

SUND OG BÆLT

STRØMNINGSANALYSE, MV. AF FREMSKUDT FÆRGEHAVN VED TÅRS

ADRESSE COWI A/S
Parallelvej 2
2800 Kongens Lyngby

TLF +45 56 40 00 00

FAX +45 56 40 99 99

WWW cowi.dk

MODELLERING AF CIRKULATION I ØSTERSØEN
MED KONCEPTUEL MODEL

INDHOLD

1	Sammenfatning	2
2	Formål	5
3	Metode	5
3.1	Antagelser	5
3.2	Beregningskoncept	7
3.3	Ferskvandstilstrømning	9
3.4	Vandstandsstigning	10
3.5	Vindhastighedsændring	16
3.6	Påvirkninger fra infrastrukturprojekter	20
3.7	Hydrauliske konsekvensberegning	20
4	Resultater	22
4.1	Projekternes påvirkning	22
4.2	Påvirkninger fra klimaændringer	25
5	Diskussion	33
5.1	Effekter på hydrografien	33
5.2	Projekternes påvirkning	34
5.3	Konklusion	39
6	Referencer	42

PROJEKTNR.

A258774

DOKUMENTNR.

HYD-RAP-02

VERSION

1.0

UDGIVELSESDATO

2 juni 2025

BESKRIVELSE

Rapport

UDARBEJDET

CNJNX/HRNA

KONTROLLERET

FLJNX/JJU

GODKENDT

JJU

1 Sammenfatning

Påvirkningen af undersøgte infrastrukturprojekter i de indre danske farvande på Østersøens hydrografiske forhold er belyst gennem anvendelse af en konceptuel model. Klimaændringernes påvirkninger er ligeledes belyst. De undersøgte infrastrukturprojekter omfatter 1) Stormflodssikring af hovedstaden, 2) Østlig Ringvej, 3) Als-Fyn forbindelsen, 4) Fremskudt færgehavn ved Tårs og 5) Kattegatforbindelsen. Den konceptuelle model beskriver Østersøens hydrografiske forhold ved nøgleparametrene saltholdighed, lagdeling, vandføring og opholdstid. Den konceptuelle model er oprindeligt udviklet af (Pedersen & Møller, 1981) men videreudviklet og tilpasset den aktuelle anvendelse i (COWI/DHI, 2024c). Modelberegningerne med den konceptuelle model er udført parallelt med den mekanistiske modellering (de to modeller er uafhængige) med det primære formål at supplere med beregninger af flere klimascenarier og af spredningen af resultaterne.

Den anvendte konceptuelle model bygger på de grundlæggende styrende ligninger der beskriver transport af vandvolumen og salt mellem forskellige delområder af Østersøen. Det antages, at ændringerne i Østersøens hydrografiske tilstande er så små, at ligningerne kan simplificeres og løses forholdsvis enkelt og hurtigt. Modellen indbefatter udefra kommende påvirkninger så som vandføringsændring i de danske stræder på grund af infrastrukturprojekter, samt påvirkninger fra klimaændringer (øget havspejlstigning, øget ferskvandsafstrømning og ændringer i vindhastighed). Den konceptuelle model er udvidet med en væsentlig cirkulationsproces, der beskriver den nedadrettede medrivning i Gotlandsbassinet, for mere retvisende at beskrive de fysiske transportprocesser i den centrale Østersø.

Modelresultaterne viser at infrastrukturprojekterne vil have følgende påvirkninger:

Saltholdighederne i den centrale Østersø (ud for Gotland) vil 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 ændres med ca. 4 cm
- > Opholdstiden for den centrale Østersø på ca. 30 år øges med ca. 2 uger

Modelresultaterne fremgår nedenstående i tabelform:

Tabel 1-1 Modelresultater for påvirkninger i Gotlandsbassinet af infrastrukturprojekter

	Reference	Påvirkning
Saltholdighed, øvre lag (‰)	7	-0,02
Saltholdighed, nedre lag (‰)	11	-0,02
Saltholdighedsforskel (Stabilitet (‰))	4	-0,003
Lagdelingens dybde (m)	60	0,04
Opholdstid (år)	30	0,04

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 sænkes med ca. 0,1m
- > Opholdstiden øges med ca. 4 år

Modelresultaterne fremgår nedenstående i tabelform:

Tabel 1-2 Modelresultater for påvirkninger i Gotlandsbassinet af klimaændringer

	Reference	Påvirkning
Saltholdighed, øvre lag (‰)	7	-0,53
Saltholdighed, nedre lag (‰)	11	-0,69
Saltholdighedsforskel (Stabilitet (‰))	4	-0,17
Lagdelingens dybde (m)	60	0,1
Opholdstid (år)	30	4

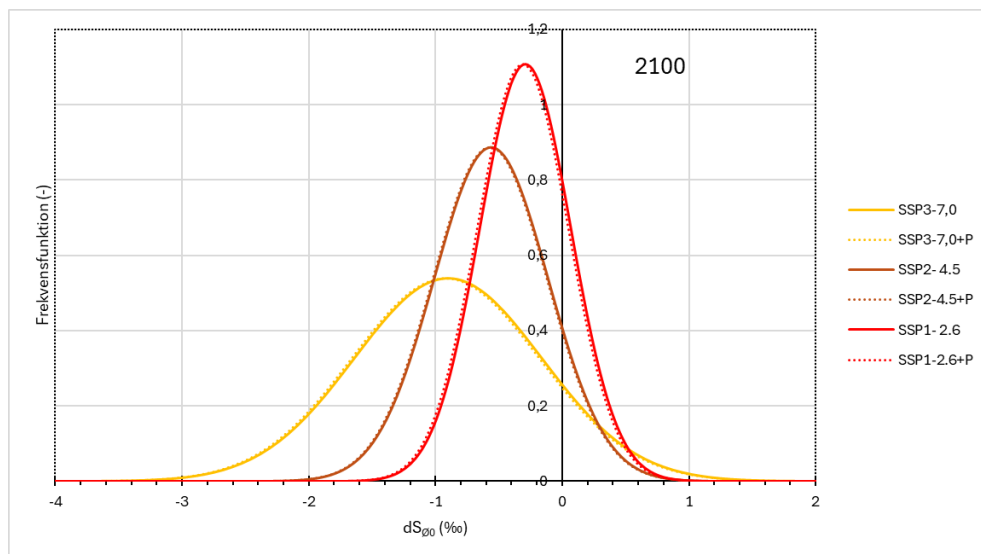
Ved det mindre klimascenarie SSP1-2.6 er ændringerne af saltholdighederne ca. 0,2‰ mindre, ved det højere klimascenarie SSP3-7.0 er saltholdighedsændringerne ca. 0,4‰ højere. Dermed er valget af klimascenariet af stor betydning for de resulterende påvirkninger.

Med hensyn til prognosen for år 2100, er den behæftet med stor spredning, især på grund af spredningerne for klimaændringerne. Den tilsvarende spredning på infrastrukturprojekternes påvirkninger er væsentlig mindre og overskygges af klimaændringernes spredning. Anvendelse af 3 statistiske test viser at prognoser for de hydrauliske forhold i år 2100 i høj grad er ensartet, hvad enten infrastrukturprojekterne inddrages i beregningerne eller ikke. Prognosen er domineret af klimaændringernes spredninger.

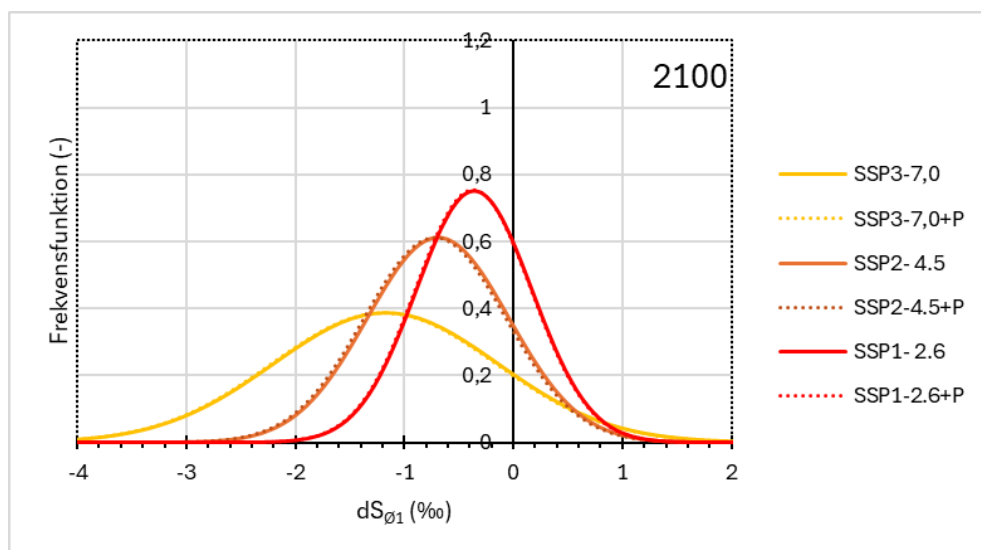
Om de fundne ændringer af de hydrauliske parametre er betydende for Østersøens økosystem i år 2100 kan ikke alene afgøres på baggrund af de her undersøgte påvirkninger af de hydrografiske nøgleparametre. Nøgleparametrene leverer dog de fysiske rammer for en efterfølgende modellering af økosystemet.

Sammenfattende illustreres nøgleresultaterne i følgende figurer. For alle tre figurer gælder:

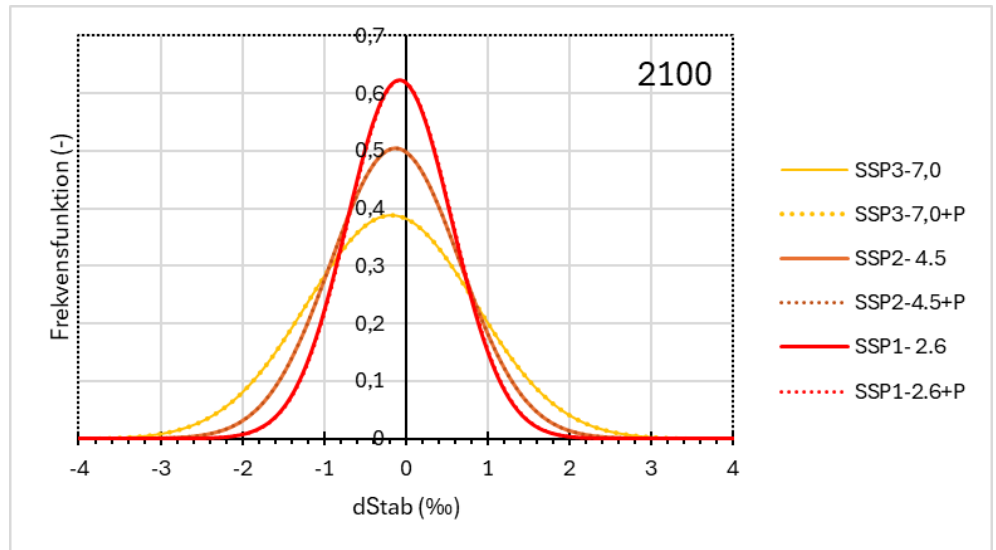
- > Fuldt optrukken linje: Ændringer uden projekter
- > Stiplet linje: Ændringer med projekter



Figur 1-1 Frekvensfunktion af saltholdighedsændring i øvre lag i den centrale Østersø dS_{00} for de tre undersøgte klimascenarier.



Figur 1-2 Frekvensfunktion af saltholdighedsændring i nedre lag i den centrale Østersø dS_{01} for de tre klimascenarier.



Figur 1-3 Frekvensfunktion af ændringen af stabiliteten (saltholdighedsforskel over skillefladen) i den centrale Østersø for de tre klimascenarier.

2 Formål

Denne rapport beskriver påvirkninger på Østersøens hydrauliske nøgleparametre som følge af undersøgte infrastrukturprojekter og fra klimaændringer på basis af en konceptuel model, præsenteret i (Pedersen & Møller, 1981) og videreudviklet til det aktuelle formål i (COWI/DHI, 2024c). De undersøgte infrastrukturprojekter omfatter 1) Stormflodssikring af hovedstaden (bl.a. med Lynetteholm), 2) Østlig Ringvej, 3) Als-Fyn forbindelsen, 4) Fremskudt færgehavn ved Tårs og 5) Kattegatforbindelsen.

Rapporten beskriver det overordnede princip i beregningerne såvel som de beregnede resultater.

3 Metode

Metodeafsnittet omfatter beskrivelsen af den konceptuelle models antagelser, en beskrivelse af beregningskonceptet, en analyse af de udefra kommende indvirkninger i form af afstrømning, vandstandsstigning, vind og strømningsændring fra infrastrukturprojekter i de danske farvande. Derudover er valget af de hydrauliske nøgleparametre begrundet. For en nærmere beskrivelse af metoden og dets modifikationer henvises til (COWI/DHI, 2025).

3.1 Antagelser

Den konceptuelle models grundlæggende antagelser, fordele og ulemper er listet i det følgende:

Antagelser:

1. Modellen regner på en lang tids middeltilstand (stationære forhold), der gælder for perioder, der er længere end 30 år. Dette indebærer at

effekten af sporadiske større saltvandsindstrømninger (Major Baltic Inflows) er inkluderet i analysen.

2. Østersøens lagdeling tilnærmes med en 2-lags-struktur, og dækker Østersøen ud til overgangen mellem Kattegat og Skagerrak.
3. Østersøen deles op i 6 områder (bokse), i hvilke tilstandene (saltholdighed, lagtykkelser og vandføringerne mellem områderne) antages homogene, i hhv. øvre og nedre lag.
4. Tilstandsændringerne antages så marginale at processerne kan beskrives i lineariseret form.
5. Saltholdighederne, skillefladepositionerne og vandføringerne beregnes på baggrund af grundlæggende fysiske grundregler (bevarelse af volumen, masse, energi), af vindens påvirkning af strømninger over tærskelområdet og af vindens påvirkning af vertikal blanding.
6. Kun de for cirkulationen af vand og salt væsentligste processer er medtaget (22 ligninger, 22 ubekendte).

Fordele:

7. Modellen er udvidet med en yderligere proces (nedadrette medrivning i Gotland bassinet). Denne proces viser sig at være betydende for påvirkningsberegninger af de hydrografiske forhold ved ændret ferskvandsaftstrømning.
8. Modellen er i sit koncept stabil, der foregår derfor ingen numerisk dissipation eller instabiliteter. Alle processer er beskrevet.
9. Numerisk beregningstid er ubetydelig.
10. Forskellige hydrauliske processer kan tilføjes til modellen, således er ændring af havvandstand, vindhastighed, strømningsmodstand i Bælthavet indført i den oprindelige model.
11. God overensstemmelse med resultater beregnet med væsentlig mere komplekse, se (COWI, DHI, 2024) modeller.

Ulemper:

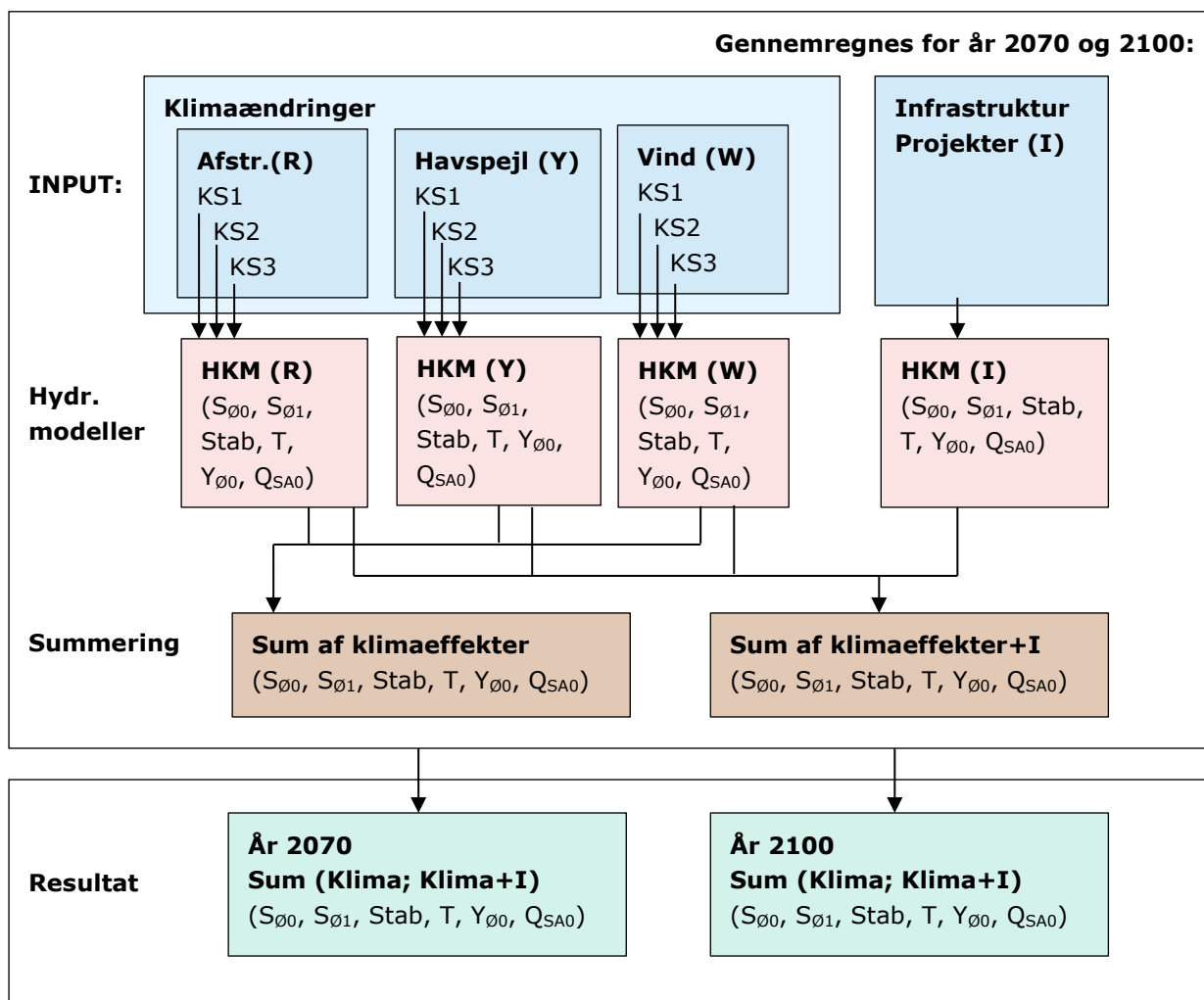
12. Grov opløselighed i rummet.
13. Ingen variation med tiden (stationær model).
14. Beregningerne kræver anvendelse af en række komplekse regneark.
15. Beregninger er baseret på et sæt af saltholdigheder med dertil svarende vandføringer og blandingsprocesser. En ændring af dette system kræver en ny programmering af grundlaget.

16. Der er ikke indført biokemiske processer i modellen.

3.2 Beregningskoncept

Klimaændringernes og infrastrukturprojekternes effekter bestemmes for udvalgte hydrografiske nøgleparametre for den centrale Østersø. Den principielle fremgangsmåde er skitseret i Figur 3-1. Figuren illustrerer hvilke input er anvendt (blå), hvordan de anvendes i de forskellige modeller og hvilke parametre modellerne bestemmer (pink). Delresultaterne fra de forskellige processer summeres for hvert klimascenarie samt for infrastrukturprojekterne (brun) og præsenteres på forskellig vis (brun).

Til bestemmelse af klimaændringerne anvendes IPCCs modellerede værdier for år 2070 og 2100. Disse to årstal er anvendt som slutårene på 30 års perioder, dvs. for perioden 2040-2070 og 2070-2100. I det følgende anvendes de modellerede værdier for perioden 2040 til 2070 til at vurdere forholdene i år 2050 og værdierne for perioden 2070-2100 til vurdering af forholdene i år 2100. Den mindre forskel i centreringen af tidsintervallerne har ingen indflydelse på den centrale vurdering af forholdene omkring 2100 og kun en mindre betydning i beskrivelse af udviklingen over tid.



Figur 3-1 Principiel fremgangsmåde til modellering af klimaændringernes og infrastrukturprojekternes effekt på hydrografiske nøgleparametre i Østersøen.

KS: Klimascenarie, HKM: Hydrografisk Konceptuel Model

R: Afstrømning, Y: Vandstand; W: Vind,

I: Infrastrukturprojekter (strømningsændring)

Klima=Klimaeffekter

Hydrauliske nøgleparametre:

S_{00} : Saltholdighed Østersø, øvre lag

S_{01} : Saltholdighed, Østersø, nedre lag

Stab: Stabilitet=Forskel mellem S_{01} og S_{00}

T: Opholdstid i Østersøen

Y_{00} : Lagtykkelse Østersø, øvre lag

Q_{SA0} : Vandføring over tærsklerne (Drogden, Gedser)

Resultaterne nedskaleres til de lokale forhold. Der anvendes tre forskellige klimascenarier iht. Afgrænsningsnotatet (COWI/DHI, 2024), som er SSP1-2.6; SSP2-4.5 og SSP3-7.0. Klimaændringerne på følgende tre processer lægges til grund for analysen af klimaændringernes effekt på Østersøen:

- Ferskvandsafstrømning
Ferskvandstilstrømning omfatter afstrømning fra land (fra floder og

vandløb) plus direkte nedbør på havoverfladen minus fordampning fra havoverfladen. Denne proces er omfattet i den oprindelige model i (Pedersen & Møller, 1981)

- **Vandstandsstigning**
Klimaændringernes effekt på den lokale vandstandsstigning i Bælthavet anvendes. Effekten af øget vandstand i Bælthavet på vandføringen til og fra Østersøen gennem Bælthavet bestemmes og er indført i modellens formelsystemet.
- **Vind**
Vindens effekt på havet er to-fold. Øget vind giver anledning til øget opadrettet medrivning. Øget vind vil ligeledes øge strømningerne gennem Bælthavet og dermed vandudskiftningen af Østersøen. Selvom vindforholdene ikke forventes at ændre sig betydende frem til år 2100, er der knyttet en betydende spredning til de fremtidigt forventede vindforhold. Denne spredning bidrager til spredningen af klimaændringernes samlede effekt på hydrografien. Derfor er en marginal mindskeelse af median-vindstyrken inklusive dets forventede spredning medtaget i den konceptuelle model. Det bemærkes at den marginale vindændring ikke er medtaget i den mekanistiske modellering i (COWI/DHI, 2025).
- **Infrastrukturprojekter**
Broer, øer og andre anlæg i de indre danske farvande vil give anledning til en reduceret vandføring gennem Bælthavet. Den resulterende effekt på strømningsændringen af de 5 undersøgte projekter er vurderet: Fremskudt færgehavn ved Tårs, Kattegatforbindelsen, Als-Fyn forbindelsen, Stormflodssikring af hovedstaden, Østlig Ringvej.

Disse påvirkninger fra klimaændringer og infrastrukturprojekter indgår som input til fire konceptuelle modeller, der er udviklet over (Pedersen & Møller, 1981). De fire forskellige modelopsætninger beskriver effekter på seks udvalgte hydrografiske nøgleparametre i den centrale Østersø.

3.3 Ferskvandstilstrømning

Ferskvandstilstrømning Q_f betegner i det følgende summen af afstrømningen ("River Runoff") R fra land plus bidraget af nedbøren P ("Precipitation") på havoverfladen minus fordampningen E ("Evaporation") fra havoverfladen:

$$Q_f = R + P - E$$

Følgende værdier er modelleret for scenarie SSP2-4.5 i (COWI/DHI, 2024).

Det ses af nedenstående tabel, at effekterne af nedbøren P på Østersøens havoverflade stort set ophæves af fordampningen E fra havoverfladen, hvilket er i overensstemmelse med gængs opfattelse. Effekten fra disse processer på den samlede ferskvandstilførsel til Østersøen betyder at den fra 2019 til 2100 vil stige med ca. 18,0%, mens ferskvandsafstrømningen fra land - taget for sig selv - stiger med ca. 18,7%. For de videre beregninger med den konceptuelle model

anvendes den samlede tilstrømning Qf. Faktoren på 18,0% gælder således for scenarie SSP2-4.5 og for året 2100.

Tabel 3-1 *Oversigt over indgangsparametre for ferskvandstilstrømning (SSP2-4.5).*

Gennemsnit	R: Afstrømning (R) fra land (m ³ /s)	P: Nedbør på havoverfladen (m ³ /s)	E: Fordampning havoverfladen (m ³ /s)	Qf: Samlet ferskvandstilfø- rsel (m ³ /s)
2019	13.788	7.004	5.973	14.819
2100	16.368	7.745	6.623	17.490
Rel. ændring (%)	18,7	10,6	10,9	18,0

Der foreligger ikke direkte modelleringer af tilstrømningens klimafaktorer for andre scenarier eller for andre årstal. Derimod foreligger klimafaktorer for nedbøren, se (COWI/DHI, 2024). Det antages at klimafaktorer for tilstrømning varierer proportionalt med klimafaktorerne for nedbør. For scenarie SSP2-4.5 er nedbørens klimafaktor modelleret til 11%, mens den tilsvarende klimafaktor for tilstrømning, som nævnt ovenfor, er 18%. Dette forhold ($18/11 \approx 1,64$) anvendes til at skalere klimafaktorerne for tilstrømningernes middelværdi i de andre scenarier og for andre årstal.

En yderligere statistisk beskrivelse er givet i Bilag B.

Resultaterne for normalfordelingerne af ferskvandstilstrømning er givet for året 2050 og 2100 i nedenstående tabel.

Tabel 3-2 *Klimafaktorer for ferskvandstilstrømningernes normalfordelinger for årene 2050 og 2100.*

	2050			2100		
	SSP1- 2.6	SSP2- 4.5	SSP3- 7.0	SSP1- 2.6	SSP2- 4.5	SSP3- 7.0
Middelværdi μ (%)	7,0	9,0	8,2	9,5	18,0	28,4
Spredning σ (%)	5,0	5,5	8,3	5,5	7,0	11,9

3.4 Vandstandsstigning

Vurdering af den fremtidige vandstandsstigning er baseret på prognoserne i (DMI, DMI_Klimaatlas_v2024a_Havspejlsstigning.xlsx (live.com), 2024). Her er valgt positionen i Femern Belt som definerer det bestemmende tværsnit og dermed vandudvekslingen mellem Østersøen og Nordsøen. For hver af de ovennævnte klimascenarier og for hvert år mellem 2020 og 2150 er der angivet 10%, 50% og 90% fraktiler af den forventede vandstandsændring.

I modelleringerne af de klimabetingede vandstandsstigninger i (COWI/DHI, 2024) er vandstandsforholdene i scenarie SP2-4.5 modelleret for årene 2019 og 2100. Ved at antage at vandstandsstigningerne modelleret af DMI for 2020 svarer til forholdene modelleret af DHI i 2019 findes:

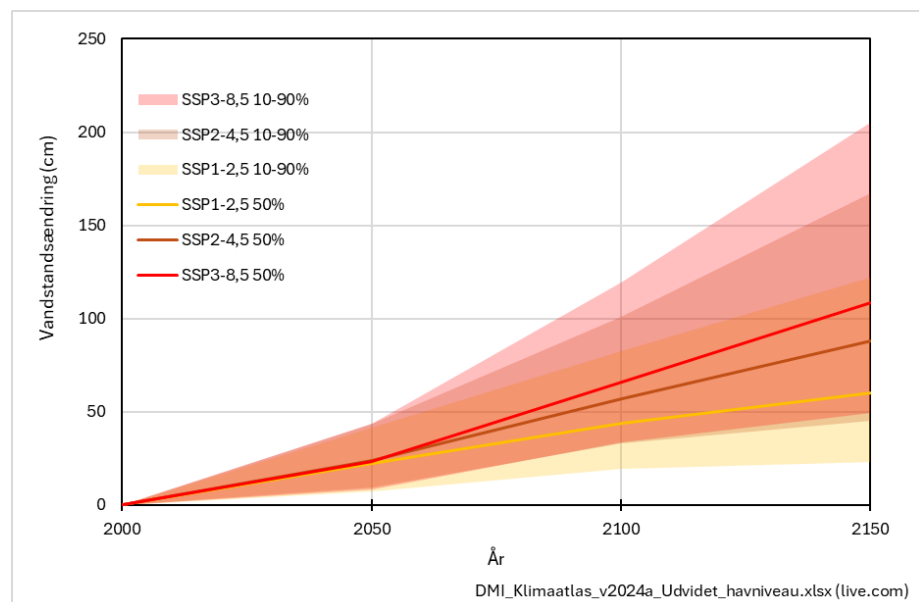
Tabel 3-3 Vandstandsstigninger (m) ift. År 2000 modelleret i scenarie SSP2-4.5 for Femern Belt af hhv. DMI og DHI.

	DMI	DHI
2019	0,066	0,089
2100	0,568	0,581

Det ses af ovenstående, at forskellene mellem de to modelleringer er minimale og uden praktisk betydning. For at anvende resultater, der er konsistente med DHI's modelleringer, anvendes derfor DMI's dataset modificeret således, at det er i overensstemmelse med DHI's data for scenarie SSP2-4.5 for årene 2020 og 2100. DMI's data modificeres således efter følgende lineære transformation, der er beskrevet af linjen der forbinder de to punkter fra Tabel 3-3.

$$VST_{DHI} = 0,9805 \cdot VST_{DMI} + 0,0242$$

Den tidlige udvikling af 50% fraktillerne (medianværdierne) samt forventningsintervallet (10%-90 % fraktiler) af vandstandsstigningerne for de tre klimascenarier fra år 2000 helt frem til år 2150 er vist i nedenstående Figur 3-2. Det understreges at den videre analyse udelukkende gennemføres for årene 2050 og 2100. At nedenstående figur også medtager prognosen for år 2150 skal illustrere at udviklingen ikke stopper i 2100, men at vandstandsstigningen forventes at fortsætte med tiltagende forventningsinterval.



Figur 3-2 Tidlig udvikling af forventningsintervallet for vandstandsstigningerne i Femern Bælt for de undersøgte tre klimascenarier for årene 2000 (reference), 2050, 2100 og 2150. Forventningsintervallet er vist som udfaldene mellem 10% og 90% fraktillerne samt ved medianværdierne (50% fraktillerne) efter (DMI, DMI_Klimaatlas_v2024a_Havspejlsstigning.xlsx (live.com), 2024).

For tiden mellem år 2100 og 2150 ses det, at forventningsintervallet for vandstandsstigningen er ca. to gange så stort som selve vandstandsstigningen (medianværdien).

3.4.1 Normalfordelingens middelværdi

Som det centrale estimat anvendes 50% fraktilen (medianen) fra (DMI, DMI_Klimaatlas_v2024a_Havspejlsstigning.xlsx (live.com), 2024). Den indgår som middelværdi μ i en tilnærmet normalfordeling. Normalfordelingen er anvendt fordi antallet af modelkørsler, der ligger til grund for DMI's Klimaatlas, er begrænset (typisk mellem 5 og 15), som ikke giver et grundlag for at bestemme en bestemt fordeling. Derudover skal fordelingerne for de tre klimaparametre (ferskvandstilstrømning, vandstandsstigning og vindændring) plus fordelingen for infrastrukturprojekterne lægges sammen. Ved at lægge mange forskellige stokastiske processer sammen, vil den resulterende fordeling nærme sig en normalfordeling (Højsgaard, 2019).

3.4.2 Normalfordelingens spredning

Derudover estimeres en tilsvarende spredning σ baseret på 10% og 90% fraktiler angivet i samme kilde (DMI, DMI_Klimaatlas_v2024a_Kommuner_Alle.xlsx (live.com), 2024). I en normalfordeling med middelværdi μ lig med 0 og en spredning σ på 1 vil 10% og 90% fraktilerne svare til koordinaterne for hhv. $-1,28 \cdot \sigma$ og $+1,28 \cdot \sigma$, se i øvrigt (Højsgaard, 2019). Forskellen mellem værdierne for 90% og 10% fraktilerne kan derfor beskrives som $(2 \cdot 1,28 \cdot \sigma)$ i den tilnærmede normalfordeling. Dermed findes et udtryk for spredning σ som funktion af 10% fraktilen fr_{10} og 90% fraktilen fr_{90} på

$$\sigma = \frac{fr_{90} - fr_{10}}{2,56}$$

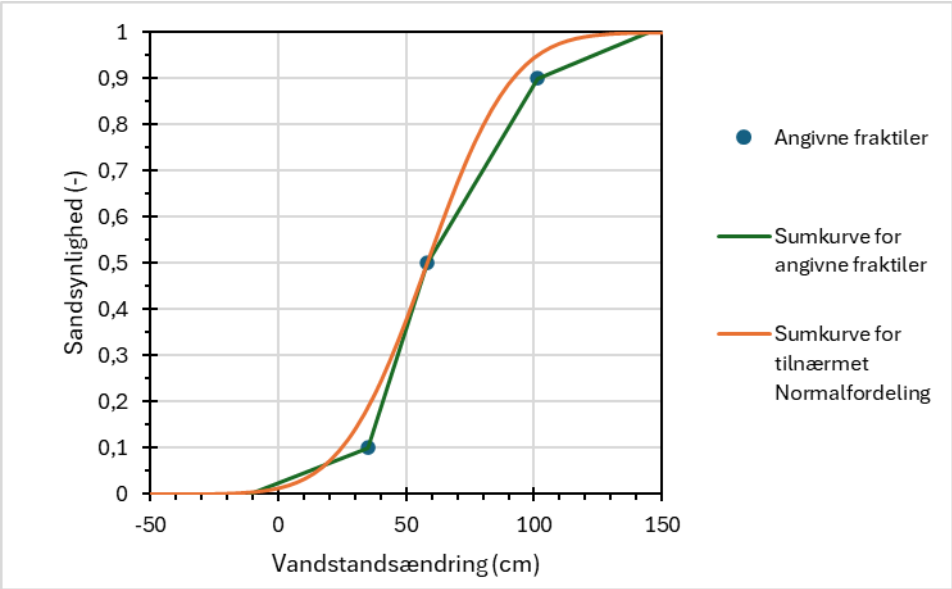
Ofte ligger 10% fraktilen og 90% fraktilen i forskellig afstand fra medianværdien (50% fraktilen), og sådanne fordelinger betegnes som ikke ligeligt fordelt omkring medianværdien. Normalfordelingen er derimod per definition ligeligt fordelt omkring medianværdien. Derfor er det ikke givet på forhånd, at en givet fordeling af en klimaparameter med rimelighed kan tilnærmes med en normalfordeling. At det med de aktuelle værdier med rimelighed kan lade sig gøre er vist nedenfor.

Fraktiler er omregnet til et centralt estimat på ændringerne af vandstandsstigningen samt en dertil hørende spredning, efter fremgangsmåden som beskrevet ovenfor. Resultaterne for de tilnærmede normalfordelinger for vandstandsstigningerne er givet for året 2050 og 2100 i nedenstående Tabel 3-4.

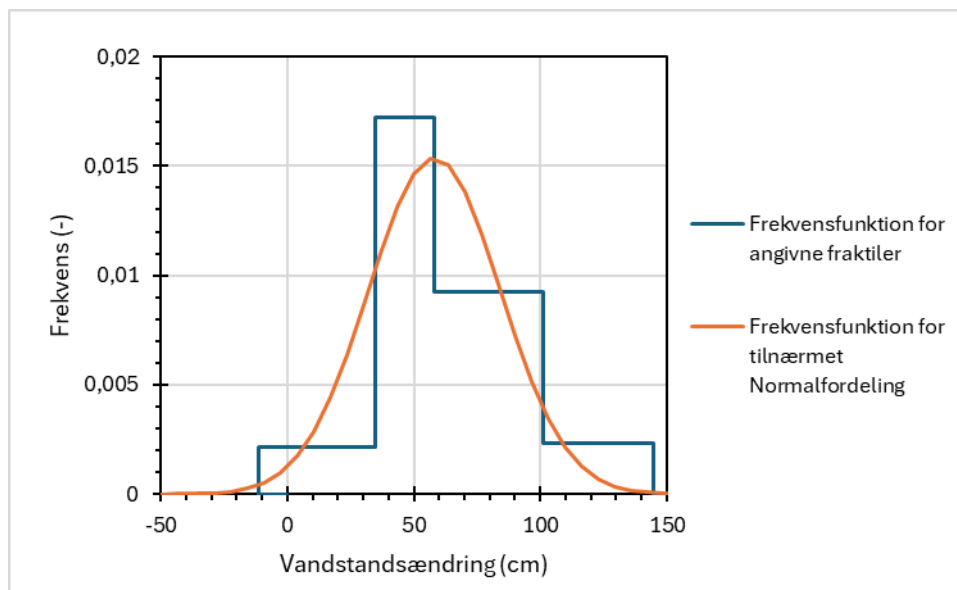
Tabel 3-4 Parametre for vandstandsstigningernes tilnærmede fordelinger for årene 2070 og 2100 samt baggrundsdata for 10%, 50% og 90% fraktiler fra (DMI, DMI_Klimaatlas_v2024a_Havspejlsstigning.xlsx (live.com), 2024).

Scenarie	År	Vandstandsændringer (m) fra (DMI, DMI_Klimaatlas_v2024a_Kommuner_Alle.xlsx (live.com), 2024)			Tilnærmet normalfordeling	
		10% fraktil	50% fraktil	90% fraktil	Middelværdi μ (m)	Spredning σ (m)
SSP1-2.6	2050	0,097	0,241	0,432	0,241	0,131
	2100	0,214	0,455	0,832	0,455	0,241
SSP2-4.5	2050	0,116	0,259	0,454	0,259	0,132
	2100	0,349	0,581	1,014	0,581	0,260
SSP3-7.0	2050	0,109	0,255	0,462	0,255	0,138
	2100	0,355	0,670	1,193	0,670	0,327

En illustration af overensstemmelse mellem de angivne fraktiler og den dertil knyttede tilnærmede normalfordeling er vist i nedenstående figurer for fordelingernes sumkurve og frekvenskurve. I det viste eksempel drejer det sig om vandstandsstigningen i år 2100 i scenarie SSP2-4.5. Sumkurven angiver på y-aksen sandsynligheden for et hændelsesudfald hvor udfaldet er mindre end værdien på x-aksen. Det påpeges at angivelse af tre fraktiler er en yderst begrænset beskrivelse af fordelingens form. Dette er af grundene til at tilnærmelsen med en normalfordeling vælges som en praktisk metode.



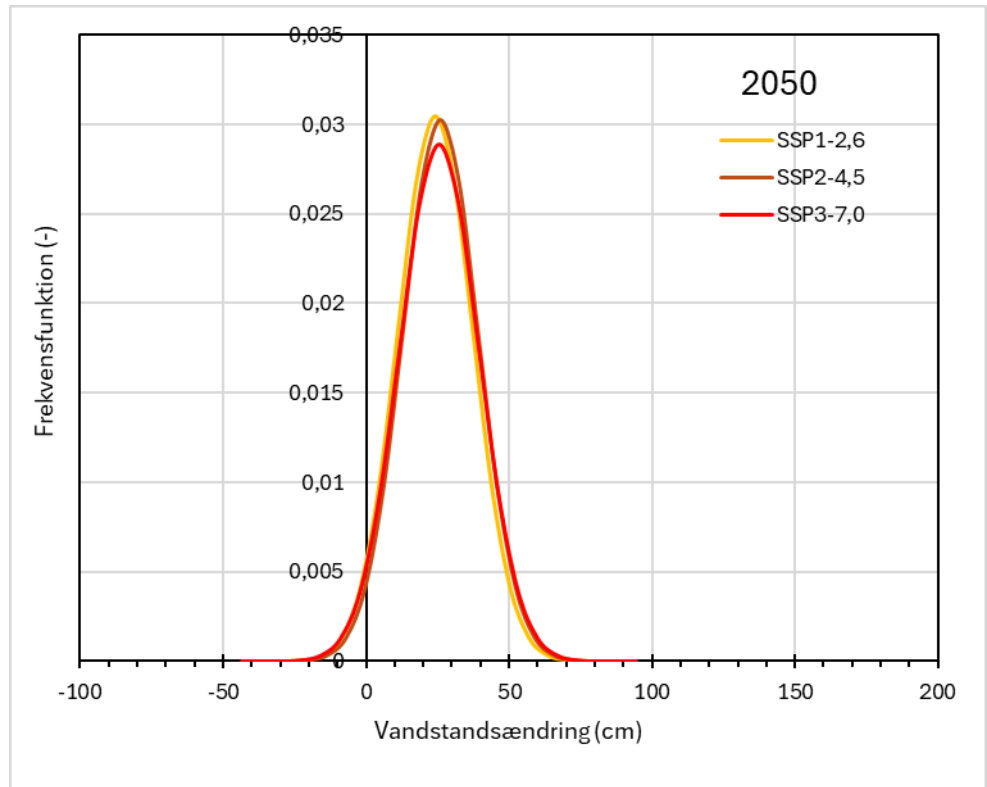
Figur 3-3 Sumkurve for vandstandsstigning for scenarie SSP2-4.5 i år 2100 angivet ved de tre fraktiler (3 punkter). En sumkurve for de tre fraktiler er konstrueret og den tilnærmede normalfordeling er tegnet ind.



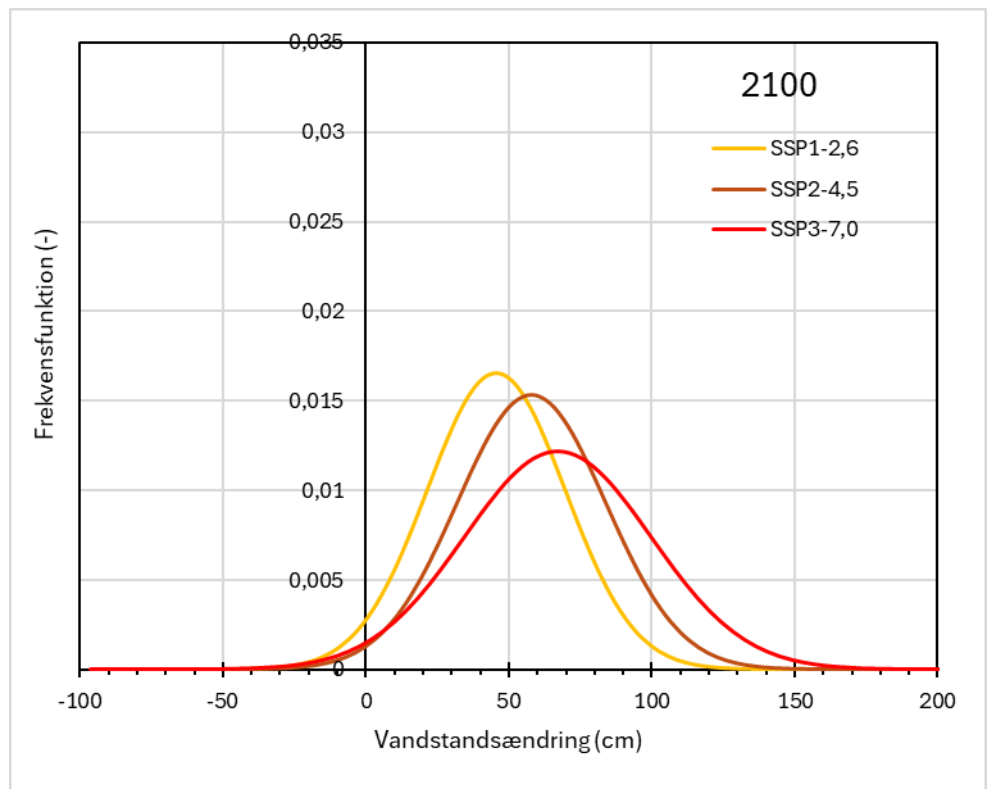
Figur 3-4 Frekvensfunktion for vandstandsstigning for scenarie SSP2-4.5 i år 2100 (i forhold til årtusindskiftet 2000). Den blå stepfunktion er frekvensfunktionen konstrueret over de angivne tre fraktiler mens den røde linje er frekvensfunktionen for den tilnærmede normalfordeling.

Det ses af ovenstående figurer, at de to fordelinger stort set stemmer fint overens. Den lille skævhed i de angivne fraktiler, dvs. hændelserne er ikke ligeligt fordelt omkring medianværdien (50% fraktilen) er udjævnet i normalfordelingen. Dette betyder, at de lave værdier får lidt mere vægt end de høje værdier i den tilnærmede normalfordeling, mens medianværdien er den samme.

En illustration af de tilnærmede normalfordelinger, der er baseret på ovenstående parametre, er givet for året 2050 og for året 2100 i nedenstående Figur 3-5 og Figur 3-6.



Figur 3-5 Frekvensfunktioner for vandstandsændringer i år 2050 for klimascenarier SSP1-2.6; SSP2-4.5 og SSP3-8.5 (tilnærmede normalfordelinger).



Figur 3-6 Frekvensfunktioner for vandstandsændringer i år 2100 for klimascenarier SSP1-2.6; SSP2-4.5 og SSP3-8.5 (tilnærmede normalfordelinger).

3.5 Vindhastighedsændring

I forudsætningsnotatet (COWI/DHI, 2024) er det vurderet at ændringerne i vindhastigheden i periode til år 2100 er så marginale og så usikkert bestemte at de udelades. Den nærværende analyse indeholder muligheden for at inddrage såvel en marginal ændring af vindhastigheden som den forventede fordeling i form af spredning af vindhastighedsændringen. Da spredningen på vindhastighedsændringen forventes at bidrage betydende til spredningen af de samlede klimaændringer, er vindændringen derfor medtaget her.

3.5.1 DMI's prognose

Vurdering af den fremtidige udvikling af vindforholdene er baseret på prognoserne i DMI's klimaatlas (DMI, DMI_Klimaatlas_v2024a_Kommuner_Alle.xlsx (live.com), 2024). Her er der valgt positionen Bornholm fordi den bedst beskriver den vind, der er mest relevant for beskrivelsen af de hydrografiske processer, der er vindgenererede (Vertikal opadrettet meddrivning og transport over tærsklerne (Gedser og Drogden)). For hver af de ovennævnte klimascenarier bestemmes et centralt estimat på ændringerne af vindhastigheden samt den dertil hørende spredning.

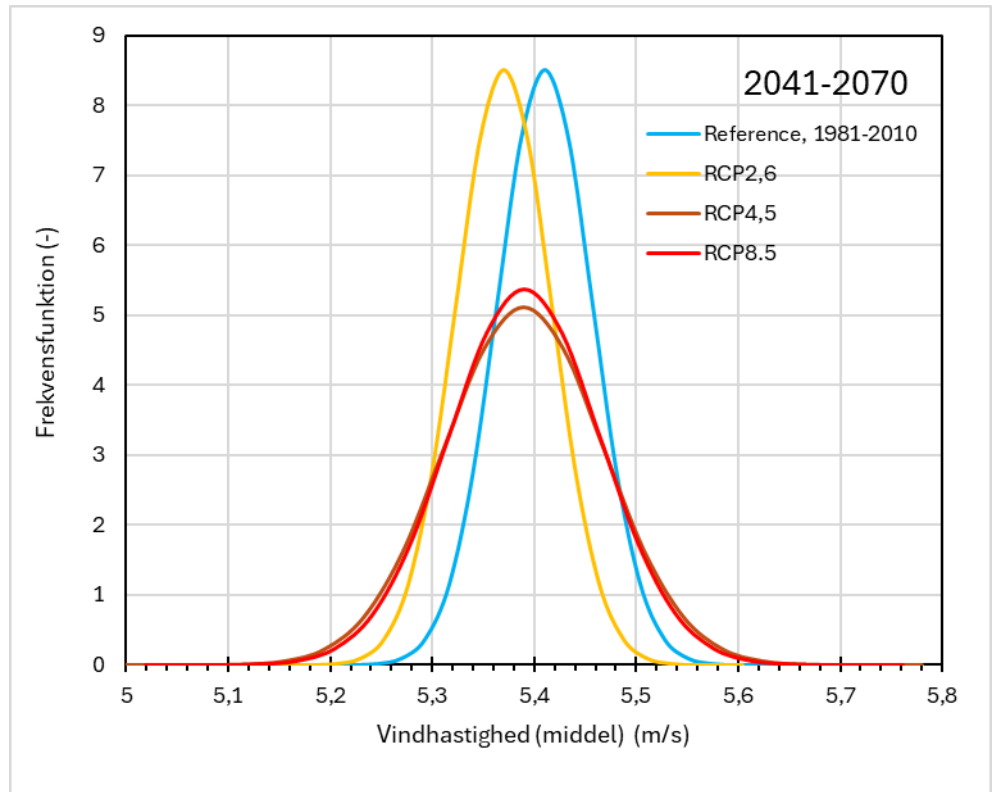
Statistikken foreligger for scenarierne RCP2.6, RCP4.5 og RCP8.5. Scenarierne RCP2.6 antages at svare til scenariet SSP1-2.6, scenariet RCP4.5 at svare til SSP2-4.5 mens scenariet RCP8.5 ikke direkte svarer til SSP3-7.0. Da der kun foreligger estimater for de tre RCP-scenarier, er det valgt at anvende RCP8,5 for vind sammen med scenariet SSP3-7.0 for afstrømning og vandstand.

Med hensyn til bestemmelse af middelværdi og spredning henvises til beskrivelsen i afsnit 3.4.

Tabel 3-5 Parametre for vindhastigheders tilnærmede normalfordelinger for årene 2070 og 2100 samt baggrundsdata for 10%, 50% og 90% fraktiler fra (DMI, DMI_Klimaatlas_v2024a_Kommuner_Alle.xlsx (live.com), 2024).

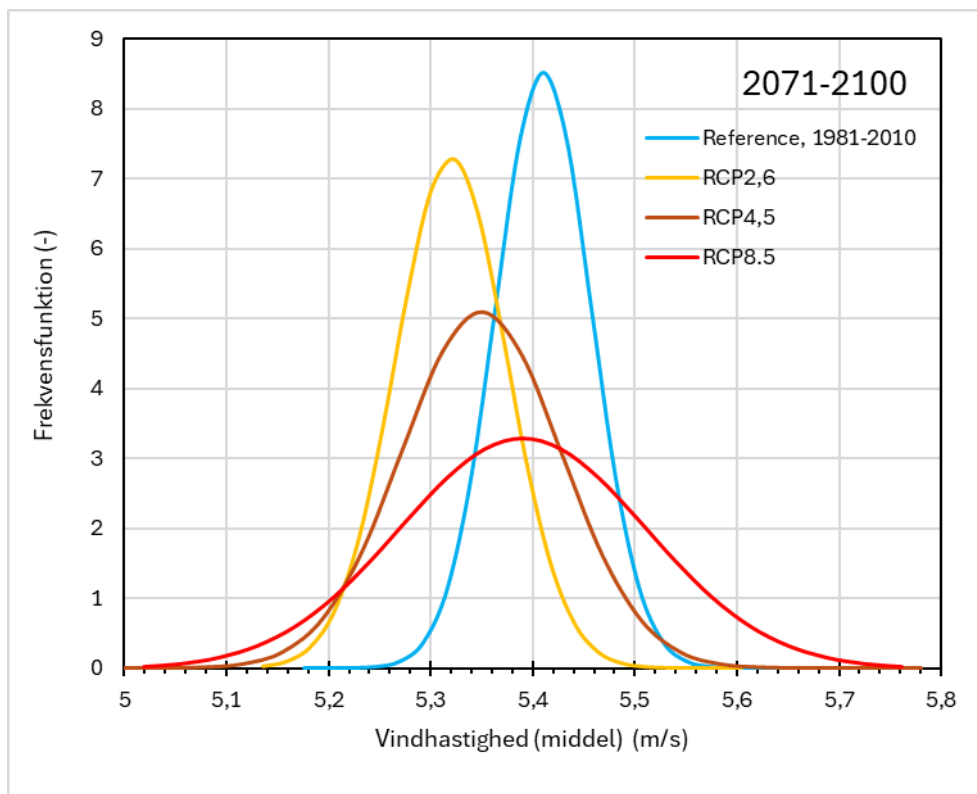
Scenarie	År	Vindhastigheder (m/s) fra (DMI, DMI_Klimaatlas_v2024a_Kommuner_Alle.xlsx (live.com), 2024)			Tilnærmet normalfordeling	
		10% fraktil	50% fraktil	90% fraktil	Middelværdi μ (m/s)	Spredning σ (m/s)
Reference	1981-2010	5,34	5,41	5,46	5,41	0,047
RCP2,6	2041-2070	5,31	5,37	5,43	5,37	0,047
	2071-2100	5,27	5,32	5,41	5,32	0,055
RCP4,5	2041-2070	5,29	5,39	5,49	5,39	0,078
	2071-2100	5,23	5,35	5,43	5,35	0,078
RCP8,5	2041-2070	5,30	5,39	5,49	5,39	0,074
	2071-2100	5,26	5,39	5,57	5,39	0,121

En illustration af ovenstående parametre er givet i Figur 3-7 for referencescenariet for året 2010 (bygger på data fra periode 1981-2010) og for tre klimascenarier for året 2070 (bygger på data for perioden 2041-2070).



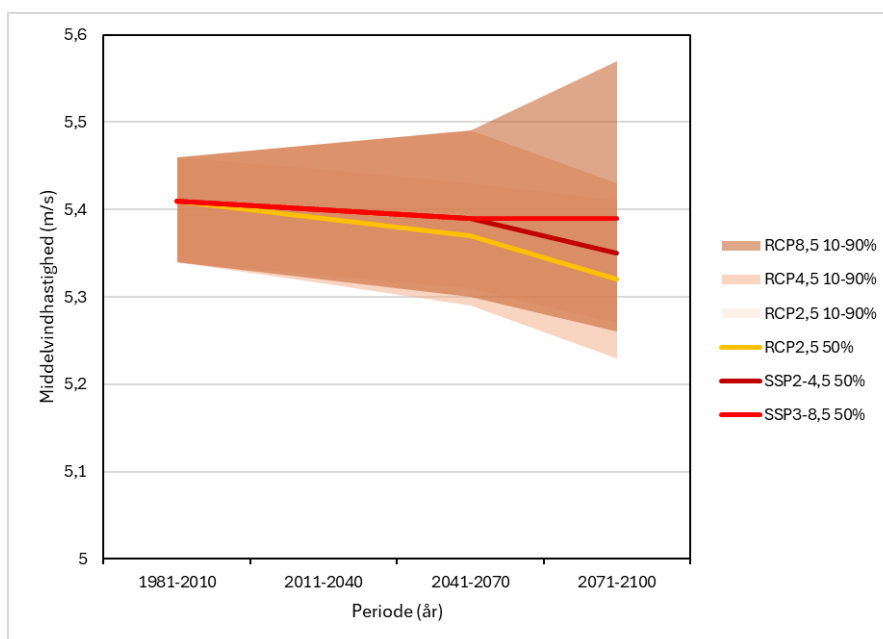
Figur 3-7 Frekvensfunktioner for vindhastighed i referenceperioden 1981-2010. Vindhastighedernes frekvensfunktion for klimascenarierne givet for perioden 2041-2070. Bemærk at denne figur beskriver de absolutte vindhastigheder og ikke ændringer (som typisk i de andre figurer).

Tilsvarende er en illustration givet i Figur 3-8 for referencescenariet for året 2010 (bygger på data fra periode 1981-2010) og for tre klimascenarier for året 2100 (bygger på data for perioden 2071-2100).



Figur 3-8 Frekvensfunktioner for vindhastighed i reference året 2010. Vindhastighedernes frekvensfunktion for klimascenarier SSP1-2.6; SSP2-4.5 og SSP3-8.5 er givet for år 2100.

Den tidlige udvikling af 50% fraktilerne (medianværdierne) af middelvindhastighederne for de tre klimascenarier er vist i nedenstående Figur 3-9.

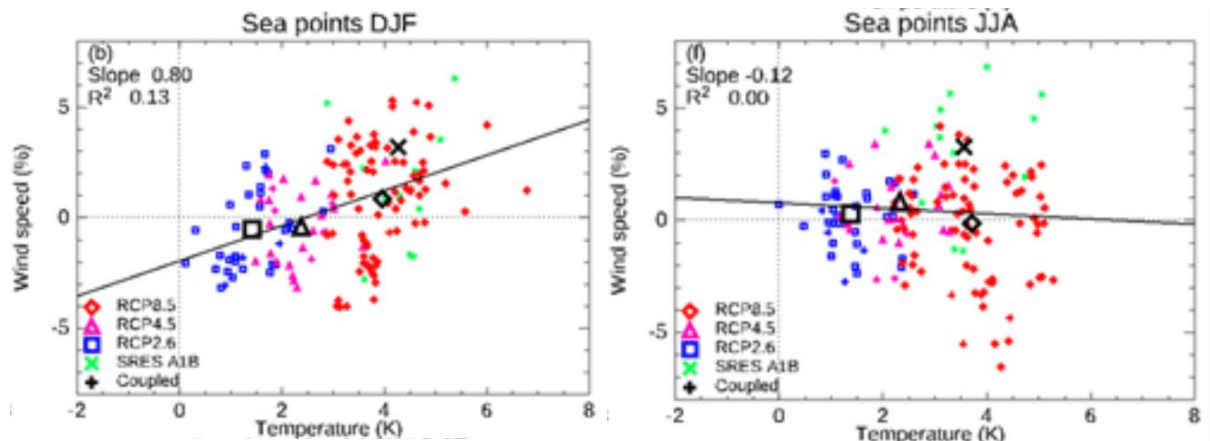


Figur 3-9 Tidlig udvikling af forventningsintervallet for middelvindhastighed omkring Bornholm for de undersøgte tre klimascenarier. Forventningsintervallet er

vist som udfaldene mellem 10% og 90% fraktilerne samt ved medianværdierne (50% fraktilerne).

3.5.2 Perspektivering af vindens spredningen

Spredningen af prognosernes vindhastigheder kan sammenlignes med spredningerne præsenteret i (Christensen, 2022). Her illustreres vindhastighedens afhængighed af lufttemperaturen over Østersøen.



Figur 3-10 Relativ ændring 1981-2010 til 2071-2100 af vind i 10 meters højde som funktion af temperaturændring fra individuelle modeller i tre scenarier. Venstre panel for vinter (dec., jan., feb.), højre panel for sommer (jun., jul., aug.). Middelværdier er indikeret ved større sorte symboler. Blå firkant: RCP2.6; Pink trekant: RCP4.5; Rød rombe: RCP8.5; Grøn kryds: BACC II simuleringer (Christensen, 2022).

For scenarie RCP4.5 (pink trekanten) findes middelværdierne for vinter og sommer ved at aflæse y-koordinaterne for de sorte trekanten. Med hensyn til spredningen anvendes det kendetegn ved en normalfordeling, at intervallet af 2 gange spredning omfatter 68,2% af udfaldene. Dette svarer til at 15,9% af udfaldene ligger over værdien for middelværdi plus spredning og tilsvarende at 15,9% af udfaldene ligger under værdien for middelværdi minus spredning. Ved visuel inspektion af ovenstående figur skønnes middelværdi og spredning, se Tabel 3-6.

Tabel 3-6 Vindændringer i år 2100 over Østersøen. Aflæste værdier for middelværdi af relative ændring af middelvind og den dertil hørende spredning baseret på Figur 3-10.

	Vinter	Sommer	Hele året
Middelværdi	-0,5%	+1%	0,25%
Spredning	±1,7%	±1,5%	±1,6%

Det bemærkes, at der ved betragtning af hele året adderes ændringer for sommer og vinter. Vinterværdierne burde evt. vægtes lidt mere, da vindhastighederne typisk er lidt højere om vinteren. Den aktuelle sammenligning er dog så overordnet, at det ikke skønnes at bibringe sammenligningen væsentlig substans at inddrage denne sæsonforskel. Sammenligning af

ovenstående ændringer for vindforholdene med resultaterne fra klimaatlas er vist i Tabel 3-7.

Tabel 3-7 Sammenligning af to publikationers prognosticerede vindændringer i år 2100 over Østersøen

RSP4.5, 2100	Middelværdi (m/s)	Spredning (m/s)
Klimaatlas prognose år 2100	5,35	0,078
Prognose år 2100 (Christensen, 2022)	5,40	0,087
Difference (Christensen-Klimaatlas) 2100	0,06	0,011

Det ses at de to publikationer mere eller mindre prognosticerer de samme ændringer, og bekræfter dermed hinanden. Det vælges at arbejde videre med prognoserne fra klimaatlas (DMI, DMI_Klimaatlas_v2024a_Kommuner_Alle.xlsx (live.com), 2024).

3.6 Påvirkninger fra infrastrukturprojekter

Vandføringsændringen gennem de indre danske farvande af de infrastrukturprojekter, der er medtaget i analysen, er modelleret af DHI (COWI/DHI, 2024). Her er deres respektive vandføringsændringer (tidligere kaldet "blokeringer") angivet. Den samlede vandføringsændring er modelleret til at være:

$$-0,18\% \pm 0,06\%.$$

Fortegnet betyder at vandføringen reduceres med 0,18%. Denne vandføringsændring er anvendt i alle scenarier.

3.7 Hydrauliske konsekvensberegning

3.7.1 Hydrauliske nøgleparametre

I dette afsnit beregnes konsekvenserne af de ovenfor bestemte klimaændringer på udvalgte hydrauliske nøgleparametre som er defineret i Forudsætningsnotat (COWI/DHI, 2024) og gengivet i Tabel 3-8.

Tabel 3-8 Udvalgte hydrauliske nøgleparametre

Parameter	Benævnelse
Saltholdighed, den centrale Østersø, øvre lag	S ₀₀
Saltholdighed, den centrale Østersø, nedre lag	S ₀₁
Lagdelingsstabilitet, den centrale Østersø	Stab
Skillefladedybde, den centrale Østersø	Y ₀₀
Vandføring af saltvand til Østersøen (tærskeloverskyl Gedser/Drogden)	Q _{SA1}
Opholdstid i Østersøen	T

Parametrene S_{00} , S_{01} , Y_{00} og Q_{SA1} beregnes direkte af den korrigerede og udvidede model af (Pedersen & Møller, 1981).

Lagdelingens stabilitet $Stab$ i den centrale Østersø (Gotland Bassinet) beregnes som differensen mellem den gennemsnitlige saltholdighed i øvre og nedre lag og angives derfor i (‰). Saltholdighedsforskellen anvendes dermed som en tilnærmet udtryk for lagdelingens stabilitet.

Opholdstiden T for Østersøen beregnes her på baggrund af Østersøens volumen, Vol , og en karakteristisk vandføring, Q . Opholdstiden og dens afhængighed af vandføringen bestemmes af:

$$T = \frac{Vol}{Q}$$

Ved et volumen af Østersøen på ca. 21.000 km³ (Marinefinland, 2024) og en opholdstid på 25-30 år i den centrale Østersø (HELCOM, Baltic Sea Environment Proceedings, nr. 54, First assesment of the state of the coastal waters of the Baltic Sea, 1993) svarer det til en middel udskiftningsvandføring på mellem 22.000 og 27.000 m³/s. Denne vandføring ligger mellem ferskvandstilførslen på 15.000 m³/s og udstrømningsvandføringen over tærsklerne Q_{SA0} på 29.200 m³/s (Pedersen & Møller, 1981). I den videre analyse vælges det at arbejde videre med en opholdstid på 30 år.

For små ændringer af vandføringen findes følgende ændring af opholdstiden

$$T_{ny} = T(1 - t), \text{og}$$

$$Q_{ny} = Q(1 + q), \text{mens}$$

$$Vol_{ny} = Vol \text{ (uændret)}$$

Lineariseringen af udtrykket bliver da

$$T(1 + t) = \frac{Vol}{Q(1 + q)} \approx \frac{Vol}{Q}(1 - q)$$

Idet Vol/Q erstattes med T og hele ligningen divideres med T findes:

$$1 + t = 1 - q$$

$$t = -q$$

Dette viser (i overensstemmelse med intuition) at en øgning af vandføringen med f.eks. 1 % betyder, at opholdstiden reduceres med 1 %. Denne relation er dermed bestemt uafhængig af valgte volumen eller vandføringer.

4 Resultater

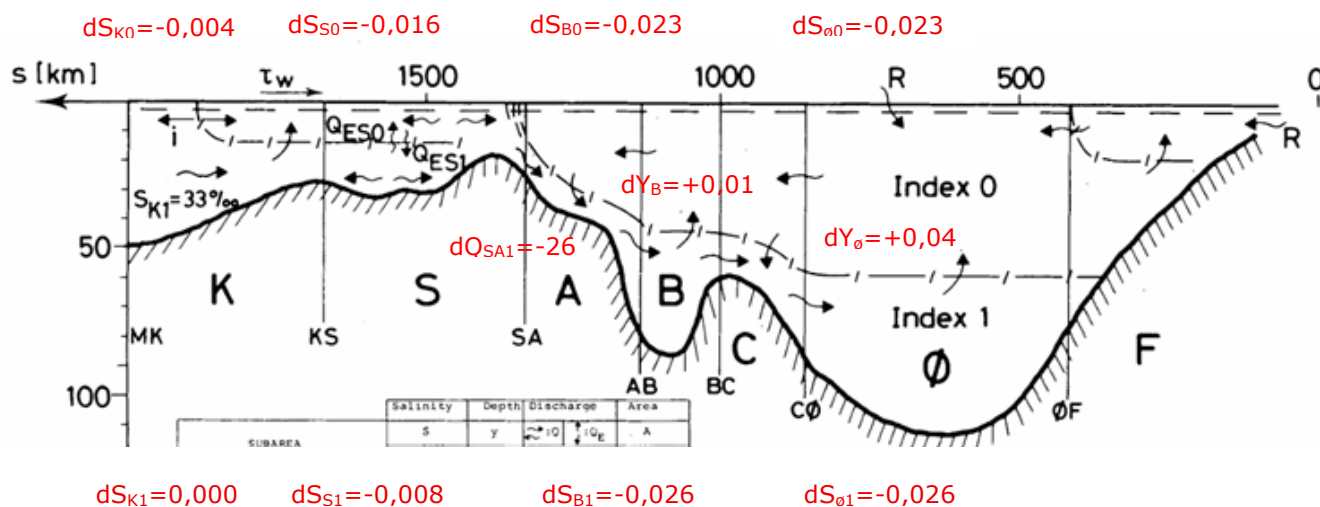
4.1 Projekternes påvirkning

Projekternes påvirkninger på hydrauliske nøgleparametre beregnet efter den tilrettede og udvidede model beskrives i det følgende som:

- Projekternes ændringer af hydrauliske parametre i den centrale Østersø (Gotland Bassinet)
- Illustration af projekternes ændring mellem nordlig Kattegat og den centrale Østersø
- Perspektivering med beregnede påvirkninger af klimæændringer

4.1.1 Projekternes ændringer af hydrauliske parametre i den centrale Østersø

Ændringerne af de undersøgte 5 infrastrukturprojekter er overordnet illustreret i nedenstående figur.



Figur 4-1 Ændringer af saltholdigheder og skillefladebeliggenheder som følge af de undersøgte 5 infrastrukturprojekter. Effekterne beregnet med den konceptuelle model. Saltholdighedsændringer (dS) er angivet i ‰, ændringer i skillefladebeliggenhed (dY) i m, ændringer i vandføring (dQ) i m^3/s . Saltholdighedsændringer for øvre lag er angivet over figuren, for nedre lag under figuren.

Tabel 4-1 Anvendte middelværdier for hydrografiske nøgleparametre

S_0 (‰)	S_1 (‰)	Stab (‰)	Q_{SA1} (m^3/s)	$Y_{\phi 0}$ (m)	T (år)
7	11	4	14.200	60	30

Effekten af infrastrukturprojekterne på hydrauliske nøgleparametre er den samme i alle scenarier. Middelværdierne for de hydrauliske nøgleparametre i referencesituationen er angivet sammen med de beregnede ændringer samt af ændringernes spredninger, se Tabel 4-2.

*Tabel 4-2 Udvalgte nøgleparametre i den centrale Østersø:
- Reference værdier
- Ændringer på grund af infrastrukturprojekterne
- Spredning af ændringer*

Parameter	Referenceværdi	Ændring	Spredning
Saltholdighed, øvre lag, S_0 (‰)	7	-0,023	$\pm 0,008$
Saltholdighed, nedre lag, S_1 (‰)	11	-0,026	$\pm 0,009$
Lagdelingsstabilitet, Stab (‰)	4	-0,003	$\pm 0,012$
Skillefladedybde, Y_{00} (m)	60	0,04	$\pm 0,01$
Vandføring fra Bælthav [*] , Q_{SA1} (m ³ /s)	14.200	-26	± 10
Opholdstid i Østersøen, T (år)	30	0,06	$\pm 0,02$

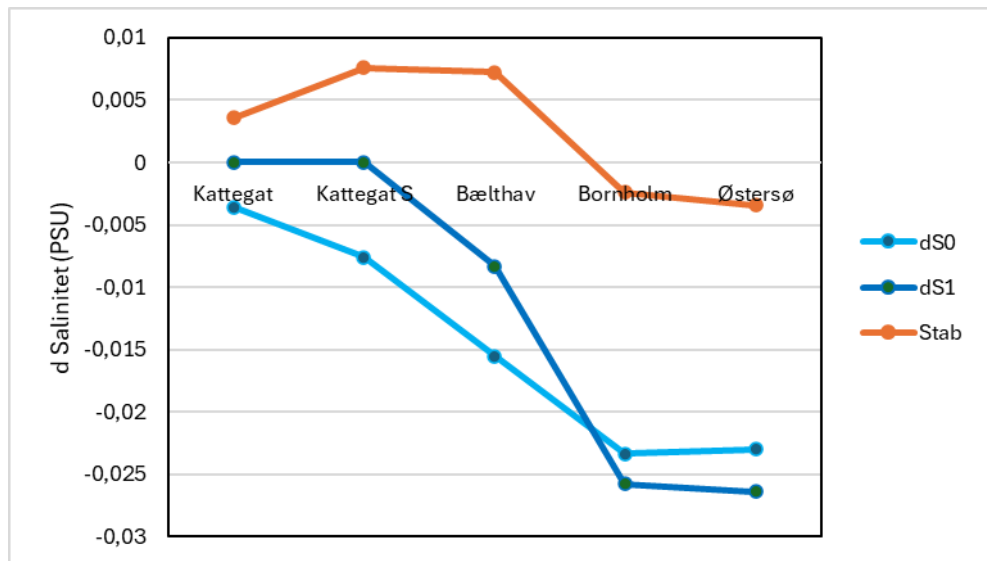
*:Gælder for tærskelområdet Gedser / Drogden.

Ovenstående tabel viser at langtidseffekten af infrastrukturprojekterne på overfladesaltholdigheden i den centrale Østersø i Gotlands bassinet vil være en ændring på $(-0,02 \pm 0,01)$ ‰ fra et niveau på 7‰. Lagdelingens stabilitet i Østersøen påvirkes i mindre grad idet saltholdighedsforskellen over skillefladen forventes at aftage med $0,003 \pm 0,01$ ‰, som skal ses i sammenhæng på udgangsværdien på 4‰. Skillefladedybden tiltager med $(0,04 \pm 0,01)$ m set i sammenhæng med referencedybden på 60m. Vandføringen af saltvand til Østersøen over tærskelområdet Gedser/Drogden aftager med (26 ± 10) m³/s ud af en referencevandføring på 14.200 m³/s. Det betyder at opholdstiden i Østersøen ændres tilsvarende. For områder i Østersøen med en relativ lang opholdstid på 30 år betyder det, at den forlænges med $(0,06 \pm 0,02)$ år, svarende til 3 uger ± 1 uge.

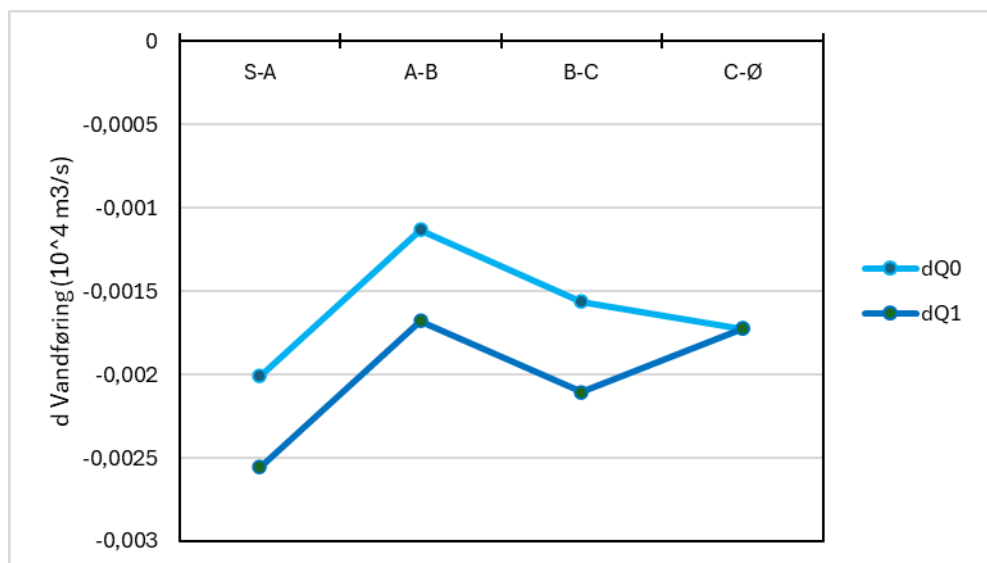
Om disse ændringer er betydende med hensyn til miljøkvaliteten i Østersøen, kan ikke alene afgøres på baggrund af de her undersøgte påvirkninger af de hydrografiske nøgleparametre. Nøgleparametrene leverer dog de fysiske rammer for en efterfølgende modellering af økosystemet og udvalgte vandkvalitetsparametre.

4.1.2 Illustration af projekternes ændring mellem nordlig Kattegat og den centrale Østersø

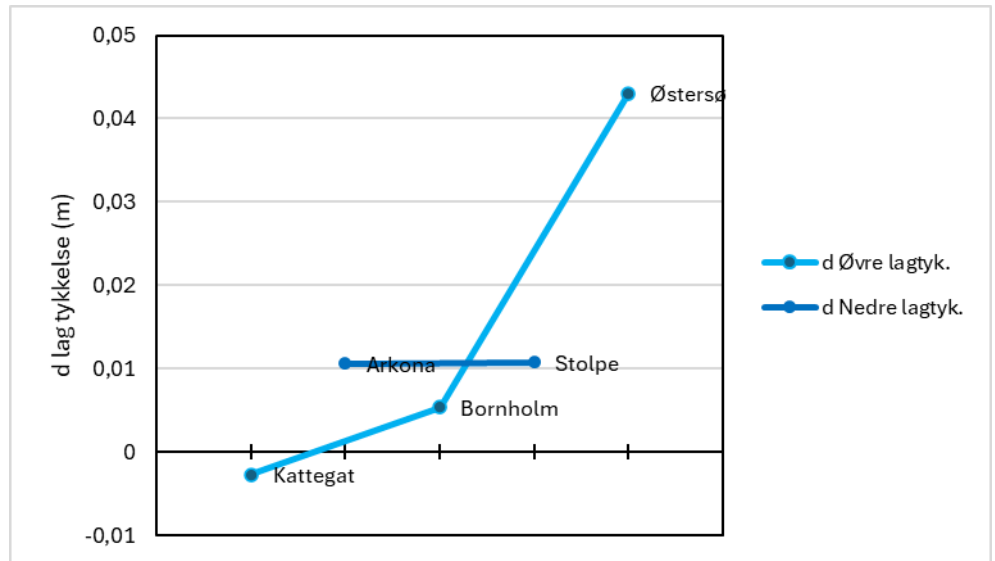
På en langsgående transekt fra Skagerrak til den centrale Østersø er variationerne af de fem udvalgte hydrodynamiske nøgleparametre på grund af de fem undersøgte infrastrukturprojekter illustreret i det følgende. De fem projekter giver samlet en relativ ændring af gennemstrømningen på -0,0018, dvs. hvis gennemstrømningen før anlæg af projekterne ville være 1, vil den være 0,9982 efter anlæg af projekterne.



Figur 4-2 Langsgående transekt mellem nordlig Kattegat og den centrale Østersø af infrastrukturprojekternes ændringer af saltholdighed i øvre lag, nedre lag og forskellen mellem lagene, som tages som udtryk for lagdelingens stabilitetsændring. Bemærk at skalaen på y-aksen kun spænder fra -0,03 PSU (=‰) til +0,01 PSU.



Figur 4-3 Langsgående transekt mellem nordlig Kattegat og den centrale Østersø af infrastrukturprojekternes ændringer af vandføringerne i øvre lag og nedre lag.



Figur 4-4 Langsgående transekt mellem nordlig Kattegat og den centrale Østersø af infrastrukturprojekternes ændringer af lagtykkelserne i øvre lag og nedre lag. For Kattegat/Bælthavet, Bornholmer Bassinet og Gotland Bassinet er øvre lags tykkelse angivet, mens det nedre lags tykkelse er angivet for bundstrømmene gennem Arkona Bassinet (som hydraulisk set er en rende med en tung bundstrøm) og Stolpe Renden.

4.2 Påvirkninger fra klimaændringer

For at facilitere perspektivering er ændringerne i de hydrografiske nøgleparametre beregnet for tre forskellige klimascenarier og for to forskellige fremskrivninger angivet i Tabel 4-3. Betegnelserne refererer til figur 3-1. Kolonnerne for de enkelte klimabidrag er medtaget for at illustrere deres relative bidrag på den samlede virkning.

Tabel 4-3 Ændringer ved scenarie **SSP1-2.6** for fremskrivning til år **2050**. Tentative ændring i år 2050 af saltholdighed i den centrale Østersøs øvre lag S_0 , dets nedre lag S_1 , stabiliteten over springlaget $Stab$, Øvre lags tykkelse Y_{00} og Østersøens opholdstid T . Ændringer er angivet for ændret ferskvandstilstrømning, ændret vandstandsstigning og for ændret vindhastighed samt for summen af disse klimaændringerne. Derudover er ændringerne af klimaændringer plus infrastrukturprojekter angivet. Projekternes betydning i det fremtidige klima er forskellen mellem kolonnerne for "Sum klima" og "Klima+Projekter"

2050	Ferskvand $r=+0,073$		Vandstand $VST=+0,221m$		Vind $w=-0,0074$		Sum klima		Klima + Projekter	
	middel	spred.	middel	spred.	middel	spred.	middel	spred.	Middel	spred.
dS_0 (‰)	-0,29	0,29	0,11	0,08	-0,05	0,08	-0,23	0,31	-0,24	0,31
dS_1 (‰)	-0,46	0,37	0,27	0,16	-0,11	0,14	-0,30	0,42	-0,32	0,42
$dStab$ (‰)	0,00	0,47	-0,07	0,18	0,02	0,15	-0,04	0,52	-0,04	0,52
dQ_{SA1} (m ³ /s)	-1050	750	430	230	-100	120	-720	790	-750	790
dY_{00} (m)	1,5	1,1	-1,4	0,8	-0,3	0,4	-0,2	1,4	-0,2	1,4
dT (år)	2,2	1,6	-0,9	-0,5	0,2	0,2	1,5	1,7	1,6	1,7

Tabel 4-4

Scenarie **SSP1-2.6** for år **2100**

Tentative ændring i år 2100 af saltholdighed i den centrale Østersøs øvre lag S_0 , dets nedre lag S_1 , stabiliteten over springlaget Stab, Øvre lags tykkelse Y_{00} og Østersøens opholdstid T . Ændringer er angivet for ændret ferskvandstilstrømning, ændret vandstandsstigning og for ændret vindhastighed samt for summen af disse klimaændringerne. Derudover er ændringerne af klimaændringer plus infrastrukturprojekter angivet. Projekternes betydning i det fremtidige klima er forskellen mellem kolonnerne for "Sum klima" og "Klima+Projekter"

2100	Ferskvand $r=+0,099$		Vandstand $VST=+0,439\text{m}$		Vind $w=-0,0166$		Sum klima		Klima + Projekter	
	middel	spred.	middel	spred.	middel	spred.	Middel	spred.	Middel	spred.
S_{00} (‰)	-0,40	0,32	0,22	0,15	-0,11	0,09	-0,29	0,36	-0,31	0,36
S_{01} (‰)	-0,63	0,41	0,51	0,30	-0,24	0,16	-0,36	0,53	-0,37	0,53
Stab (‰)	0,00	0,52	-0,13	0,33	0,05	0,18	-0,08	0,64	-0,07	0,64
Q_{SA1} (m ³ /s)	-1400	830	810	430	-240	100	-860	940	-890	940
Y_{00} (m)	2,1	1,2	-2,6	1,4	-0,7	0,4	-1,2	1,9	-1,2	1,9
dT (år)	3	1,7	-1,7	0,9	0,5	0,1	1,8	2	1,9	2

Tabel 4-5

Scenarie **SSP2-4.5** for **2050**

Tentative ændring i år 2050 af saltholdighed i den centrale Østersøs øvre lag S_0 , dets nedre lag S_1 , stabiliteten over springlaget Stab, Øvre lags tykkelse Y_{00} og Østersøens opholdstid T . Ændringer er angivet for ændret ferskvandstilstrømning, ændret vandstandsstigning og for ændret vindhastighed samt for summen af disse klimaændringerne. Derudover er ændringerne af klimaændringer plus infrastrukturprojekter angivet. Projekternes betydning i det fremtidige klima er forskellen mellem kolonnerne for "Sum klima" og "Klima+Projekter"

2050	Ferskvand $r=+0,094$		Vandstand $VST=+0,239\text{m}$		Vind $w=-0,0037$		Sum klima		Klima + Projekter	
	middel	spred.	middel	spred.	middel	spred.	middel	spred.	Middel	spred.
S_{00} (‰)	-0,38	0,32	0,13	0,08	-0,03	0,13	-0,28	0,35	-0,29	0,35
S_{01} (‰)	-0,60	0,41	0,29	0,16	-0,05	0,24	-0,36	0,49	-0,37	0,49
Stab (‰)	0,00	0,52	-0,07	0,18	0,01	0,26	-0,06	0,61	-0,06	0,61
Q_{SA1} (m ³ /s)	-1350	830	460	230	-50	610	-940	1050	-970	1050
Y_{00} (m)	2	1,2	-1,5	0,8	-0,2	0,8	0,3	1,6	-0,3	1,6
dT (år)	2,9	1,7	-1	0,5	0,1	0,6	2	1,9	2	1,9

Tabel 4-6 Scenarie **SSP2-4.5** for **2100**

Tentative ændring i år 2100 af saltholdighed i den centrale Østersøs øvre lag S_0 , dets nedre lag S_1 , stabiliteten over springlaget Stab, Øvre lags tykkelse Y_{00} og Østersøens opholdstid T . Ændringer er angivet for ændret ferskvandstilstrømning, ændret vandstandsstigning og for ændret vindhastighed samt for summen af disse klimaændringerne. Derudover er ændringerne af klimaændringer plus infrastrukturprojekter angivet. Projekternes betydning i det fremtidige klima er forskellen mellem kolonnerne for "Sum klima" og "Klima+Projekter"

2100	Ferskvand $r=+0,180$		Vandstand $v=+0,568$		Vind $w=-0,011$		Sum klima		Klima + Projekter	
	middel	spred.	Middel	spred.	Middel	spred.	middel	spred.	Middel	spred.
S_0 (‰)	-0,76	0,40	0,27	0,17	-0,08	0,13	-0,56	0,45	-0,57	0,45
S_1 (‰)	-1,18	0,51	0,66	0,32	-0,16	0,24	-0,69	0,65	-0,72	0,65
Stab (‰)	0,00	0,66	-0,17	0,35	0,03	0,26	-0,13	0,79	-0,13	0,79
Q_{SA1} (m ³ /s)	-2700	1050	1040	470	-160	200	-1820	1200	-1850	1200
Y_{00} (m)	3,9	1,5	-3,3	1,5	-0,5	0,7	0,1	2,2	-0,1	2,2
dT (år)	5,7	2,2	-2,2	1	0,3	0,2	3,8	2,4	3,9	2,4

Tabel 4-7 Scenarie **SSP3-7.0** for **2050**

Tentativ ændring i år 2050 af saltholdighed i den centrale Østersøs øvre lag S_0 , dets nedre lag S_1 , stabiliteten over springlaget Stab, Øvre lags tykkelse Y_{00} og Østersøens opholdstid T . Ændringer er angivet for ændret ferskvandstilstrømning, ændret vandstandsstigning og for ændret vindhastighed samt for summen af disse klimaændringerne. Derudover er ændringerne af klimaændringer plus infrastrukturprojekter angivet. Projekternes betydning i det fremtidige klima er forskellen mellem kolonnerne for "Sum klima" og "Klima+Projekter"

2050	Ferskvand $r=+0,085$		Vandstand $v=+0,235m$		Vind $w=-0,0037$		Sum klima		Klima + Projekter	
	middel	spred.	middel	spred.	middel	spred.	Middel	spred.	Middel	spred.
S_0 (‰)	-0,35	0,47	0,12	0,09	-0,03	0,13	-0,25	0,50	-0,26	0,50
S_1 (‰)	-0,54	0,60	0,29	0,17	-0,05	0,22	-0,31	0,67	-0,33	0,67
Stab (‰)	0,00	0,78	-0,07	0,19	0,01	0,25	-0,06	0,84	-0,06	0,84
Q_{SA1} (m ³ /s)	-1230	1250	5	3	-50	580	-1280	1370	-1300	1370
Y_{00} (m)	1,8	1,8	-1,5	0,8	-0,2	0,7	0,1	2,1	0,1	2,1
dT (år)	2,6	2,6	0	0,01	0,1	0,6	2,7	2,7	2,8	2,7

Tabel 4-8

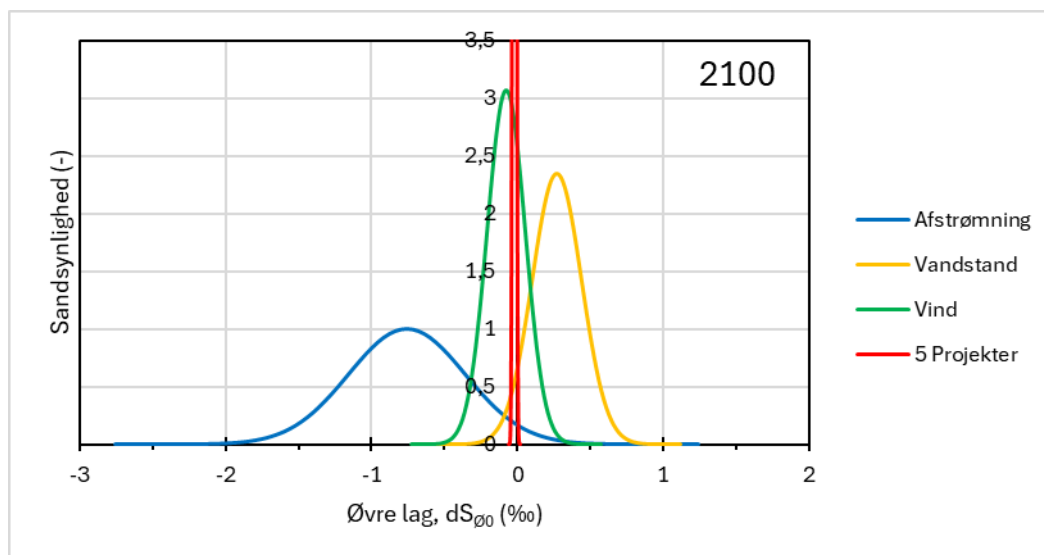
Scenarie **SSP3-7.0** for **2100**

Tentative ændring i år 2100 af saltholdighed i den centrale Østersøs øvre lag S_0 , dets nedre lag S_1 , stabiliteten over springlaget Stab, Øvre lags tykkelse Y_{00} og Østersøens opholdstid T . Ændringer er angivet for ændret ferskvandstilstrømning, ændret vandstandsstigning og for ændret vindhastighed samt for summen af disse klimaændringerne. Derudover er ændringerne af klimaændringer plus infrastrukturprojekter angivet. Projekternes betydning i det fremtidige klima er forskellen mellem kolonnerne for "Sum klima" og "Klima+Projekter"

2100	Ferskvand $r=+0,295$		Vandstand $v=+0,659\text{m}$		Vind $w=-0,0037$		Sum klima		Klima + Projekter	
	middel	spred.	middel	spred.	middel	spred.	Middel	spred.	Middel	spred.
S_0 (‰)	-1,20	0,68	0,32	0,21	-0,03	0,20	-0,90	0,74	-0,92	0,74
S_1 (‰)	-1,87	0,87	0,76	0,41	-0,05	0,36	-1,17	1,03	-1,19	1,03
Stab (‰)	0,00	1,12	-0,19	0,45	0,01	0,40	-0,18	1,27	-0,18	1,27
Q_{SA1} (m ³ /s)	-4300	1800	1190	580	-50	950	-3120	2100	-3150	2100
Y_{00} (m)	6,2	2,6	-3,8	1,9	-0,2	1,2	2,2	3,4	2,2	3,4
dT (år)	9	3,8	-2,5	1,2	0,1	1	6,6	4,1	6,7	4,1

4.2.1 Saltholdighed, centrale Østersø, øvre lag

Betydning af de forskellige processer på saltholdigheden i den centrale Østersøs overfladesaltholdighed S_{00} er illustreret i Figur 4-5 og viser de særskilte effekter ferskvandsafstrømningen (blå), vandstandsstigningen (gul), vinden (grøn) og af de fem projekter (rød) for året 2100.



Figur 4-5

Scenarie 4.5

Frekvensfunktionen for år 2100 af ændringer i øvre lags saltholdighed som funktion af de tre klimaændringer ferskvandsafstrømning, vandstandsstigning og vindhastighed. Derudover er frekvensfunktionen af saltholdigheden vist som funktion af de fem infrastrukturprojekter.

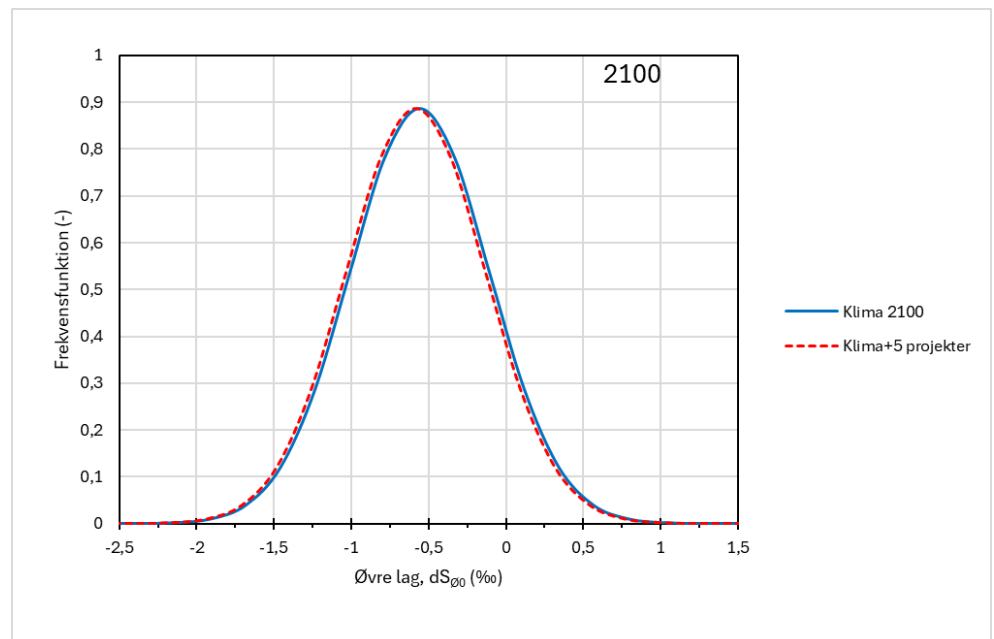
Det ses at effekten af ferskvandsafstrømningen (blå) ligger tydeligt til venstre for y-aksen. Det betyder at denne effekt trækker saltholdigheden relativt stærkt mod ferskere forhold. Det ses at den mest sandsynlige sænkning af saltholdigheden er omkring 0,7‰, mens spredningen for saltholdighedssænkninger er ca. 0,4‰.

Vandstandsstigningen (gul) ligger derimod på den anden side af y-aksen og vil dermed give anledning til en øgning af saltholdigheden, omend ikke i samme grad som ferskvandspåvirkningen vil reducere den. Her er den mest sandsynlige stigning omkring 0,3‰ med et forventningsinterval på ca. 0,3‰ omkring sig.

Effekten af vinden (grøn) ligger tæt på venstre side af y-aksen og vil betyde at den mest sandsynlige saltholdighedsændring vil være -0,1‰, og dermed en marginal sænkning fordi vinden antages at ville aftage lidt. Forventningsintervallet er ca. 0,3‰ og kan dermed give såvel marginale øgninger som sænkninger af saltholdigheden.

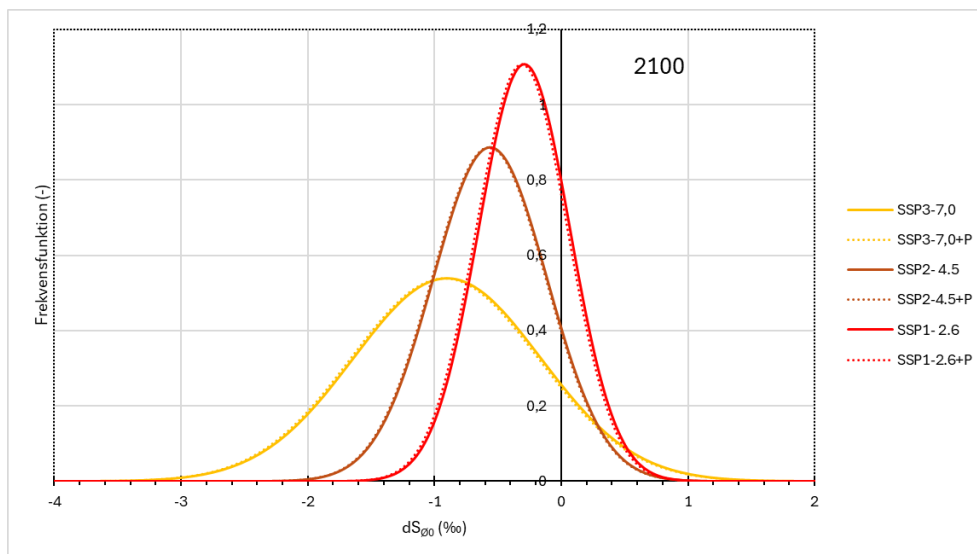
Effekten af infrastrukturprojekterne (rød) ligger endnu tættere på x-aksen og ligeledes på venstre side, dvs. mod ferskere forhold. Det mest sandsynlige udfald vil være en sænkning på ca. 0,02‰ og med en spredning på $\pm 0,02$ ‰.

Lægges de klimabetingede ændringer sammen og beregnes deres fælles spredning, kan den klimabetingede effekt sammenlignes med effekten af klima+projekter, se Figur 4-6 for scenarie 4.5 i år 2100.



Figur 4-6 *Scenarie 4.5*
Frekvensfunktionen for år 2100 af øvre lags saltholdighed som funktion af de samlede klimaændringer samt som funktion af samlede klimaændringer plus de fem infrastrukturprojekter.

I nedenstående grafiske afbildninger er udfaldsrummet af de tre klimascenarier vist for summen af ændringerne af øvre lags saltholdighed i den centrale Østersø for året 2100, med og uden projekter.

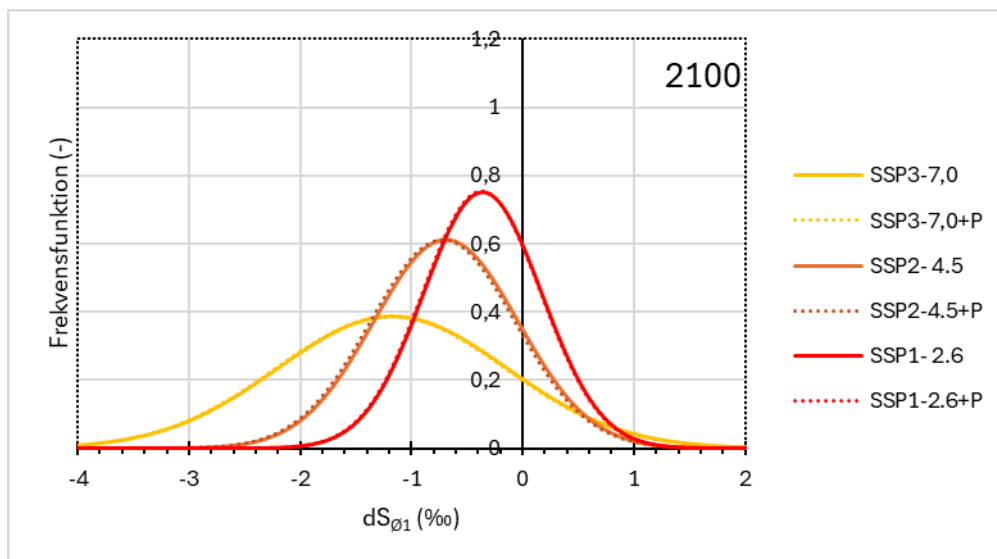


Figur 4-7 Frekvensfunktion af saltholdighedsændring i øvre lag i den centrale Østersø dS_{00} for de tre undersøgte klimascenarier.
Fuldt optrukken linje: Ændringer uden projekter
Stiplet linje: Ændringer med projekter

Det ses af ovenstående at effekterne af projekterne på de forventede forhold i år 2100 er meget marginale i forhold til det udfaldsrum der kan forventes på grund af klimaeffekterne.

4.2.2 Saltholdighed, centrale Østersø, nedre lag

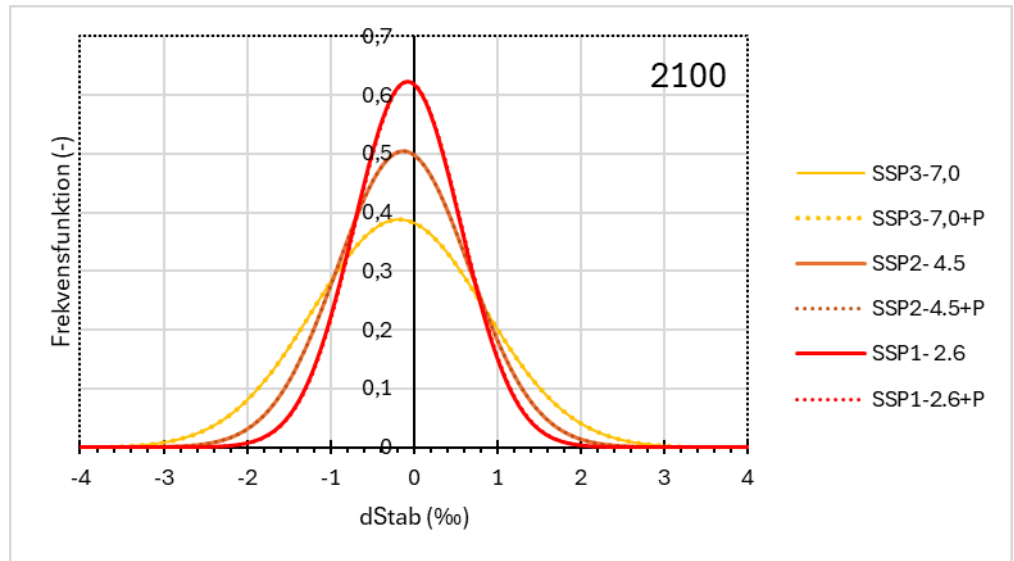
Tilsvarende præsenteres udvalgte grafer for saltholdigheden i det nedre lag.



Figur 4-8 Frekvensfunktion af saltholdighedsændring i nedre lag i den centrale Østersø dS_{01} for de tre klimascenarier.

4.2.3 Stabilitet af lagdeling, centrale Østersø

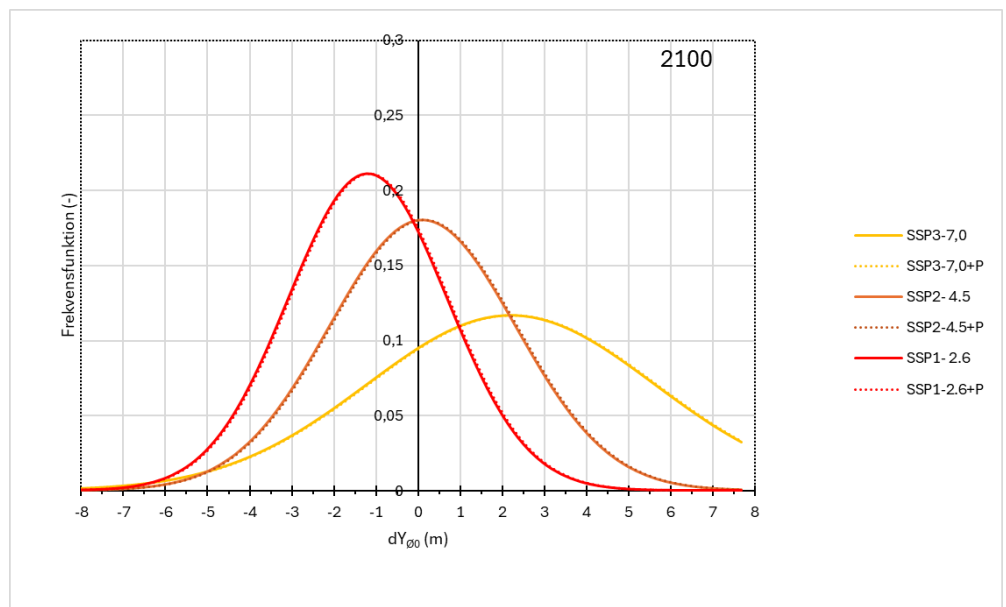
Tilsvarende præsenteres grafer for stabiliteten.



Figur 4-9 Frekvensfunktion af ændringen af stabiliteten (saltholdighedsforskel over skillefladen) i den centrale Østersø for de tre klimascenarier.

4.2.4 Skillefladedybde, centrale Østersø

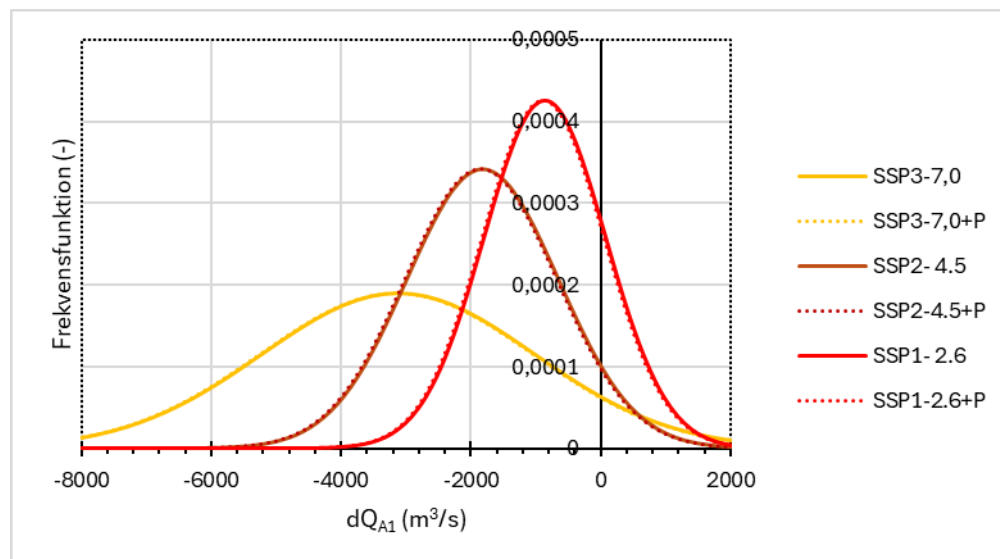
Tilsvarende præsenteres grafer for skillefladedybden.



Figur 4-10 Frekvensfunktion af ændringen af øvre lags tykkelse i den centrale Østersø for de tre klimascenarier.

4.2.5 Vandføring ind til Østersøen over tærsklerne (Gedser, Drogden)

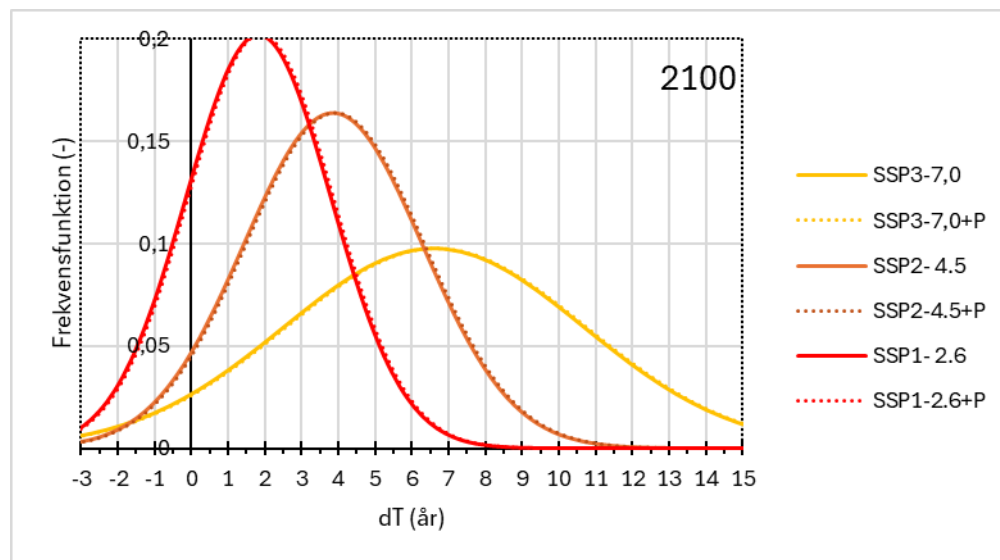
Tilsvarende præsenteres fordelingen af vandføringen ind over tærsklerne.



Figur 4-11 Frekvensfunktion af ændringen af vandføringen til den centrale Østersø for de tre klimascenarier.

4.2.6 Opholdstiden, Østersøen

Tilsvarende præsenteres grafer for ændringerne af opholdstid.



Figur 4-12 Frekvensfunktion af ændringen af opholdstiden i den centrale Østersø for de tre klimascenarier.

5 Diskussion

5.1 Effekter på hydrografien

Hydrografien påvirkes blandt andet af klimaændringer og infrastrukturprojekter i hele Østersøen om end af forskellig art og i forskelligt omfang på de forskellige lokaliteter og i forskellige vanddybder. Påvirkningerne i øvre lag er således anderledes end på samme sted i nedre lag, og påvirkningerne varierer på langs i Østersøen, dvs. på en linje fra Skagerrak til Gotland Bassinet. For detaljerede beskrivelser af de kvalitative variationer henvises til afsnit 4. For overskuelighedens skyld fokuseres i dette diskussionsafsnit på forholdene i den centrale Østersø, som er Gotland bassinet, og som er repræsenteret ved Helcom's overvågningsstation BY15.

Hovedkonklusioner angående påvirkningerne af de udvalgte hydrografiske nøgleparametre for den centrale Østersø er beskrevet nedenfor.

Den udvidede konceptuelle model giver estimater på saltholdighederne og dermed også på stabiliteten i den centrale Østersø for klimascenarie SSP2-4.5. Vandføringer, lagtykkelser, opholdstid samt effekterne af de fem undersøgte infrastrukturprojekter antages ikke at ændres væsentligt ved anvendelse af modeludvidelsen. For at give et indtryk af de forventelige forhold i de klimascenarier, der ikke direkte er beregnede, er ændringerne bestemt ved skalering af resultaterne fra den ikke-udvidede model ift. ændringerne for SSP2-4.5. Overordnet giver den udvidede model lidt mindre ændringer i saltholdighederne samtidigt med at standardafvigelseerne ligeledes reduceres. Beregnede og skalerede resultater fra den udvidede model er vist i Tabel 5-1.

Tabel 5-1 Modelresultater for hydrauliske nøgleparametre i den centrale Østersø ved de tre klimascenarier (udvidet model) for året 2100 og de valgte fem infrastrukturprojekter (værdier rundet iht. standardafvigelse).

Udvidet model	Refer ence	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	Ændringer pga. projekter
S_0 (‰)	7	$6,7 \pm 0,4$	$6,4 \pm 0,4$	$6,1 \pm 0,7$	$-0,023 \pm 0,008$
S_1 (‰)	11	$10,6 \pm 0,5$	$10,3 \pm 0,7$	$9,8 \pm 1,0$	$-0,026 \pm 0,009$
Stab (‰)	4	$3,9 \pm 0,6$	$3,9 \pm 0,8$	$3,8 \pm 1,3$	$-0,003 \pm 0,01$
Q_{SA1} ($10^3 m^3/s$)	14,2	$13,3 \pm 0,8$	$12,4 \pm 1,2$	$11,1 \pm 2,1$	$-0,030 \pm 0,010$
Y_{00} (m)	60	59 ± 1	60 ± 2	62 ± 3	$0,04 \pm 0,01$
T (år)	30	32 ± 2	31 ± 2	37 ± 4	$0,06 \pm 0,02$

Det ses af ovenstående at

- saltholdighederne i den centrale Østersø falder på grund af klimaændringer i forhold til referencesituationen.
- projekternes virkning på saltholdighederne går i samme retning som effekten af klimapåvirkningerne, om end i betydeligt mindre omfang.

- projekternes virkning på saltholdighederne er mindre end klimapåvirkningernes standardafvigelse.
- Infrastrukturprojekterne giver en marginal formindskelse af forskellen mellem saltholdighederne i øvre og i nedre lag. Klimaændringerne giver en væsentlig større ændring.

De fundne resultater underbygger den konceptuelle models grundlag og brugbarhed. Antagelser og linearisering er opfyldte og tilfredsstillende. Modellen kan bruges til at beskrive forholdene i både 2019 og i 2100.

5.2 Projekternes påvirkning

Påvirkningerne fra de undersøgte projekter ses at være af samme lille størrelse i det nuværende som i det fremtidige klima.

Generelt anses påvirkninger på opholdstid, saltholdighed og cirkulationsstrømninger ikke for direkte miljøpåvirkninger. De indgår dog som væsentlige elementer i modellering af biologiske og biokemiske miljøpåvirkninger.

5.2.1 Opholdstid

Opholdstid betegner i denne sammenhæng en periode, som en vandpartikel i snit opholder sig i et havområde. Opholdstiden beskrives oftest som havområdetets volumen i forhold til udskiftningsvandføringen. Når de to størrelser divideres med hinanden, fremkommer en tid – opholdstiden. I litteraturen angives opholdstiden for Østersøen oftest som 30 år. Denne tidsskala gælder for de dybeste dele af Østersøen, f.eks. i Landsort Dybet, som ligger NW for Gotland. Andre lokaliteter og andre vanddybder i Østersøen har kortere opholdstid, ned til ca. 5 år. Den absolutte størrelse af opholdstiden er i denne analyse af underordnet betydning, idet den relativ påvirkning af en opholdstid er af betydning.

I Tabel 5-2 vises referenceopholdstiden (her valgt som 30 år), ændringer på grund af klimaændringer og ændringer på grund af de fem udvalgte infrastrukturprojekter.

Tabel 5-2 Påvirkninger af opholdstid (absolut og relativ) i år 2100 fra hhv. klimaændringer og infrastrukturprojekter. Referenceværdien for opholdstid er valgt til 30 år.

Scenarie	Klimaets ændring af opholdstid til år 2100 (år)	Resulterende opholdstid i år 2100 (år)	Projekternes ændring af opholdstid (år)	Projekternes relative påvirkning af opholdstid i år 2100 (%)
SSP1-2.5	+1,8±2,0	31,8±2,0	0,063±0,021	0,20
SSP2-4.5	+3,8±2,4	33,8±2,4	0,063±0,021	0,19
SSP3-7.0	+6,6±4,1	36,6±4,1	0,063±0,021	0,17

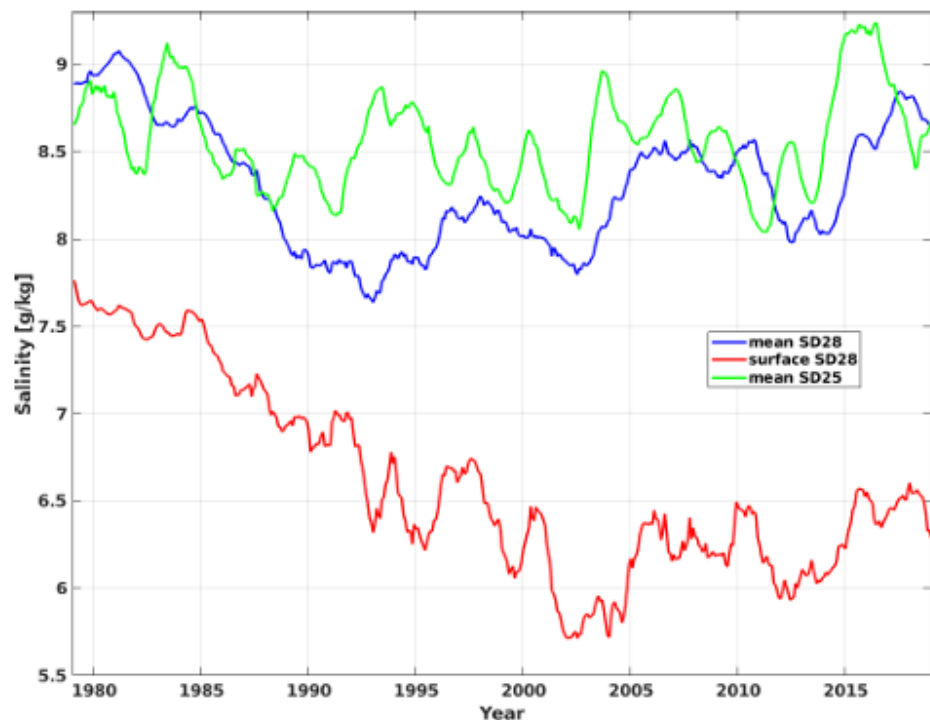
Det ses af ovenstående tabel at projekterne påvirker opholdstiden i Østersøen med ca. 0,2% (3 uger). Denne størrelsesorden er forholdsvis uafhængig af det valgte klimascenarie.

5.2.2 Saltholdighed

Saltholdigheden i Østersøens overflade påvirkes af projekterne med ca. -0,023 ‰, se Tabel 5-1.

Der er nærliggende at sammenholde de stationære ændringer fra infrastrukturprojekter med den naturlige variabilitet over forskellige tidsskalaer. Over årtusinder foregår der en anden udvikling end over timer, fordi processer, der over årtusinder er betydende (f.eks. landhævning) ikke er af betydning når man betragter processer, der er betydende over timer (f.eks. tidevand).

Et eksempel på variabilitet på år-årti skala af saltholdigheden i Østersøens overflade er vist i nedenstående figur, (Lehmann, 2022).



Figur 5-1 Tidsserier af middel saltholdighed i subdivision 28 (SD28) i Gotland Bassinet (blå) og overflade saltholdighed i SD28 (rød). Til sammenligning er middel saltholdigheden af SD25, Bornholmer Bassinet vist (grønt). Alle målinger er fra perioden 1979-2018 og er 12 måneders glidende middel.

Variabiliteten kan ses i sammenhæng med de observerede meteorologiske og oceaniske oscillationer i Nordatlanten, som over årtier både påvirker indstrømningen af saltvand til Østersøen og nedbøren i Østersøens opland. Der kan siden 1990'erne observeres en øget forskel mellem middelsaltholdigheden og saltholdigheden i overfladen i Gotland-bassinet, hvor saltholdigheden i overfladen primært bestemmes af ferskvandsafstrømningen fra land og saltholdigheden de dybere dele af Gotland-bassinet bestemmes af det periodisk indstrømmende saltvand. Det ses, at størrelsesorden af den målte variabilitet i

overfladens saltholdighed siden 1979 er sammenlignelig med den forventede klimabetingede ændring indtil 2100.

5.2.3 Perspektivering ift. klimaændringer

Opholdstid

Klimaændringerne vil over de omtrent 80 år indtil år 2100 øge opholdstiden med omtrent 4 år, svarende til 0,05 år/år. Projekterne øger opholdstiden med 0,063 år. Denne varighed er væsentlig kortere end den anvendte opholdstid for Østersøen på 30 år og også mindre end tidsskalaen for klimaændringer og den forventede levetid for projekterne.

Saltholdighed

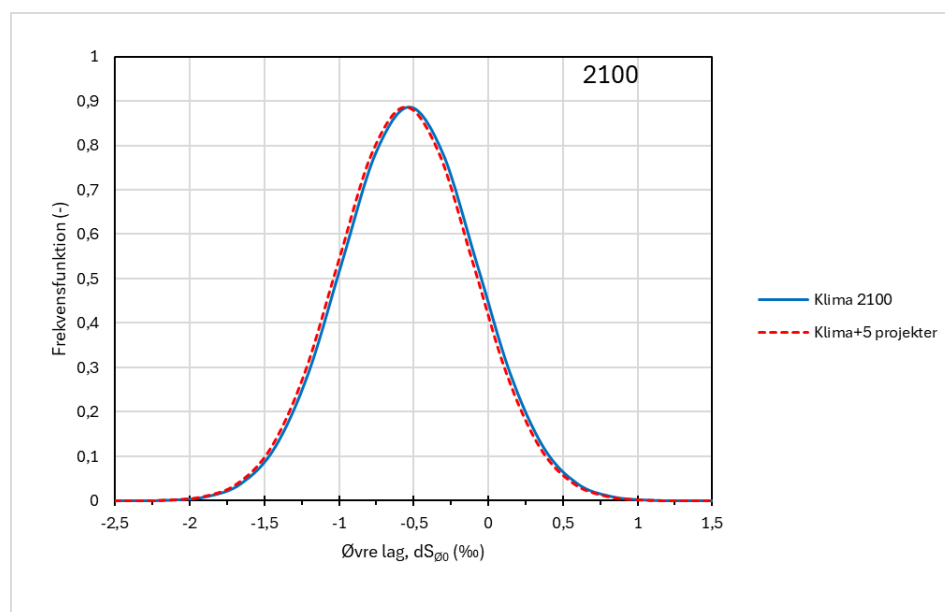
Klimaændringerne vil over de omtrent 80 år indtil år 2100 reducere saltholdigheden i overfladen af den centrale Østersø med omtrent 0,5‰, svarende til 0,006 ‰/år. Projekterne reducerer saltholdigheden med 0,023 ‰.

5.2.4 Modelresultaternes spredning

Beregningsresultaterne består af såvel prognosticeret (modelleret) effekt af klima og projekter på en række hydrauliske parametre men består ligeledes af beregningernes spredninger. Samspillet mellem de beregnede ændringer og deres spredninger er essentielle for forståelsen af prognosens resultater.

Sandsynlighedsfordeling

Resultatet og dets sandsynlighedsfordeling er illustreret ved en Gauss-kurve også kaldet en klokkekurve eller frekvensfunktion, se Figur 5-2.



*Figur 5-2 Gauss kurve for saltholdighedsændringens frekvensfunktion i overfladen af den centrale Østersø, SSP2-4.5, år 2100, udvidet model.
Klimabetingede ændringer (blå, fuldt optrukken)
Klima plus projektbetingede ændringer (rød, stiplede).*

På x-aksen vises ændringen af saltholdigheden, på y-aksen angives hyppigheden af en saltholdighedsændring som angivet på x-akse. Middelværdien ligger i dette tilfælde omkring $-0,5\text{‰}$, dvs. at der er 50% chance for at saltholdigheden i år 2100 vil ændre sig med mindre end $-0,5\text{‰}$. Tilsvarende er der ligeledes 50% chance for at ændringen vil være større end $-0,5\text{‰}$. Der er en forsvindende sandsynlighed for at saltholdigheden ændrer sig med mere end 1‰ eller med mindre end -2‰ .

Den blå kurve viser de forventede forhold i år 2100 på grund af klimaeffekter alene, mens den røde kurve viser de forventede forhold i år 2100 med klimaeffekter plus de undersøgte 5 infrastrukturprojekter.

Forskellen mellem x-værdierne for toppunkterne af den blå og den røde kurve er beregnet til $0,023\text{‰}$. Klimaeffekterne alene er beregnet til $-0,53\text{‰}$ (i den udvidede model).

For forståelsen af de næste afsnit er det vigtigt at nævne, at intervallet af 1 gange standardafvigelse (spredning) på hver side af middelværdien ved normalfordelinger indeholder 68% af alle udfald. Ved at betragte intervallet på ± 1 standardafvigelse omkring middelværdi omfattes dermed den største del af de forventelige udfald. Der er tilsvarende 32% risiko for at udfaldet vil ligge uden for intervallet.

Spredningsdiagram

I dette afsnit anvendes spredningen (eller standardafvigelsen) for at beskrive det forventede udfaldsrum for de prognosticerede (modellerede) værdier i år 2100.

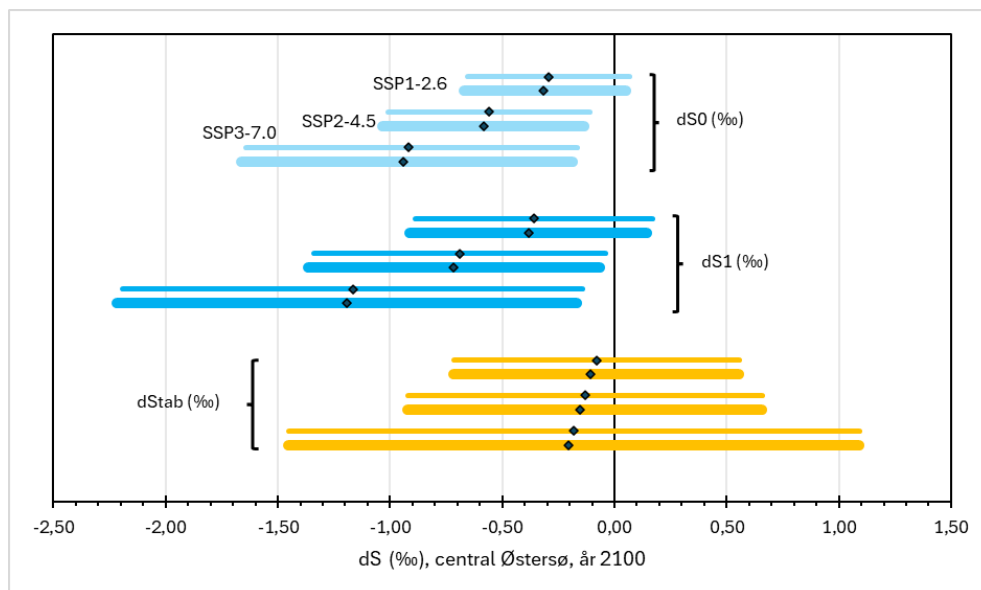
Middelværdi og spredningsintervallet er illustreret med og uden påvirkning af infrastrukturprojekterne for tre hydrauliske nøgleparametre under 3 klimascenarier i Figur 5-3.

Figuren illustrerer intervallet for $\pm$ standardafvigelse ($1x$) af klimabetingede ændringer af tre nøgleparametre. Bjælkernes længde angiver intervallet for to standardafvigelser, én på hver side af middelværdien. Intervallet svarer til at sandsynligheden for at udfaldet vil ligge indenfor bjælken er 68%.

Forskellen mellem de parvise tynde og de tykke bjælker illustrerer bidraget af infrastrukturprojekterne. Det ses at både middelværdi som forventningsintervallet ikke påvirkes betydende.

Med hensyn til effekten af klimascenarier ses at klimascenariet SSP3-7.0 viser en betydelig større påvirkning af saltholdighederne end for de andre klimascenarier. At forventningsintervallet for dStab er større end for saltholdighederne, er forventeligt da dStab er en difference af to usikre tal.

Overordnet illustrerer Figur 5-3, at år-2100-prognosen for hydrauliske nøgleparametre i den centrale Østersø ikke påvirkes betydende af infrastrukturprojekterne.



Figur 5-3 Illustration af prognose for året 2100 af ændringer af tre hydrauliske nøgleparametrene dS_0 , dS_1 , $dStab$ i den centrale Østersø (BY15) for tre klimascenarier. Sorte markeringer er middelværdierne af ændringerne.
Tynd linje: Klimaeffekter alene
Tyk linje: Klimaeffekter plus projekter
Lyseblå linje: Øvre lags saltholdighedsændringer, dS_0
Mørkeblå linje: Nedre lags saltholdighedsændringer, dS_1
Gul linje: Ændring af saltholdighedsforskel mellem lagene, $dStab$.

5.2.5 Statistiske tests

I dette afsnit anvendes statistiske tests, samt generelt anvendte kriterier til at vurdere om to fordelinger er ensartede eller ej. Mens disse tests er videnskabeligt bredt accepteret, bliver de dog ikke ofte anvendt i offentlige diskussioner. En detaljeret beskrivelse er givet i bilag A.

Der er anvendt følgende metoder:

- Cohen standardiserede middel difference,
- Bhattacharyya Distancen,
- Hellinger Distance.

To stokastiske processer med deres respektive fordelinger er undersøgt. Den ene proces beskriver påvirkningen af hydrauliske nøgleparametre i Østersøen i år 2100 alene på grund af klimaændringer, den anden proces beskriver påvirkningen af de samme parametre i år 2100 på grund af klimaændringer plus infrastrukturprojekter. Ovenstående tabeller viser at alle tre statistiske metoder anvendt på resultaterne for de to processer viser høj ensartethed. Dermed indikerer de tre objektive metoder fra statistikken, at de to prognoser for år 2100 i høj grad er ensartet og dermed ikke forskellig. Uafhængig af infrastrukturprojekternes mulige betydning, viser alle tre statistiske tests, at prognosen for år 2100 er uafhængig af om effekterne fra infrastrukturprojekterne medtages i prognosen eller ej.

Med andre ord: Den marginal men forholdsvis eksakt bestemte påvirkning fra de undersøgte projekter er ikke betydende for Østersøens prognosticerede hydrografiske tilstand (repræsenteret ved 6 nøgleparametre i Gotland Bassinet) for år 2100. Om projekterne har en betydning for den prognosticerede økologiske tilstand, vurderes på baggrund af opfølgende økologisk modellering.

5.3 Konklusion

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

5.3.1 Projekternes påvirkning

Projekterne vil påvirke saltholdigheden i øvre og nedre lag i den centrale Østersø med ca. $-0,023\text{‰}$ i øvre lag og $-0,026\text{‰}$ i nedre lag. Den tilsvarende påvirkning/svækkelse af skillefaldestabiliteten er af mindre størrelsesorden og beregnet til $-0,003\text{‰}$.

Opholdstiden vil mindskes med ca. 2 uger på grund af projekterne. Denne ændring kan ses i forhold til en tidsskala for opholdstiden på 30 år.

Saltholdigheden i overfladen af den centrale Østersø forventes at falde med $0,023\text{‰}$ på grund af projekterne.

5.3.2 Prognosen for 2100

For prognosen for år 2100 af Østersøens hydrografiske tilstand konkluderes, at de projektbetingede påvirkninger på de hydrografiske nøgleparametre i den centrale Østersø i år 2100, domineres af de klimabetingede ændringer. Klimaændringernes påvirkninger overskygger de projektbetingede påvirkninger, og forventningsintervallerne af klimaændringernes påvirkninger er betydelig bredere end forventningsintervallet af projekternes påvirkninger. Om infrastrukturprojekterne inddrages i beregningerne af prognoserne eller ikke, er ikke betydende for prognosen. Tre objektive statistiske test underbygger at prognosen for år 2100 ikke påvirkes betydende af om infrastrukturprojekterne medregnes i prognosen.

Ved prognoser for længere perioder end til år 2100 stiger ikke kun spredningen men også risikoen for systemskifte i klimasystemerne (f.eks. stop af Golfstrøm (AMOC), løsrivning af is fra Antarktis el.lign.). Dermed stiger også risikoen for at det hydrografiske system for Østersø ændrer sig så meget at de anvendte modeller ikke længere vil være gyldige.

5.3.3 Sammenligning med resultater fra mekanistisk model

Parallelt med den her præsenterede konceptuelle modellering er der gennemført modelleringer med den mekanistiske model MIKE3, se (COWI, DHI, 2024). Formålet med at gennemføre to parallelle modelleringer var at etablere en basis til at kunne vurdere resultaternes afhængighed af det valgte modelkoncept. Den aktuelle opgave med at vurdere effekten af små ændringer af Bælthavets gennemstrømning på Østersøens hydrografi under hensyntagen til

klimaændringer er så kompleks at modellering med to indbyrdes uafhængige modelkoncepter er formålstjenlig. Det er således forventet at modellerne vil give forskellige numeriske tal. Resultatet af den parallelle modellering er en fælles størrelsesorden af de modellerede påvirkninger.

En sammenligning af de overordnede numeriske resultater er givet i Tabel 5-3.

*Tabel 5-3 Modellerede ændringer i saltholdigheder i Gotlandsbassinet på grund af klimaændringer (år 2100) og de fem infrastrukturprojekter.
dS₀₀: Saltholdighedsændring i Gotlandsbassinets overflade
dS₀₁: Saltholdighedsændring i Gotlandsbassinets bundlag*

Model	Scenarie	dS ₀₀ (‰)	dS ₀₁ (‰)
Konceptmodel	Klima (SSP2-4.5)	-0,56	-0,69
	Projekter	-0,023	-0,026
	Klima + projekter	-0,57	-0,73
Mekanistisk model	Klima (SSP2-4.5)	-0,46	-0,28
	Projekter	+0,01	+0,03
	Klima + projekter	-0,45	-0,25

Det ses af ovenstående at påvirkningerne af klimaændringerne modelleres til samme størrelsesorden med de to modeltyper.

Størrelsesorden af projekternes påvirkning er i begge modeller af betydelig mindre størrelsesorden. At fortegnet på projekternes påvirkning er forskellig, er begrundet i modellernes forskellige koncepter. I modsætning til den konceptuelle model medtager den mekanistiske model effekterne af en ændret turbulensproduktion i Bælthavet. Dermed modellerer den mekanistiske model andre og flere processer af betydning for saltholdigheden i Bælthavets nedre lag end den konceptuelle model. En ændring af saltholdigheden i Bælthavets bundvand medfører, at saltholdigheden af det indstrømmende saltvand til Østersøen ligeledes ændres, hvilket resulterer i en øget saltholdighed i Gotlands Bassinets nedre lag ved mekanistisk modellering. Plausibiliteten af de mekanistiske modelresultater er undersøgt særskilt ved målrettede beregninger i Bilag C.

En sammenligning af de to modellers resultater er gennemført for nøgleresultatet for ændringen af overfladens saltholdighed i den centrale Østersø (Gotland Bassinet). Saltholdighedsændringen er modelleret med klimaeffekter svarende til SSP2-4.5 for året 2100 inklusive effekten af de fem infrastrukturprojekter. Da MIKE modelleringen ikke har medtaget ændringer af vindforholdene, er vindens effekt i den konceptuelle model trukket ud af resultatet. Resultater er sammenlignet nedenfor i Tabel 5-4.

Tabel 5-4 Sammenligning af resultaterne fra konceptmodel og mekanistisk model (MIKE3): Saltholdighedsændring i Gotlandsbassinets overflade, dS_{00} , på grund af klimaændringer i år 2100 for klimascenarie SSP2-4.5, inklusive påvirkning af de fem infrastrukturprojekter.

dS_{00} , 2100, SSP2-4.5	Koncept model	MIKE3 model
Middel (uden vindændring)	-0,49 ‰	-0,46 ‰
Middel (med vindændring)	-0,57 ‰	-
Spredning (med vindændring)	±0,45 ‰	-

Det ses at de to modelkoncepter giver resultater, der for den modellerede saltholdighedsændring kun afviger med 0,03 ‰. Det svarer til en relativ afvigelse mellem modelresultaterne på 6%. Dette vurderes at være en meget tilfredsstillende overensstemmelse. Metoderne bekræfter dermed hinanden og modelresultatet afhænger dermed ikke af valg af metode.

Med hensyn til den forventede bredde af forventningsintervallet findes, at den er af samme størrelsesorden som selve ændringen/påvirkningen. Dette skyldes spredningen i prognosen for vandstandsstigning, nedbørsforhold og vindforhold for år 2100.

6 Referencer

- Christensen, O. B. (2022). *Atmospheric regional climate projections for the Baltic Sea region until 2100*. Hentet fra Copernikus:
<https://esd.copernicus.org/articles/13/133/2022/>
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, (2nd ed.). Routledge.
- COWI, DHI. (2024). *Påvirkning af Østersøen fra marine anlægsprojekter i Bælthavet og Øresund*. Copenhagen: Sund og Bælt.
- COWI/DHI. (2024). *Undersøgelse af fremskudt færgehavn ved Tårs, Forudsætningsnotat (udkast)*. Udarbejdet for Sund og Bælt. A258774 - HYD-TEK-02. Lyngby: COWI.
- COWI/DHI. (2024c). *Undersøgelse af fremskudt færgehavn ved Tårs, Konceptuel model for cirkulation i Østersøen*. Sund & Bælt.
- COWI/DHI. (2025). *Konceptuel model for cirkulation i Østersøen, Undersøgelser af fremskudt færgehavn ved Tårs (DRAFT)*. København: Sund & Bælt.
- COWI/DHI. (2025). *Strømningsanalyse, mv. af fremskudt færgehavn ved Tårs, Hydrografisk modellering*. Lyngby: COWI.
- DMI. (2024). *DMI_Klimaatlas_v2024a_Havspejlsstigning.xlsx (live.com)*. Hentet fra
https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fdownload.dmi.dk%2FResearch_Projects%2Fklimaatlas%2Fv2024a%2Fextended_datasets%2FDMI_Klimaatlas_v2024a_Udvidet_havniveau.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK.
- DMI. (2024). *DMI_Klimaatlas_v2024a_Kommuner_Alle.xlsx (live.com)*. Hentet fra
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.
- Glen, S. (2009). <https://www.statisticshowto.com/probability-and-statistics/statistics-definitions/cohens-d/#:~:text=Cohen%E2%80%99s%20D%20or%20standardized%20mean%20difference%2C%20is,A%20has%20a%20larger%20effect%20than%20medication%20B>. Hentet fra
<https://www.statisticshowto.com/contact/>.
- H. U. Riisgaard, R. T. (2014). Dwarfism of blue mussel in the low saline Baltic Sea - Growth to the lower salinity limit. *Marine Ecology Progress Series*.
- HELCOM. (1993). *Baltic Sea Environment Proceedings, nr. 54, First assesment of the state of the coastal waters of the Baltic Sea*. Helsinki: Helsinki Commission.
- HELCOM. (September 2023). *Guidelines for monitoring of radioactive substances*. Hentet fra <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/Guidelines-for-Monitoring-of-Radioactive-Substances.pdf>.
- HELCOM. (10. 01 2025). *HELCOM map and data service*. Hentet fra
<https://maps.helcom.fi/website/mapservice/?datasetID=93eb15c8-0de3-40f7-b3c7-c5e02cef4a7e>:
<https://maps.helcom.fi/website/mapservice/?datasetID=93eb15c8-0de3-40f7-b3c7-c5e02cef4a7e>

- Højsgaard, S. (17. 03 2019).
<https://people.math.aau.dk/~sorenh/misc/gymstat/2019/hvorfor-normal-19.pdf>. Hentet fra Hvorfor er normalfordelingen så normal?
- Jakobsen, F. (1991). *Bornholmer Dybets hydrografi, Havforskning fra Miljøstyrelsen, Nr. 8*. København: Danmarks Miljøundersøgelser.
- Jürgensen, C. (1989). *Entrainment introduced by piers, dams and ships in a stratified channel flow, Series Paper 48*. Lyngby: Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark.
- Lehmann, A. e. (2022). Salinity dynamics of the Baltic Sea. *Earth System Dynamics, 13*, 373-392.
- Marinefinland. (8. 10 2024). Hentet fra https://www.marinefinland.fi/en-US/Nature_and_how_it_changes/The_unique_Baltic_Sea/The_Baltic_Sea_in_numbers.
- Omstedt, A. W. (2001). Baltic Sea ocean climate: an analysis of 100 yr of hydrographic data with focus on the freshwater budget. *Climate research*, Vol.18, 5-15, 2001.
- Pedersen, F. B., & Møller, J. S. (1981). Diversion of River Neva - How will it influence the Baltic Sea, the Belts and the Kattegat. *Nordic Hydrology, 12*, 1-20.
- WIKIPEDIA. (12. January 2025).
https://en.wikipedia.org/wiki/Bhattacharyya_distance.
- Wikipedia. (2025). https://en.wikipedia.org/wiki/Hellinger_distance. Hentet fra Hellinger Distance.

Bilag A Statistiske tests

I dette afsnit anvendes statistiske tests, samt generelt anvendte kriterier til at vurdere om to fordelinger er ensartede eller ej. Mens disse tests er videnskabeligt bredt accepteret, bliver de dog ikke ofte anvendt i offentlige diskussioner. I det følgende gennemføres analyser af

- Cohen's standardiseret middel difference (d)
- Bhattacharyya Distancen (D_B)
- Hellinger Distance H

A.1 Cohen's standardiseret middel difference (d)

Formlen er for middeldifferencen d givet i (Glen, 2009):

$$d = \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{\sigma_{pooled}}$$

μ_1 : Middelværdi for ensemble 1

μ_2 : Middelværdi for ensemble 2

σ_{pooled} : Standardafvigelse for pool af udfald: $\sigma_{pooled} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}$

σ_1 : Standardafvigelse af ensemble 1

σ_2 : Standardafvigelse af ensemble 2

Kriterierne for ensartethed er givet i (Cohen, 1988). Resultaterne af testene er givet i nedenstående tabeller for de udvalgte hydrauliske nøgleparametre for den centrale Østersø for såvel den ikke-udvidede model (se Tabel A-6-1) som den udvidede model (se Tabel A-6-2):

Tabel A-6-1 Cohen's standardiseret middel difference (d). **Ikke udvidet** model.

Parameter	μ_1	μ_2	σ_{pooled}	d	Ensartethed		
					Høj $d < 0,2$	Mod. $0,2 \leq d \leq 0,8$	Lav $d > 0,8$
$S_{\emptyset 0}$ (‰)	-1,025	-1,048	0,612	0,038	X		
$S_{\emptyset 1}$ (‰)	-0,812	-0,838	0,687	0,038	X		
$Stab_{\emptyset}$ (‰)	0,213	0,21	0,920	0,003	X		
Q_{A1} (m ³ /s)	-1820	-1850	1166	0,025	X		
$Y_{\emptyset 0}$ (m)	0,10	0,14	2,21	0,018	X		
T (år)	3,84	3,90	2,43	0,026	X		

S_{00} : Saltholdighed i den centrale Østersøs øvre lag

S_{01} : Saltholdighed i den centrale Østersøs nedre lag

$STAB_0$: Saltholdighedsforskel i den centrale Østersø mellem øvre og nedre lag

Q_{A1} : Vandføring ind i Østersøen over de danske tærskler (Gedser og Drogden)

Y_{00} : Øvre lags tykkelse i den centrale Østersø

T: Opholdstid baseret på Østersøens volumen og Q_{A1} .

Tabel A-6-2 Cohen's standardiseret middel difference (d). **Udvidet model.**

Parameter	μ_1	μ_2	σ_{pooled}	d	Ensartethed		
					Høj $d < 0,2$	Mod. $0,2 \leq d \leq 0,8$	Lav $d > 0,8$
S_{00} (‰)	-0,53	-0,55	0,453	0,051	X		
S_{01} (‰)	-0,69	-0,72	0,648	0,040	X		
$Stab_0$ (‰)	-0,16	-0,16	0,791	0,004	X		

S_{00} : Saltholdighed i den centrale Østersøs øvre lag

S_{01} : Saltholdighed i den centrale Østersøs nedre lag

$STAB_0$: Saltholdighedsforskel i den centrale Østersø mellem øvre og nedre lag

A.2 Bhattacharyya distancen (D_B)

Formlen er for Bhattacharyya distancen (D_B) er givet i (WIKIPEDIA, 2025), som for tilfældet af to normalfordelinger giver:

$$D_B = \frac{1}{4} \cdot \frac{(\mu_1 - \mu_2)^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} + \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{2\sigma_1\sigma_2} \right)$$

μ_1 : Middelværdi for ensemble 1

μ_2 : Middelværdi for ensemble 2

σ_1 : Standardafvigelse af ensemble 1

σ_2 : Standardafvigelse af ensemble 2

Bhattacharyya distancen (D_B) varierer mellem 0 og 1, hvor 0 angiver fuldstændig ensartethed og 1 betyder fuldstændig forskellighed. Værdier for D_B under $3 \cdot 10^{-4}$ som vist i nedenstående tabeller indikerer dermed signifikant ensartethed, se Tabel A-6-3 for den ikke udvidede model og Tabel A-6-4 for den udvidede model.

Tabel A-6-3 *Bhattacharyya distancen (D_B). **Ikke udvidet** model.*

Parameter	μ_1	μ_2	σ_1	σ_2	D_B	Ensartethed	
						Høj, D_B tæt på 0	Lav, D_B tæt på 1
S_{00} (‰)	-1,025	-1,048	0,613	0,613	$2 \cdot 10^{-4}$	X	
S_{01} (‰)	-0,812	-0,838	0,687	0,687	$2 \cdot 10^{-4}$	X	
$Stab_0$ (‰)	0,213	0,210	0,921	0,921	$1 \cdot 10^{-6}$	X	
Q_{A1} (m ³ /s)	-1820	-1850	1166	1166	$8 \cdot 10^{-5}$	X	
Y_{00} (m)	0,10	0,14	2,21	2,21	$4 \cdot 10^{-5}$	X	
T (år)	3,85	3,91	2,44	2,44	$8 \cdot 10^{-5}$	X	

S_{00} Saltholdighed i den centrale Østersøs øvre lag

S_{01} : Saltholdighed i den centrale Østersøs nedre lag

$Stab_0$: Saltholdighedsforskel i den centrale Østersø mellem øvre og nedre lag

Q_{A1} : Vandføring ind i Østersøen over de danske tærskler (Gedser og Drogden)

Y_{00} : Øvre lags tykkelse i den centrale Østersø

T: Opholdstid baseret på Østersøens volumen og Q_{A1} .

Tabel A-6-4 *Bhattacharyya distancen (D_B). **Udvidet** model.*

Parameter	μ_1	μ_2	σ_1	σ_2	B_D	Ensartethed	
						Høj, D_B tæt på 0	Lav, D_B tæt på 1
S_{00} (‰)	-0,53	-0,55	0,453	0,453	$3 \cdot 10^{-4}$	X	
S_{01} (‰)	-0,69	-0,72	0,648	0,649	$2 \cdot 10^{-4}$	X	
$Stab_0$ (‰)	-0,16	-0,16	0,791	0,792	$2 \cdot 10^{-6}$	X	

S_{00} Saltholdighed i den centrale Østersøs øvre lag

S_{01} : Saltholdighed i den centrale Østersøs nedre lag

$Stab_0$: Saltholdighedsforskel i den centrale Østersø mellem øvre og nedre lag

A.3 Hellinger distance H

Formlen er for Hellinger distance (H) givet i (Wikipedia, 2025), som for tilfældet af to normalfordelinger giver:

$$H = \sqrt{1 - \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{4} \cdot \frac{(\mu_1 - \mu_2)^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}\right)}$$

μ_1 : Middelværdi for ensemble 1
 μ_2 : Middelværdi for ensemble 2
 σ_1 : Standardafvigelse af ensemble 1
 σ_2 : Standardafvigelse af ensemble 2

Som for Bhattacharyya distancen (D_B) varierer Hellinger distancen (H) mellem 0 og 1, hvor 0 angiver fuldstændig ensartethed og 1 betyder fuldstændig forskellighed. Værdier for D_B under $3 \cdot 10^{-4}$ som vist i nedenstående tabeller indikerer dermed signifikant ensartethed, se Tabel A-6-5 for den ikke udvidede model og Tabel A-6-6 for den udvidede model.

Tabel A-6-5 Hellinger distancen (H). **Ikke udvidet** model.

Parameter	μ_1	μ_2	σ_1	σ_2	H	Ensartethed	
						Høj, H tæt på 0	Lav, H tæt på 1
S_{00} (‰)	-1,025	-1,048	0,613	0,613	0,013	X	
S_{01} (‰)	-0,812	-0,838	0,687	0,687	0,013	X	
Stab $\emptyset$ (‰)	0,213	0,210	0,921	0,921	0,001	X	
Q_{A1} (m ³ /s)	-1820	-1850	1166	1166	0,009	X	
Y_{00} (m)	0,10	0,14	2,21	2,21	0,006	X	
T (år)	3,85	3,91	2,44	2,44	0,009	X	

S_{00} : Saltholdighed i den centrale Østersøs øvre lag

S_{01} : Saltholdighed i den centrale Østersøs nedre lag

STAB $\emptyset$: Saltholdighedsforskel i den centrale Østersø mellem øvre og nedre lag

Q_{A1} : Vandføring ind i Østersøen over de danske tærskler (Gedser og Drogden)

Y_{00} : Øvre lags tykkelse i den centrale Østersø

T: Opholdstid baseret på Østersøens volumen og Q_{A1} .

Tabel A-6-6 Helinger distancen (H). **Udvidet** model.

Parameter	μ_1	μ_2	σ_1	σ_2	H	Ensartethed	
						Høj, H tæt på 0	Lav, H tæt på 1
S_{00} (‰)	-0,53	-0,55	0,453	0,453	0,013	X	
S_{01} (‰)	-0,69	-0,72	0,648	0,649	0,013	X	
Stab ₀ (‰)	-0,16	-0,16	0,791	0,792	0,001	X	

S_{00} Saltholdighed i den centrale Østersøs øvre lag

S_{01} : Saltholdighed i den centrale Østersøs nedre lag

STAB₀: Saltholdighedsforskel i den centrale Østersø mellem øvre og nedre lag

A.4 Sammenfatning statistiske tests

To stokastiske processer med deres respektive fordelinger er undersøgt. Den ene proces beskriver påvirkningen af hydrauliske nøgleparametre i Østersøen i år 2100 alene på grund af klimaændringer, den anden proces beskriver påvirkningen af de samme parametre i år 2100 på grund af klimaændringer plus infrastrukturprojekter. Ovenstående tabeller viser at alle tre statistiske metoder anvendt på resultaterne for de to processer viser høj ensartethed. Dermed indikerer de tre objektive metoder fra statistikken, at de to prognoser for år 2100 i høj grad er ensartet og dermed ikke forskellig. Med baggrund i generelle statistiske metoder kan det dermed antages at effekten fra infrastrukturprojekterne ikke bidrager med en betydende forskel i prognosen for år 2100 af Østersøens hydrografiske tilstand.

Grundene til at de to fordelinger for effekt af klimaændringerne alene og klimaændringer plus infrastrukturprojekter er så ensartet er:

1. Påvirkningerne fra klimaændringer dominerer påvirkningerne fra infrastrukturprojekterne, dvs. de klimabetingende ændringer er væsentlig større end de projektbetingede (ca. med en faktor 25)
2. Det forventede udfaldsinterval fra klimaændringerne, dvs. intervallet mellem den nedre grænse (middelværdien minus spredning) til den øvre grænse (middelværdien plus spredning) domineres af bidraget fra klimaændringerne, som langt overstiger infrastrukturprojekternes bidrag (ca. med en faktor 500).

Med andre ord: Den marginal men forholdsvis eksakt bestemte påvirkning fra de undersøgte projekter er ikke betydende for Østersøens prognosticerede hydrografiske tilstand for år 2100.

Bilag B Statistisk analyse ferskvandsafstrømning

Klimafaktorer for tilstrømningernes spredning (standarddeviation) $K(\sigma_Q)$ beregnes på baggrund af forholdet mellem klimafaktoren for spredningen af nedbør (over land) $K(\sigma_P)$ og klimafaktoren for middelværdien af nedbøren (over land) $K(\mu_P)$. Dette forhold skaleres med klimafaktoren for middelværdien af tilstrømningen $K(\mu_Q)$. Dette kan udtrykkes som en formel:

$$K(\sigma_Q) = \frac{K(\sigma_P)}{K(\mu_P)} \cdot K(\mu_Q)$$

Dermed bibeholdes samme forhold mellem spredning og middelværdi i ferskvandstilførslen som i nedbøren.

Da klimafaktorerne for ferskvandstilstrømning er givet som middelværdi og spredning, kan sandsynlighedsfordelingen af de fremtidige ferskvandstilførsler beskrives ved normalfordelinger, i hvis tæthedsfunktion der netop indgår middelværdi μ og spredning σ :

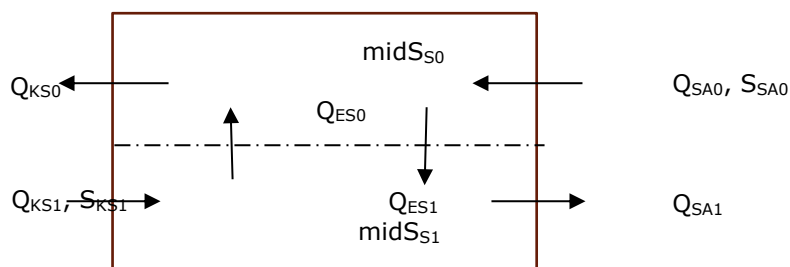
$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right)$$

C.1 Formål

Det påpeges at de her undersøgte processer ikke er med medtaget i cirkulationsbeskrivelsen i den konceptuelle model (COWI/DHI, 2025), da de er meget små og derfor af lille betydning.

Til beregning af effekten af reduceret nedadrettet og øget opadrettet medrivning i Bælthavet anvendes dele af den konceptuelle model, der er udviklet i (COWI/DHI, 2025).

Der anvendes følgende definitionsskitse for cirkulationsstrømningen i Bælthavet (og sydlig Kattegat), hvor Bælthavet anses som et bladningskar, hvor saltholdighederne i øvre og nedre lag repræsenterer middelværdier $\text{mid}S_{S0}$ hhv. $\text{mid}S_{S1}$, se Figur 6-1.



Figur 6-1 Definitionsskitse for cirkulationsstrømning i Bælthavet

Saltholdighederne angives i PSU (‰):

$$S_{KS1}=33$$
$$S_{SA0}=7,8$$

Vandføringerne angives i $10^4 \text{ m}^3/\text{s}$:

$$\begin{aligned} Q_{KS0} &= 3,3 \\ Q_{KS1} &= 1,8 \\ Q_{ES0} &= 2,72 \\ Q_{ES1} &= 2,34 \\ Q_{SA1} &= 1,42 \\ Q_{SA0} &= 2,92 \end{aligned}$$

Saltbalancen for nedre lag:

$$Q_{KS1} \cdot S_{KS1} + Q_{ES1} \cdot midS_{S0} = midS_{S1} \cdot (Q_{ES0} + Q_{SA1})$$

$$midS_{S1} = \frac{Q_{KS1} \cdot S_{KS1} + Q_{ES1} \cdot midS_{S0}}{Q_{ES0} + Q_{SA1}}$$

Saltbalancen for øvre lag:

$$Q_{SA0} \cdot S_{SA0} + Q_{ES0} \cdot midS_{S1} = midS_{S0} \cdot (Q_{ES1} + Q_{KS0})$$

$$midS_{S0} = \frac{Q_{SA0} \cdot S_{SA0} + Q_{ES0} \cdot midS_{S1}}{Q_{ES1} + Q_{KS0}}$$

Hermed foreligger to ligninger med to ubekendte, som løses til:

$$midS_{S0} = 15,064 \text{ ‰}$$

$$midS_{S1} = 22,862 \text{ ‰}$$

C.2.1 Klimaændringer

Hypotesen for saltholdighedsøgning i Bælthavets bundlag er at der genereres mindre turbulens i bundlaget, som derfor medriver mindre vandmængder (af ferskere vand) fra det øvre lag ned i bundlaget. Påvirkningen over et så stort område må bero på en proces, der virker over hele området. En sådan proces er turbulensproduktionen på grund af friktion mod bund og skilleflade. Denne turbulensproduktion er afhængig af bundlagets strømhastighed. Strømhastigheden reduceres på grund af øget vandstand som resultat af klimaændringerne. Det påpeges at denne proces ikke medregnet i cirkulationsbeskrivelsen i den konceptuelle model (COWI/DHI, 2025), da den blev anset for at være en anden-ordens proces, dvs. mindre betydende.

Effekten af klimaændringen på hastigheden i nedre lag (ved Anholt i dybde på 30 m) er beregnet i (COWI/DHI, 2025). Middelværdien af hastigheden i tredje potens er proportional med den afsatte energi ved friktion. Værdierne for ovennævnte middelværdier for situationen for 2019 (uden klimaændringer) og for året 2100 (med klimaændringer) er givet i nedenstående tabel. Den relative forskel mellem tallene giver den relative forskel mellem energierne til nedadrettet medrivning.

Tabel 6-7 Strømhastighedsforhold 2019 og 2100 (klimaændring) ved Anholt

Klimaændringens effekt	Middel af hastighed opløftet i 3.
2019 (ingen forbindelser)	0,00193
2100 (ingen forbindelser)	0,00174
Relativ ændring	-4,9%

Dermed reduceres den energi, der er til rådighed til nedadrettet medrivning i Bælthavet med ca. 4,9%. Under forudsætning af at densitetsforskellen mellem

øvre og nedre lag kun ændres ubetydeligt vil den ændrede energi betyde at den nedadrettede medrivningsvandføring Q'_{ES1} reduceres med 4,9%:

$$Q'_{ES1} = Q_{ES1} \cdot (1 - 0,049) \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q'_{ES1} = 2,34 \cdot 0,951 \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q'_{ES1} = 2,225 \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$$

Dette betyder at den nedadrettede medrivningsvandføring reduceres med $0,115 \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$.

For at opfylde volumenbalancen, reduceres den opadgående medrivning med den samme vandføring:

$$Q'_{ES0} = (Q_{ES0} - 0,115) \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q'_{ES0} = (2,72 - 0,115) \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q'_{ES0} = 2,605 \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$$

C.2.2 Infrastrukturprojekter

Hypotesen for projekternes øgning af saltholdigheden i Bælthavets bundlag er projekterne øgede turbulensproduktion på grund af deres strømningsmodstand. Den største del af den øgede turbulensproduktion foregår i det øvre lag og øger derfor den opadrettede medrivning. Det betyder at der medrives mere bundvand op i overfladelaget. Dermed kræves der en tilsvarende øget tilstrømning til bundlaget for at kompensere for den øgede opadrettede medrivning. Denne kompensationsstrøm kan kun komme fra Kattegat/Nordsøen og det indstrømmende nordsøvand vil have Nordsøens høje saltholdighed.

Effekten af infrastrukturprojekterne (i det følgende også kaldet projekterne) på vandføringen gennem forskellige snit i Bælthavet er beregnet i (COWI/DHI, 2025) og angivet i rapportens tabel 7-8. Her er den procentuelle ændring af vandføringen $(Q'-Q)/Q$ beregnet. Da den afsatte effekt er proportional med hastigheden i 3. potens, giver små ændringer i hastigheden 3 gange så store ændringer i effekten dE . Det antages at halvdelen af den til opadrettet medrivning tilgængelige energi hidrører fra strømningsmodstand (den anden halvdel kommer fra vind), se (Jürgensen, 1989).

Tabel 6-8 Infrastrukturprojekters effekt på strømningsændring $(Q'-Q)/Q$, energiforhold (dE) , opadrettet medrivning (Q_{ES0}) og indstrømning til bundlaget fra Kattegat (Q_{KS1})

Lokalitet	$(Q'-Q)/Q$ (%)	dE (%)	Q_{ES0} (10^4 m^3/s)	dQ_{ES0} (10^4 m^3/s)	Q_{KS1} (10^4 m^3/s)	Q'_{KS1} (10^4 m^3/s)
Storebælt	-0,73	-2,19	2,72	-0,030	1,8	1,830
Darss	-0,38	-1,14	2,72	-0,016	1,8	1,816
Drogden+Darss	-0,18	-0,54	2,72	-0,007	1,8	1,807

C.3 Resultat

Ovenstående koncepter er nu anvendt til estimering af saltholdighedsændringer på grund af hhv. klimaændringer og infrastrukturprojekter.

C.3.1 Klimaændringer

Indsættes de i afsnit C.2.1 fundne værdier i ligningen for det nedre lags saltholdighed $midS_{S1}$, findes saltholdigheden for bundlaget med klimaændringer (år 2100) og uden forbindelser:

$$midS'_{S1} = \frac{Q_{KS1} \cdot S_{KS1} + Q'_{ES1} \cdot midS_{S0}}{Q'_{ES0} + Q_{SA1}} \text{‰}$$

$$midS'_{S1} = \frac{1,8 \cdot 33 + 2,225 \cdot 15,064}{2,605 + 1,42} \text{‰}$$

$$midS'_{S1} = 23,085 \text{‰}$$

Dermed ændres saltholdigheden i Bælthavets nedre lag fra 22,862‰ til 23,085‰ og dermed med ca. 0,22‰.

Det er dermed sandsynliggjort at saltholdigheden i bundlaget vil stige med en størrelsesorden på 0,2 ‰ på grund af klimaændringer.

C.3.2 Infrastrukturprojekter

Der opstilles nu saltbalancen for nedre lag i Bælthavet. Der henvises til definitionsskitse og nomenklatur i bilag C.2.

$$midS'_{S1} \cdot (Q'_{ES0} + Q_{SA1}) = S_{KS1} \cdot Q'_{KS1} + S_{S0} \cdot Q_{ES1}$$

$$midS'_{S1} = \frac{S_{KS1} \cdot Q'_{KS1} + S_{S0} \cdot Q_{ES1}}{Q'_{ES0} + Q_{SA1}}$$

Indsættes de i afsnit C.2.2 i ovenstående ligning findes følgende konceptestimer for saltholdigheder i Bælthavets bundvand $midS'_{S1}$ på grund af infrastrukturprojekterne. Saltholdighedsændringerne på baggrund af konceptestimerne er sammenlignet med de tilsvarende saltholdighedsændringer fra MIKE3 modellerne i (COWI/DHI, 2025).

Lokalitet	$midS_{S1}$ (‰)	$midS'_{S1}$ (‰) konceptestimat	dS_{S1} (‰) konceptestimat	dS_{S1} (‰) MIKE3 model
Storebælt	22,86	23,27	0,40	0,2
Darss	22,86	23,07	0,21	0,2
Drogden+Darss	22,86	22,96	0,10	0,2

Konceptestimaterne beskriver et interval for saltholdighedsændring på mellem 0,1 ‰ og 0,4 ‰. Det er dermed sandsynliggjort at projekterne vil give anledning til en saltholdighedsstigning i bundlaget på omkring 0,2 ‰ på grund af projekternes øgning af opadrettet medrivning i Bælthavet.

C.4 Diskussion

Størrelsesordenen af effekter af klimaændringerne og projekterne på saltholdigheden i Bælthavets bundvand er dermed estimeret og sammenlignes med modelresultaterne præsenteret i figur 7-22 i (COWI/DHI, 2025), se nedenstående Tabel 6-9.

Tabel 6-9 Klimaændringernes og infrastrukturprojekternes effekt på saltholdigheden i Bælthavets nedre lag: Sammenligning mellem MIKE3 modelleringen og de konceptuelle estimater

Påvirkning	Ændring af saltholdighed i Bælthavets bundlag dS_{51} (‰)	
	Konceptuelle estimater	MIKE3 model
Klimaændringer	0,2	0,2
Infrastrukturprojekter	0,1-0,4	0,2
Samlet	0,3-0,6	0,4

Ovenstående tabel viser god overensstemmelse mellem resultaterne fra de to modelkoncepter. De her gennemførte konceptuelle estimater bekræfter at de med MIKE3 modellerede stigninger i nedre lags saltholdighed kan forklares ved påvirkning fra klimaændringer og infrastrukturprojekter.

Klimaændringerne resulterer i en reduceret strømhastighed i nedre lag og dermed en reduceret nedadrettet medrivning af ferskere overfladevand til bundvandet i Bælthavet. Med andre ord "fortyndes" den nedre lag i mindre grad med overfladevand på grund af klimaændringerne og saltholdigheden bliver dermed lidt højere.

Infrastrukturprojekterne resulterer i en øget turbulensproduktion i øvre lag og dermed en øget opadrettet medrivning. I det nedre lag skal den øgede medrivning kompenseres med øget tilstrømning af salt nordsøvand. Dermed stiger saltholdigheden.

Den konceptuelle model omfatter ikke effekten af ændrede strømhastigheder på medrivning. Disse processer anses for sekundære. Da medrivningsprocesserne i Bælthavet er væsentlig mere betydende end f.eks. i den centrale Østersø, kan sekundære effekter på medrivningsforholdene få betydende konsekvenser på saltholdighedsforholdene. Ved anvendelse af den konceptuelle model på Bælthavet vil modellen med fordel kunne udvides ved at inddrage disse processer.