Påvirkning af saltholdighed i Østersøen – konceptmodel

En konceptuel model er anvendt til at modellere påvirkninger fra fem danske infrastrukturprojekter på Østersøens hydrografi. Klimaændringernes påvirkning og deres spredning er beregnet. Betydningen af infrastrukturprojekterne er marginale, dvs. ikke målbare. Påvirkninger fra klimaændringer i år 2100 er større og målbare. Valget af klimascenarie og deres spredning er væsentlige for prognosen for år 2100.

Carsten Jürgensen, Flemming Jakobsen & Mads Joakim Birkeland

Formål

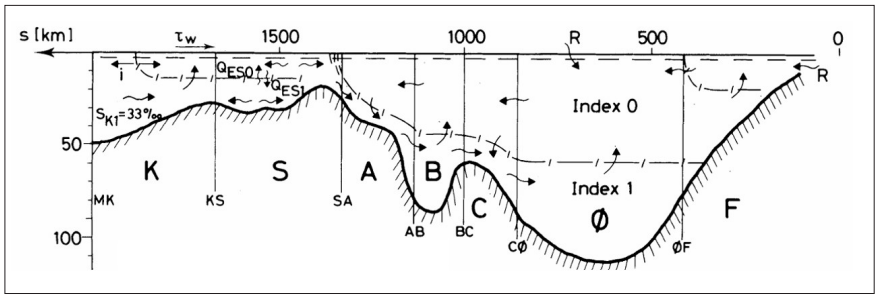
Formålet med arbejdet bag denne artikel er at opstille en konceptuel model, der kan beskrive påvirkninger på Østersøens hydrografi fra fem infrastrukturprojekter (alle på forskellige stadier i planlægningen) i de indre danske farvande samt fra klimaændringer. Ved hydrografi menes her saltholdighed, lagdeling og opholdstid. Den anvendte model bygger på en eksisterende vandskiftemodel for Østersøen, se /1/. Modellen er modificeret og udvidet til den aktuelle anvendelse.

Simuleringerne af hydrauliske nøgleparametre med en konceptuel model er udført med tre hovedformål:

- For det første skal de give uafhængige resultater i forhold til parallelt udførte modelleringer med en mekanistisk model, se /2/.
- For det andet skal de supplere med beregninger for flere klimascenarier.
- For det tredje skal de bestemme nøgleparametrenes forventningsintervaller på grund af spredningerne for havspejl, afstrømning og vind i hvert klimascenarie.

Fremgangsmåde

Den anvendte model beskriver Østersøens indbyrdes afhængige hydrografiske nøgleparametre. Modellen blev udviklet i 1981 med det formål at beskrive effekten på Østersøens hydrografi som følge af reduceret ferskvandsafstrømning til Østersøen. På det tidspunkt diskuterede man de mulige effekter på Østersøen fra en bortledning af en betydelig del af floden Nevas vandføring.



Figur 1. Principskitse for modelkonceptet, efter /1/.

Det grundlæggende modelkoncept fremgår af nedenstående principskitse i Figur 1.

Modellen betegnes som en konceptuel model, fordi den kun omfatter de styrende ligninger for de vigtigste fysiske processer, der beskriver vandskiftet mellem 6 forskellige områder af Østersøen samt transporterne mellem deres respektive øvre og nedre lag. Modellen beskriver den stationære, dvs. gennemsnitlige tilstand af saltholdigheder, skilleflade dybder og opholdstider.

Modellen deler Østersøen op i seks delområder, der med hensyn til de ovennævnte hydrografiske parametre saltholdighed, skilleflade dybde og vandføring kan antages at være homogene indenfor delområdet og forskellige fra naboområderne. For hver af disse seks delområder er de styrene ligninger opstillet. Ligningerne beskriver de mest betydende hydrauliske processer for horisontal og vertikal transport af vand og salt. Modellen omfatter 22 ligninger og 22 ubekendte.

Modelleringerne er gennemført for følgende scenarier:

Infrastrukturprojekter

De fem infrastrukturprojekter (i forskellige planfaser) omfatter Spodsberg-Tårs-forbindelsen, Kattegat-forbindelsen, Als-Fyn-forbindelsen, Stormflodssikringen for København og Østlig Ringvej. For hver forbindelse er et løsningsforslag med relativ stor strømningsreduktion udvalgt. Den samlede reduktion af vandudskiftning mellem Østersøen og Nordsøen er modelleret i /2/ og indsat i den konceptuelle model. Den samlede vandføringsændring er modelleret til at være:

$-0{,}18\% \pm 0{,}06\%$

Fortegnet betyder at vandføringen reduce-

res med 0,18% på grund af de fem infrastrukturprojekter.

Klimaændringer

Klimaændringer med størst betydning for vandskiftet i Østersøen er vandstandsstigning, ændringen i ferskvandsafstrømning til Østersøen fra land og ændringen i vindforhold. Godt nok er stigning i vandtemperaturen betydende for Østersøen økologi, den er dog af sekundær betydning for Østersøens vandskifte.

Klima: Vandstand

I modelleringerne af de klimabetingede vandstandsstigninger i /2/ er vandstandsstigningen i Bælthavet for klimascenarie SSP2-4.5 modelleret for år 2100:

$+0{,}581\ m \pm 0{,}260\ m$

Vandstanden i Bælthavet vil dermed være 58 cm højere end nu.

Klima: Afstrømning

Den klimabetingede ændring af ferskvandstilstrømning er bestemt i /2/ inklusive fordampning fra havoverfladen og nedbør på havoverfladen er den relative ændring af afstrømningen modelleret for SSP2-4.5 for år 2100:

$+18{,}0\% \pm 7{,}0\%$

Fortegnet betyder at afstrømningen øges med 18% i år 2100 i forhold til nu.

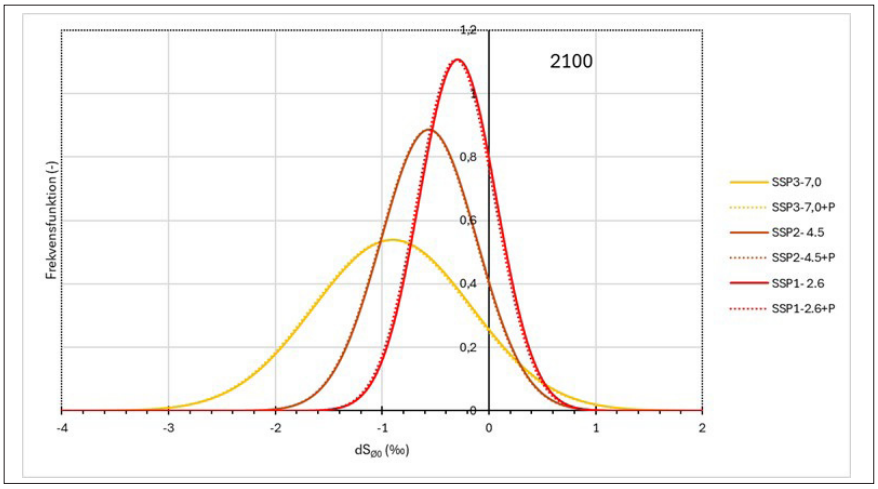
Klima: Vind

Der er stor usikkerhed omkring hvordan vindhastigheder og vindretninger vil udvikle sig på grund af klimaændringerne. I /3/ er middelvindhastigheden i den eksisterende situation angivet til 5,41 m/s for Bornholm. For år 2100 er vindhastigheden for SSP2-4.5 simuleret til:

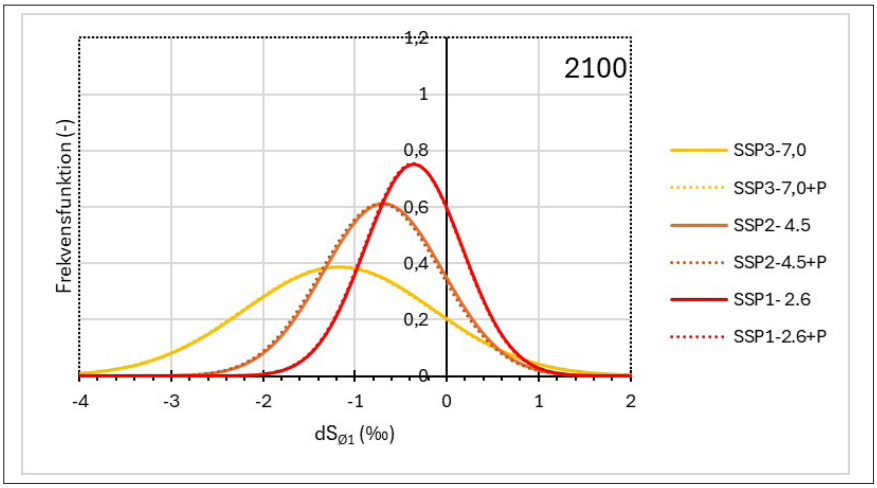
$5{,}35\ m/s \pm 0{,}078\ m/s$

Det ses at vindhastigheden forventes at aftage en smule. Vindhastigheden er dog medtaget i modelleringen fordi dens spredning bidrager til spredningen af de resulterende resultater

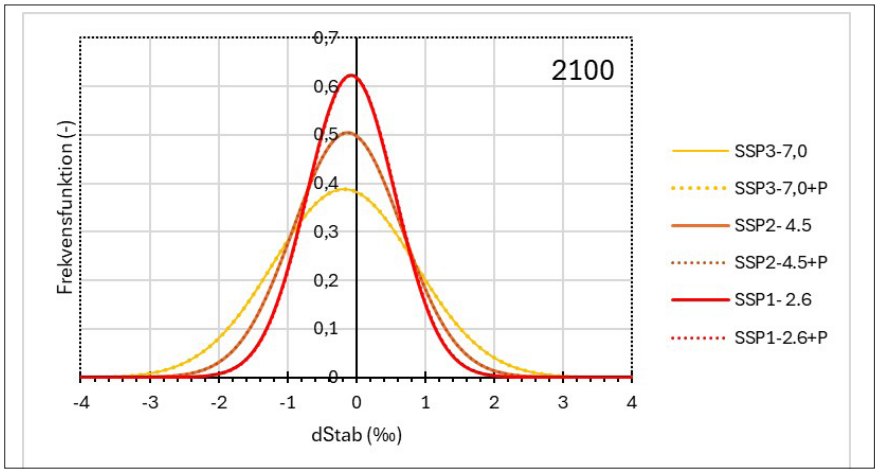
Parallelt med den her præsenterede konceptuelle modellering er der gennemført modelleringer med den mekanistiske model MIKE3, se /2/. De to modeller giver saltholdighedsændringer i øvre lag af den central Østersø med en relativ afvigelse på 6%. Dette vurderes at være meget tilfredsstillende og metoderne bekræfter dermed hinanden.



Figur 2. Frekvensfunktion af saltholdighedsændring dSØ0 i øvre lag i den centrale Østersø for de tre undersøgte klimascenarier SSP1-2.5, SSP2-4.5 og SSP3-7.0. Tilføjelsen +P betyder, at effekten af de fem infrastrukturprojekter er medtaget i de respektive klimascenarier.



Figur 3. Frekvensfunktion af saltholdighedsændring dSø1 i nedre lag i den centrale Østersø for de tre undersøgte klimascenarier med og uden effekt fra infrastrukturprojekter.



Figur 4. Frekvensfunktion af stabiliteten dStab i den centrale Østersø for de tre undersøgte klimascenarier med og uden effekt fra infrastrukturprojekter.

Resultater

Modelresultaterne viser, at infrastrukturprojekterne vil have følgende påvirkninger:

- Saltholdighederne i den centrale Østersø (ud for Gotland) vi sænkes med ca. 0,02‰ i øvre og nedre lag ved et udgangsniveau på 7‰ i øvre lag og 11‰ i nedre lag. Betegnelsen "‰" står for gram salt per kilogram havvand.
- Saltholdighedsforskellen mellem øvre og nedre lag, som i udgangspunktet er 4‰, sænkes med ca. 0,003‰

- Lagdelingens dybde på ca. 60 m øges med ca. 4 cm
- Opholdstiden for den centrale Østersø på ca. 30 år øges med ca. 2 uger

Disse påvirkninger i den centrale Østersø aftager på vej ud gennem de danske stræder.

Klimaændringernes påvirkninger i året 2100 er beregnet for tre klimascenarier. For det midterste scenarie (SSP2-4.5) er følgende resultater fundet for den centrale Østersø:

- Saltholdighederne sænkes på grund af de samlede klimaændringer med 0,53‰ i øvre og med 0,69‰ i nedre lag
- Saltholdighedsforskellen mellem øvre og nedre lag, som i udgangspunktet er 4‰ sænkes med ca. 0,17‰
- Lagdelingens dybde øges med ca. 0,1m
- Opholdstiden øges med ca. 4 år

Ved det mindre klimascenarie SSP1-2.6 er de tilsvarende ændringer af saltholdighederne ca. 0,2‰ mindre. Ved det højere klimascenarie SSP3-7.0 er saltholdighedsændringerne ca. 0,4‰ højere. Dermed er valget af klimascenarie af stor betydning for de resulterende påvirkninger.

Med hensyn til prognosen for år 2100, er den behæftet med stor spredning. Den tilsvarende spredning på infrastrukturprojekternes påvirkninger er væsentlig mindre og overskygges af klimaændringernes spredning.

Om de fundne ændringer af de hydrauliske parametre er betydende for Østersøens økosystem i år 2100 kan ikke alene afgøres på baggrund af de her undersøgte påvirkninger af de hydrografiske nøgleparametre. Nøgleparametrene leverer dog de fysiske rammer for en efterfølgende modellering af økosystemet.

Sammenfattende illustreres nøgleresultaterne i Figur 2 for saltholdighed i overfladen af den centrale Østersø. Figuren viser saltholdighedens frekvensfunktion for tre undersøgte klimascenarier. Frekvensfunktionen viser sandsynlighedsfordelingen på Y-aksen for den pågældende saltholdighed på X-aksen. For alle tre scenarier gælder, at den fuldt optrukne linje viser ændringer pga. klimaændringer alene og at den stiplede linje viser ændringer pga. klimaændringer plus ændringer pga. infrastrukturprojekter.

Figuren illustrerer således effekten af tre forskellige klimascenarier og størrelsen af forventningsintervallerne, som er illustreret ved klokkeformens bredde.

Forskellen mellem den stiplede linje og den fuldt optrukne linje viser den samlede effekt af de fem infrastrukturprojekter.

Tilsvarende er forholdene for saltholdigheden i nedre lag i den centrale Østersø vist i Figur 3 og for saltholdighedsforskellen mellem øvre on nedre lag (et udtryk for lagdelingens stabilitet) i Figur 4.

Konklusion

Sammenfattende giver modelberegningerne en størrelsesorden af såvel projekternes påvirkning i sig selv og en perspektivering på den forventede tilstand i år 2100.

Projekternes påvirkning

- Projekterne vil påvirke saltholdigheden i øvre og nedre lag i den centrale Østersø med ca. -0,023‰ i øvre lag og -0,026 ‰ i nedre lag. Denne ændring af langtidsmiddelværdien vil være for lille til at kunne blive målt.
- Den tilsvarende påvirkning/svækkelse af skillefaldestabiliteten er af mindre størrelsesorden og beregnet til -0,003‰. Denne ændring anses ikke for at være praktisk eftervisligt. Skillefladens vertikale beliggenhed er stort set uændret.
- Opholdstiden vil mindskes med ca. 2 uger på grund af projekterne. Denne ændring skal ses i forhold til en tidsskala for opholdstiden på 30 år.

De projektbetingede påvirkninger anses for at være marginale og vil ikke kunne måles.

Klimaændringernes påvirkning

- For prognosen for år 2100 af Østersøens hydrografiske tilstand konkluderes det, at de klimabetingede påvirkninger på de hydrografiske nøgleparametre i den centrale Østersø i år 2100 vil være målelige. De vil overskygge de projektbetingede påvirkninger.
- Forventningsintervallerne af klimaændringernes påvirkninger er betydelig bredere end forventningsintervallet af projekternes påvirkninger. Om infrastrukturprojekterne inddrages i beregningerne af prognoserne for år 2100 eller ikke, er ikke betydende for prognosens udfald.
- Ved prognoser for længere perioder end til år 2100 stiger risikoen for systemskifte i klimasystemerne (f.eks. stop af Golfstrøm, løsrivning af store mængder is fra Antarktis el.lign.). Dermed stiger også risikoen for at det hydrografiske system for Østersø ændrer sig så meget, at den anvendte model ikke længere vil være gyldig.

Referencer

/1/ Pedersen, Fl. Bo and Møller, J. S. Diversion of River Neva - How will it Influence the Baltic Sea, the Belts and Cattegat. s.l. : Nordic Hydrology, p. 1-20, 1981.

/2/ COWI/DHI. Strømningsanalyse, mv. af fremskudt færgehavn ved Tårs, Hydrografisk modellering. Udarbejdet for Sund og Bælt. Lyngby : COWI, 2025.

/3/ DMI. DMI_Klimaatlas_v2024a_Kommuner_ Alle.xlsx (live.com). https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fdownload.dmi.dk%2FResearch_Projects%2Fklimaatlas%2Fv2024a%2Fexcel_spreadsheets%2FDMI_Klimaatlas_v2024a_Kommuner_Alle.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK. [Online] 2024.

Carsten Jürgensen, senior hydrauliker, COWI A/S,
e-mail: carsten.jurgensen@outlook.com
Flemming Jakobsen, global chefingeniør ved DHI A/S,
e-mail: flj@dhigroup.com
Mads Joakim Birkeland, seniorbiolog ved DHI A/S,
e-mail: mbi@dhigroup.com