Thomas & T. Zhang (2007). *Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (red.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Levitus, S., Antonov, J. & Boyer, T. (2005). Warming of the world ocean, 1955–2003. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L02604.

- Luterbacher, J., Dietrich, D., Xoplaki, E., Grosjean, M. & Wanner, H. (2004). European Seasonal and Annual Temperature Variability, Trends, and Extremes Since 1500. *Science*, 303. 1499-1503.
- McCarty J.J. *et al.* (2001). *Climate Change 2001. Impacts, Adaptation, and vulnerability (Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)*, Cambridge University Press, Cambridge 2001.
- Mudersbach and Jensen (2006). Recent Sea Level Variations at the North Sea and Baltic Sea Coastlines. *Proceedings of 30th Conference on Coastal Engineering, ICCE, San Diego.*
- Nerem, R.S. (2005). 2005 American Geophysical Union Bowie Lecture, The Record of Sea Level Change From Satellite Measurements: What Have We Learned? See <http://sealevel.colorado.edu/presentations.php>
- Wakelin S., Woodworth, P., Flather, R. & Williams, J. (2003). Sea-level dependence on the NAO over the NW European continental shelf. *Geophys Res Lett* 30, 1403.
- Weisse, R. & Plüss, A. (2006). Storm-related sea level variations along the North Sea coast as simulated by a high-resolution model 1958–2002. *Ocean Dynamics*, 56. 16–25.
- Weisse, R., Von Storch, H. and Feser, F. (2005). Northeast Atlantic and North Sea Storminess as Simulated by a Regional Climate Model during 1958–2001 and Comparison with Observations. *Journal of Climate*, 18. 465-479.
- Wu, J. (1980). Wind-Stress Coefficients over Sea Surface Near Neutral Conditions - A Revisit, *J. Phys. Oceanogr.* 10727-740.