

SUND OG BÆLT

ADRESSE COWI A/S  
Parallelvej 2  
2800 Kongens Lyngby

TLF +45 56 40 00 00  
FAX +45 56 40 99 99  
WWW cowi.dk

# STRØMNINGSANALYSE, MV. AF FREMSKUDT FÆRGEHAVN VED TÅRS

HYDROGRAFISK MODELLERING

## INDHOLD

|     |                                          |    |
|-----|------------------------------------------|----|
| 1   | Sammenfatning                            | 3  |
| 1.1 | Baggrund                                 | 3  |
| 1.2 | Resultater                               | 4  |
| 1.3 | Diskussion                               | 19 |
| 2   | Indledning                               | 21 |
| 2.1 | Formål                                   | 21 |
| 2.2 | Indhold og baggrund                      | 21 |
| 3   | Hydrografiske modeller                   | 23 |
| 3.1 | Indledning                               | 23 |
| 3.2 | Modeller                                 | 28 |
| 3.3 | Infrastrukturprojekter                   | 29 |
| 3.4 | Parameterisering i den regionale model   | 31 |
| 3.5 | Klimaændringer                           | 31 |
| 4   | Forudsætninger og konsekvenser           | 39 |
| 4.1 | Introduktion                             | 39 |
| 4.2 | Infrastrukturprojekter                   | 39 |
| 4.3 | Klimaændringer                           | 41 |
| 4.4 | År 2019                                  | 42 |
| 4.5 | Vurdering af resultater                  | 45 |
| 5   | Hydrografisk påvirkning i Langelandsbælt | 47 |
| 5.1 | Baggrund                                 | 47 |
| 5.2 | Havnens udformning                       | 47 |
| 5.3 | Kystpåvirkning                           | 63 |

PROJEKTNR.

DOKUMENTNR.

A258774

HYD-RAP-01

VERSION

UDGIVELSESDATO

BESKRIVELSE

UDARBEJDET

KONTROLLERET

GODKENDT

1.0

2 juni 2025

Hydrografi

FLJ/YELN/AAL

BBC/CRJ

JJU

|     |                                                |     |
|-----|------------------------------------------------|-----|
| 6   | Hydrografisk påvirkning i Bælthavet            | 70  |
| 6.1 | Baggrund                                       | 70  |
| 6.2 | Vandføringsændring (brutto)                    | 70  |
| 6.3 | Vandstande langs kysten                        | 73  |
| 7   | Hydrografisk påvirkning af Østersøen           | 78  |
| 7.1 | Baggrund                                       | 78  |
| 7.2 | Overfladefordelinger                           | 78  |
| 7.3 | Fordeling langs transekt                       | 86  |
| 7.4 | Fordeling over vertikale profiler              | 93  |
| 7.5 | Tidslig variation i udvalgte dybder            | 103 |
| 7.6 | Sensitivitetstest                              | 109 |
| 7.7 | Netto transporter                              | 114 |
| 7.8 | Vandførings- og salttransportændring (brutto)  | 118 |
| 7.9 | Samlet betragtning                             | 120 |
| 8   | Diskussion                                     | 122 |
| 8.1 | Infrastrukturprojekter og klimaændring         | 122 |
| 8.2 | Påvirkning af økologien                        | 122 |
| 8.3 | Vurdering af infrastrukturprojekter            | 123 |
| 8.4 | Hydrografiske tidsskalaer                      | 123 |
| 8.5 | Opholdstid i Østersøen og forsinkelse i signal | 124 |
| 8.6 | Saltbalance for Østersøen                      | 124 |
| 9   | Referenceliste                                 | 126 |

## BILAG

|         |                                 |
|---------|---------------------------------|
| Bilag A | Udvalgte resultater             |
| A.1     | Cyklisk udvikling af resultater |

# 1 Sammenfatning

## 1.1 Baggrund

Projektet "Undersøgelse af fremskudt færgehavn ved Tårs" udføres for Sund og Bælt af COWI, DHI og Force.

Projektet er ikke en miljøkonsekvensvurdering af den fremskudte færgehavn ved Tårs. Først efter nærværende projekt vil der blive taget stilling til, om der skal foretages en miljøkonsekvensvurdering. Undersøgelsen er derfor ikke bundet af de samme formelle krav, som gælder for en miljøkonsekvensvurdering. Uanset dette er arbejdet inspireret af både Havstrategidirektivet og Vandrammedirektivet

Formålet med projektet er at undersøge udformningen af den fremskudte havn og dens hydrografiske påvirkning lokalt i Langelandsbælt og i Bælthavet, samt den fremskudte havns og andre udvalgte besluttede eller undersøgte større infrastrukturprojekters og klimaændrings<sup>1</sup> samlede påvirkning af hydrografien og økologien i Østersøen.

Denne rapport fokuserer på hydrografien og ændringer af den, både lokalt og i Østersøen.

De udvalgte infrastrukturprojekter, der er inkluderet i denne undersøgelse, er:

- Stormflodssikring af hovedstaden (SH), hvor det væsentligste bidrag er fra Lynetteholm, som er miljøvurderet og vedtaget ved anlægslov. Perimeteren for Lynetteholm planlægges færdig i 2026
- Østlig Ringvej, som er under miljøvurdering
- Als-Fyn forbindelsen, som er forundersøgt
- Fremskudt færgehavn ved Tårs, hvor der gennemføres supplerende hydrografiske analyser
- Kattegatforbindelsen, som har gennemgået en indledende forundersøgelse

Klimascenariet, der undersøges, er SSP2-4.5 i perioden 2081-2100 (benævnes og betragtes som 2100). De overordnet undersøgte klimaændringer er (detaljer for alle undersøgte klimaændringer indeholdes i rapporten):

- En vandstandsstigning på +0.5 m i Skagerrak
- En vandtemperaturstigning på +1.5°C i Skagerrak
- En middel nedbørsstigning på +11% i Østersøområdet
- En middel afstrømningsøgning på +19% til Østersøen, og en sensitivitetstest vedrørende fordampning med en øgning på afstrømning på det halve, dvs. +9%

---

<sup>1</sup> Med klimaændringer menes der generelt menneskeskabte klimaændringer (klimascenarier fra "Intergovernmental Panel on Climate Change").

Fokus i projektet er således at få de hydrografiske og økologiske ændringer, der skyldes infrastrukturprojekter og klimaændringer på Østersøniveau, til at fremstå klart.

Ændringer af de hydrografiske forhold i Østersøen, der skyldes de undersøgte infrastrukturprojekter og klimaændringer, er vist og beskrevet i denne rapport baseret på simuleringer med en 3D numerisk model af hele Østersøen og Skagerrak.

Som en general note bemærkes det, at hydrografien i Østersøen varierer på både kort og lang tidsskala, herunder vandføring, salttransport, og lagdeling. I de sidste omkring 25 år har der for eksempel været færre kraftige indstrømninger (herunder også af de såkaldte store indstrømninger) pga. af mere rolige meteorologiske forhold. Dette giver en langperiodisk variation af alle de parametre der betragtes i dette arbejde, for eksempel vandføring, salttransport og lagdeling (i dette projekt betragtes et repræsentativt år, og dermed ikke disse langperiodiske variationer, se også afsnittene 4.4.2 og 8.4).

Både infrastrukturprojekter og klimaforandringer kan ændre de hydrografiske forhold, som igen kan påvirke de økologiske forhold i Østersøen. I sig selv betragtes ændringerne af de hydrografiske forhold ikke som af afgørende betydning for Østersøens økosystem<sup>2</sup>. Derimod betragtes det som afgørende, hvorledes de hydrografiske forholds ændringer påvirker økosystemet i Østersøen. For eksempel vil en stigning af vandtemperaturen bevirke et lavere iltindhold og et hurtigere forbrug af ilten i havvandet, og altså en påvirkning fra temperaturen mod iltfattigere forhold i bundlagene i Østersøen. Det afgørende for Østersøen er de mere iltfattige forhold og i mindre grad temperaturstigningen i sig selv. Derfor vurderes de hydrografiske ændringer ikke at have afgørende betydning for vurderingen af påvirkningen på Østersøen i sig selv. De hydrografiske ændrings påvirkning af økosystemet i Østersøen beskrives i en parallel rapport, der omhandler økologien i Østersøen (Sund & Bælt, 2025B), hvor også andre miljøpåvirkninger end den hydrografiske ændring inddrages, ikke mindst forøgede næringsstofftilførsler.

## 1.2 Resultater

### 1.2.1 Havnens udformning og kystbeskyttelse

De hydrografiske forhold i Langelandsbælt er beregnet for 2019 med en 3D numerisk model, der dækker Langelandsbælt. Beregningerne er gennemført uden den fremskudte færgehavn ved Tårs (referencescenariet) og med en række forskellige udformninger af havnen. Havnens udformning og dens påvirkning af kysten er vurderet ved at sammenligne disse resultater med og uden havnen.

---

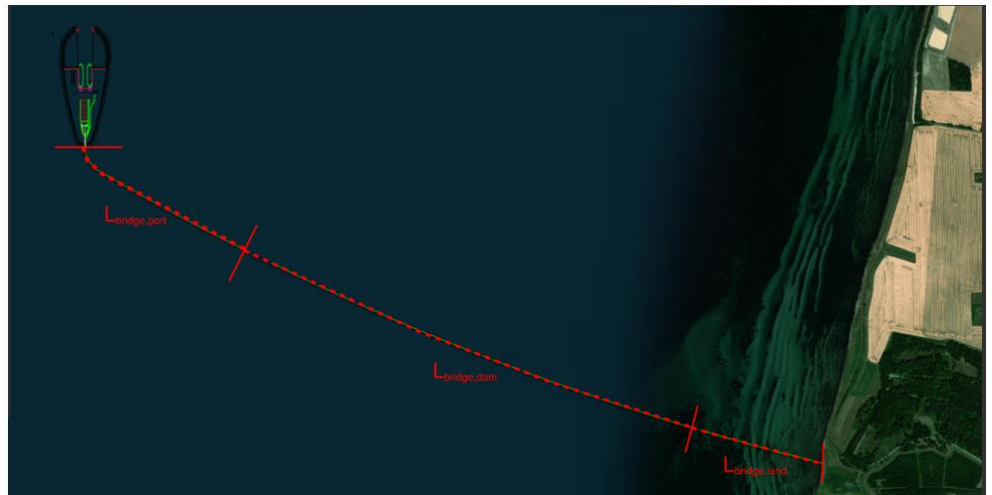
<sup>2</sup> Et økosystem er en samlet betegnelse for et områdes levende organismer og deres indbyrdes samspil og påvirkninger samt deres samspil med den ikke-levende omverden, fx organisk materiale, mineraler, og alle kemiske og fysiske faktorer.



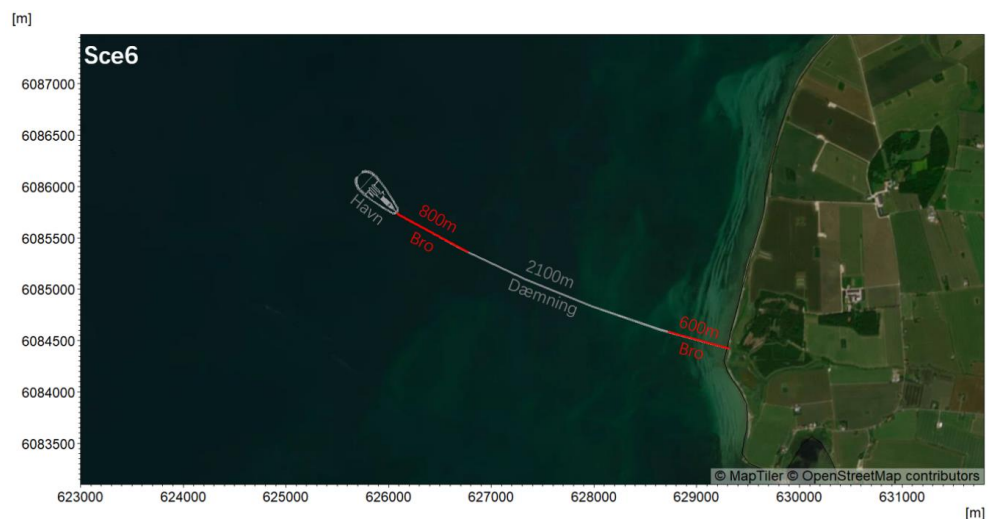
En generel udformning af den fremskudte havn og adgangsvej er vist i Figur 1-1.

Optimering af den fremskudte havns udformning omfatter placering og orientering af den kunstige ø og af adgangsvejen bestående af lavbroer og dæmning (deres placering, længder og geometri). Disse optimeres i relation til strømningsmodstand, som betragtes i denne rapport, men også i forhold til besejlings- og manøvreforhold og bølgeuro i havnen, og under hensyntagen til den fremskudte færgehavns økonomi.

Adskillige udformninger af den fremskudte færgehavn er undersøgt og analyseret. Strømfordelingerne, og ændringerne af disse viser, at havnen påvirker strømfelterne og giver læzoner ved øen og dæmningen og koncentreret strømning gennem broerne og omkring øen, se Figur 1-2 og Figur 1-3 for udformning 6. En drejning af øen mod nord, som vist i Figur 1-1, mindsker påvirkningen fra øen og giver mindre strømmodstand.



Figur 1-1 Generel udformning af den fremskudte havn og adgangsvej.

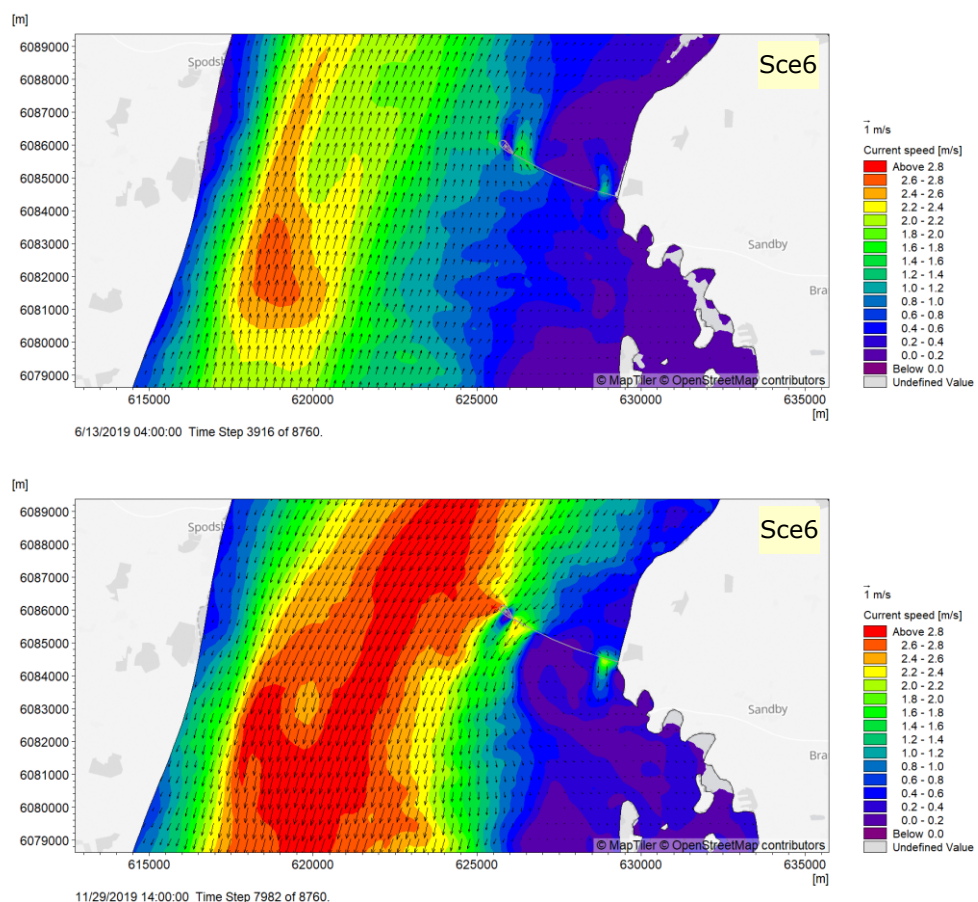


Figur 1-2 Skitse af udformning 6.

For de undersøgte udformninger er vandføringsændringen (brutto) i Langelandsbælt i intervallet fra  $-1,21\%$  til  $-0,19\%$ , og salttransportændringer (brutto) fra  $-0,72\%$  til  $-0,11\%$ . Vandførings- og salttransportændring er begge beregnet som tidligere i Storebælt- og Øresundsprojekterne.

Ændringerne afhænger af de tre dele af havnen (og deres interaktion): den kunstige ø, dæmning og bro. Jo mere øen strømlines og drejes mod nord, desto mindre er påvirkningen fra øen. Tilsvarende, jo kortere dæmningen og jo længere broen er, desto mindre er påvirkningen fra forbindelsen til øen.

I de efterfølgende analyser anvendes den udformning af den fremskudte havn, der giver den største (numeriske) vandføringsændring af de optimerede udformninger, som forventes at blive undersøgt i det videre arbejde. Derfor er analyserne udført med udformning 6. Resultaterne for denne udformning kan efterfølgende benyttes til interpolation for bestemmelse af påvirkning fra andre udformninger.



Figur 1-3 Strømfordeling omkring udformning 6 ved maksimal nordgående (øverst) og maksimal sydgående strøm (nederst).

Aflejring og erosion langs kysten, som følge af de ændrede hydrodynamiske forhold, er vurderet, for eksempel læsideerosion, og om der er behov for kystbeskyttelse.

Baseret på en analyse af ændringer i strøm, bølger og bundfriktion for udformning 6 vurderes det, at der kan komme:

- aflejring i læzonerne ved ø og dæmning;
- erosion omkring øen uden for læzonerne og ved broernes åbninger; og
- meget begrænset aflejring langs kysten - undtagen ved broens åbning ved kysten.

Således forventes der kun begrænsede ændringer af aflejnings- og erosionsforholdene langs kysten, og da der ikke forventes erosion (undtagen ved broens åbning ved kysten) er der ikke behov for kystbeskyttelse.

Omkring øen og i broåbningerne skal der tages specifikt hensyn til erosion i designet af øen, enderne af dæmningen og lavbroerne. Erosionsbeskyttelse skal inkluderes i projekteringen af konstruktionerne.

### 1.2.2 Nakskov Fjord og oversvømmelse

De hydrografiske forhold i Bælthavet er beregnet for 2019 med en 3D numerisk model, der dækker Bælthavet. Beregningerne er gennemført uden den fremskudte færgehavn ved Tårs (referencescenariet) og med udformning 6 for den fremskudte færgehavn, se Figur 1-2.

En vandføringsændring (brutto), som defineret for de andre forbindelser i Bælthavet og Øresund, bestemmes for den fremskudte færgehavn ved Tårs, og der ved den potentielle påvirkning af lokale strømforhold og vandudveksling og transport mellem vandområderne. Dette giver mulighed for en indledende undersøgelse af påvirkningerne i lokalområdet, herunder Natura 2000-området "Nakskov Fjord og Indrefjord".

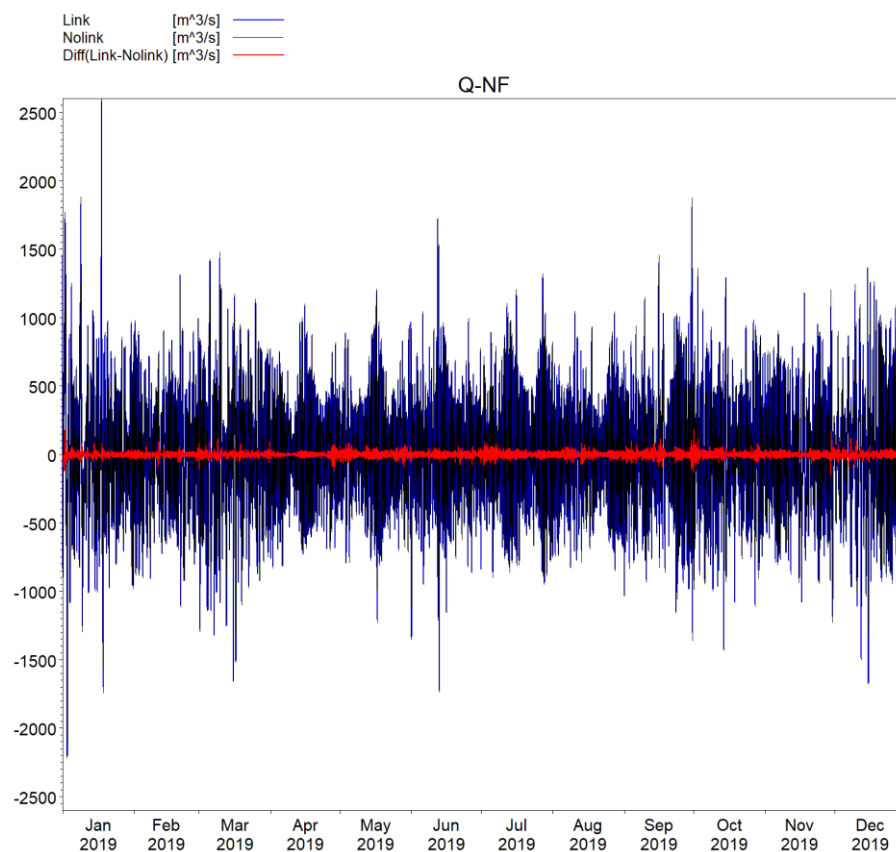
Påvirkningen fra den fremskudte havn på Nakskov Fjord vurderes på baggrund af udveksling til fjorden, og hvorledes den ændres. I Figur 1-4 vises udvekslingen med og uden havn og ændringen i udvekslingen. Forskellen mellem udveksling med og uden havn er marginal<sup>3</sup>. Dette betyder, at havnen kun har en marginal påvirkning af fjorden.

Vandførings- og salttransportændringen (begge brutto) til Nakskov Fjord er ligeledes marginal:  $-0,31\%$  for vandføring og  $-0,24\%$  for salttransport, hvilket kun forventes at give anledning til marginale ændringer i Nakskov Fjord.

De betingede ændringer af risikoen for oversvømmelse af lavtliggende områder i nærheden af den fremskudte havn er bestemt ud fra beregninger af de hydrografiske forhold i 2019, som indeholder en kraftig storm. Højvande beregnes med og uden den fremskudte havn. Forskellene med og uden den fremskudte havn sammenlignes og analyseres, og betydningen af den fremskudte havn for en lokal oversvømmelse vurderes.

---

<sup>3</sup> Ordet "betydelig" bruges generelt om en ændring, der er så stor, at den vil kunne måles og dokumenteres i fremtidige monitoreringsprogrammer, og ordet "marginal" generelt om en ændring, der er så lille, at den ikke vil kunne måles og dokumenteres i fremtidige monitoreringsprogrammer.

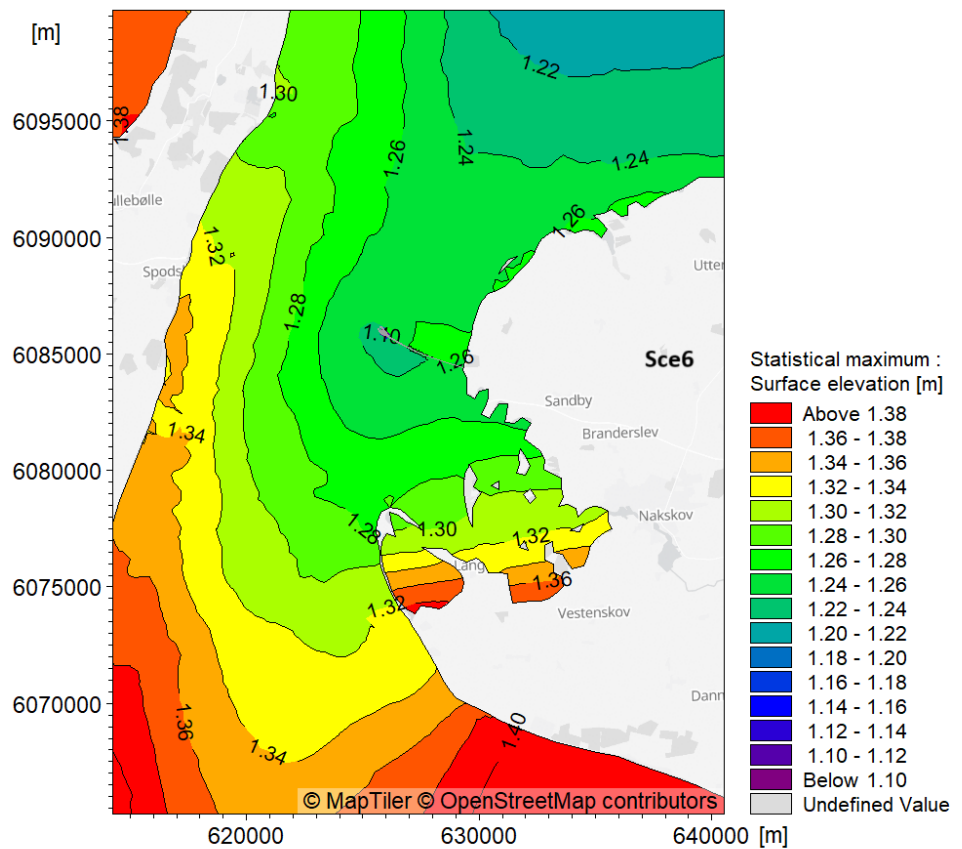
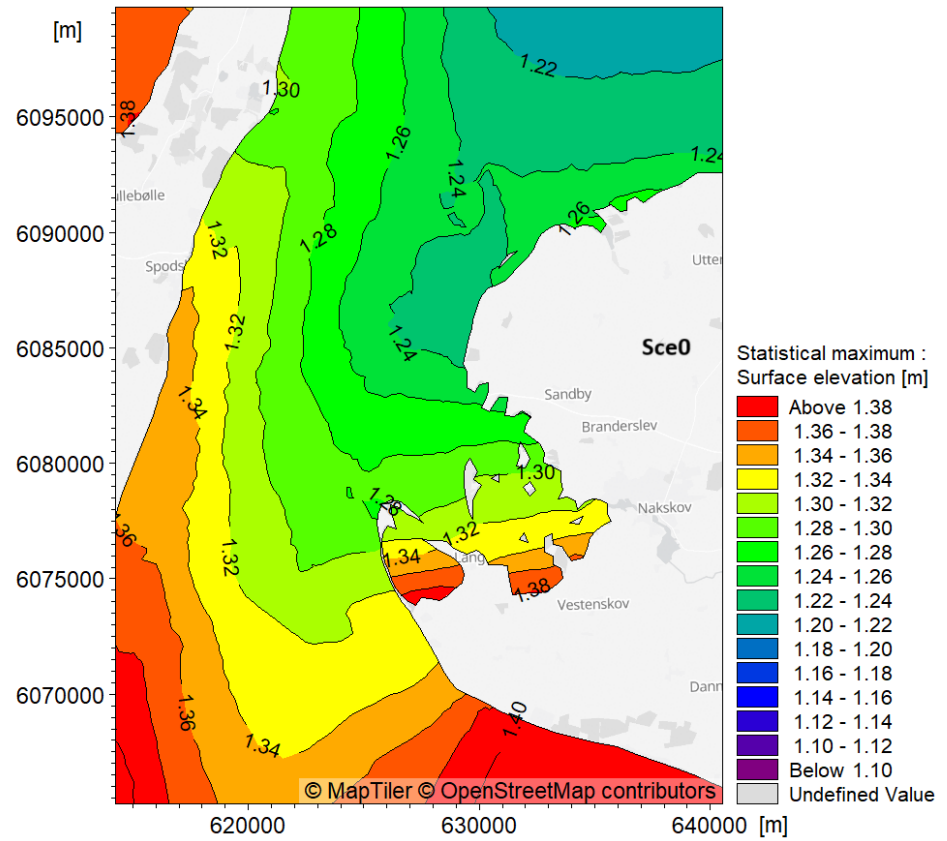


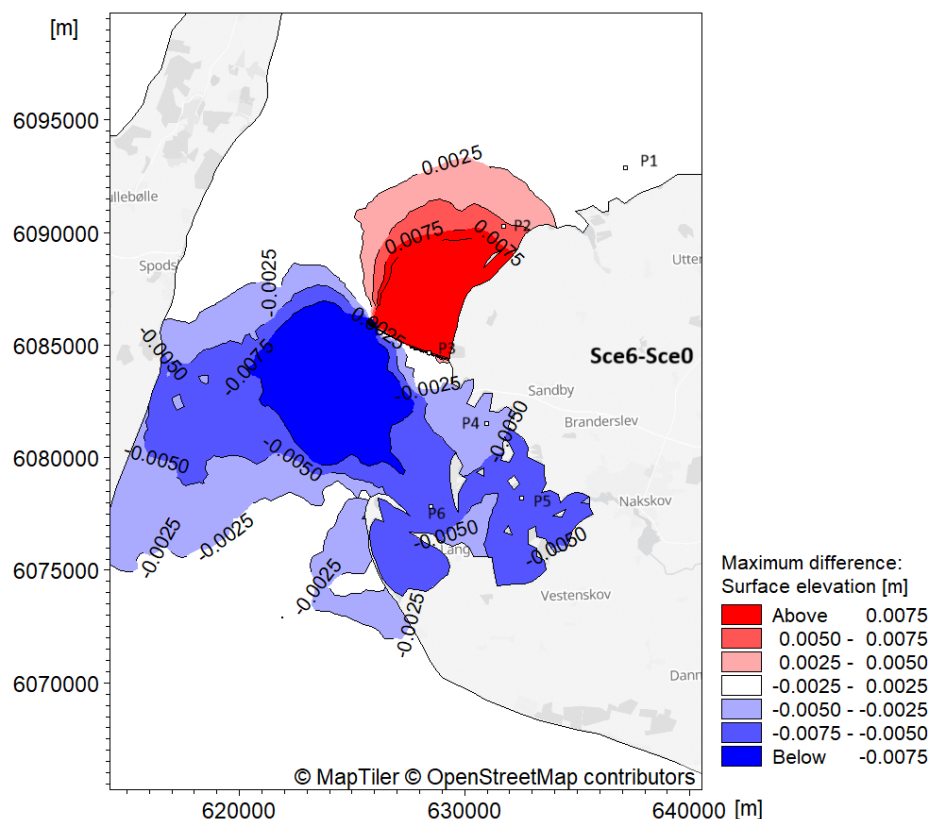
Figur 1-4 Tidsserie af vandføring til Nakskov Fjord med og uden havn og ændringen i vandføringen (gennem munden til fjorden, positiv ind i fjorden).

Der er betydelige udsving i vandstanden i lokalområdet med variationer, der spænder fra ca.  $-1,0$  m DVR90 til  $+1,5$  m DVR90, se Figur 1-5.

I Figur 1-5 ses det, at der nogle steder langs kysten nord for en mulig anlagt fremskudt færgehavn ved Tårs kan være en lokal øgning af vandstanden pga. havnen på  $+1$  cm eller mindre i 2019.

Ud fra dette resultat kan det konkluderes, at havnen kun har en marginal langsigtet effekt på vandstanden og dermed risikoen for oversvømmelse i de lavtliggende områder i nærheden af havnen.





Figur 1-5 Kort med maksimal vandstand med havn (øverst) og uden havn (i midten) og forskellen imellem dem (nederst). Koter er angivet med reference til DVR90.

### 1.2.3 Hydrografiske ændringer i Østersøen

Den regionale 3D numeriske model af Østersøen og Skagerrak anvendes til at beskrive den kumulative effekt på Østersøen fra den fremskudte færgehavn ved Tårs og andre udvalgte besluttede eller undersøgte større infrastrukturprojekter, samt klimaændringerne i det valgte klimascenarie.

Påvirkningen fra klimaændringer på hydrografien er betydelig - de ændrede hydrografiske forhold er af en størrelse, der vil kunne måles og dokumenteres i fremtidige monitoreringsprogrammer. En væsentlig hydrografisk ændring er ikke mindst vandtemperaturstigningen.

En sensitivitetstest med den halve øgning af afstrømningen fra klimaændringer viser, at de beregnede saltholdighedsprofiler i år 2100 er meget lig dem, der er beregnet for 2019. Dvs. at en vandstandsstigning på +0,5 m og en afstrømningssøgning på +10% har modsatrettet effekt på saltholdighedsprofilerne og er af samme størrelsesorden. Påføres begge samtidig fås omtrentligt de oprindelige profiler i 2019. Således kan der forekomme klimaændringer med kombinationer af vandstandsstigning og afstrømning, som kun giver en begrænset ændring af saltholdighedsforholdene, og også kombinationer, hvor saltholdigheden stiger. Temperaturen vil dog stadig ændres betydeligt.

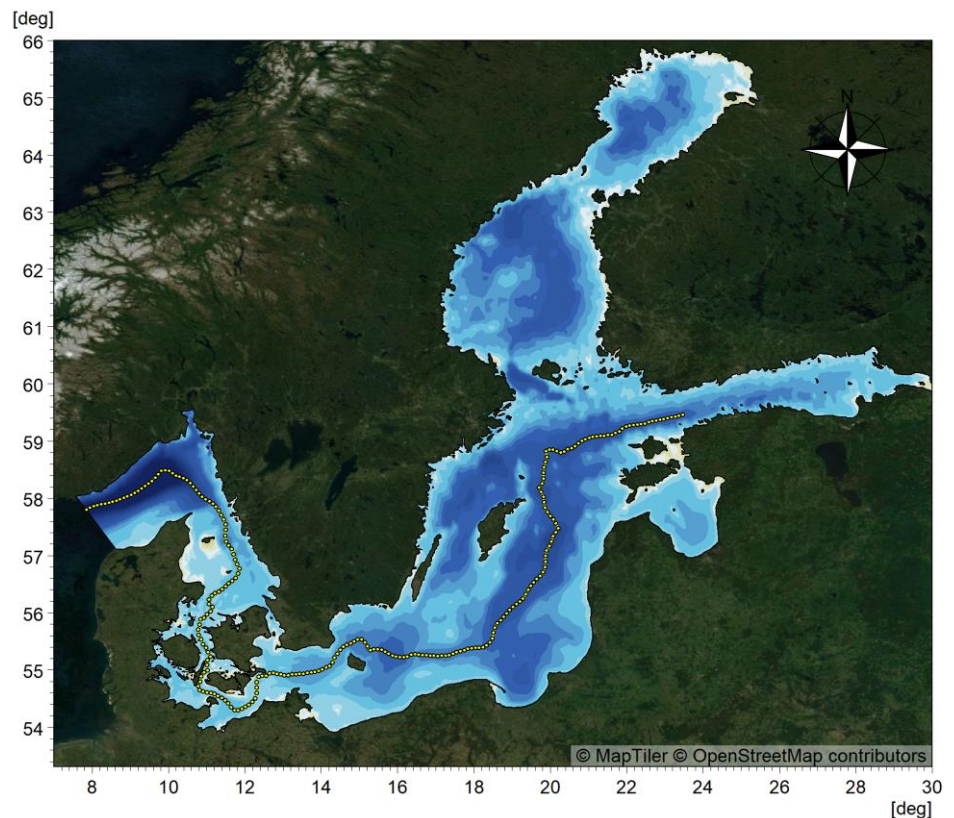


Påvirkningen af hydrografien fra forbindelserne er marginal - de ændrede hydrografiske forhold er af en størrelse, der ikke vil kunne måles og dokumenteres i fremtidige monitoreringsprogrammer.

Det findes, at påvirkningen fra forbindelserne på de hydrografiske forhold (saltholdighed, temperatur og udveksling), både med og uden klimaændringer, er marginale, og med de samme fordelinger af ændringerne (stigninger og fald i saltholdigheden ses i de samme områder og dybder). Påvirkningen fra forbindelserne på de hydrografiske forhold er lidt større i scenariet med klimaændringer end i scenariet uden klimaændringer, men stadig marginale for begge scenarier. Dette illustrerer, at påvirkningerne fra forbindelserne er robuste i den forstand, at de er nær de samme med og uden klimaændringer.

Dette er dokumenteret i det følgende med nogle udvalgte resultater.

Fordeling af saltholdighed og temperatur er vist langs transektet markeret på Figur 1-6. Transektet er fra Skagerrak og ind i Østersøen langs de dybere dele.



Figur 1-6 Kort med batymetri og betragtet transekt.

En sammenligning af saltholdighedsfordelingerne i 2019 med og uden forbindelser (se fordeling uden forbindelser i Figur 1-7 og ændringerne i Figur 1-8) og i 2100 med og uden forbindelser (se fordeling uden forbindelser i Figur 1-9 og ændringerne i Figur 1-10) viser kun marginale forskelle i disse fordelinger forårsaget af forbindelserne. Klimaændringerne bevirker generelt, at saltholdigheden i Østersøen falder, undtagen i bundlaget i Kattegat, hvor den stiger.

Fordelingerne af saltholdigheden langs transektet er som forventet fra målinger og litteraturen. Gradienterne i overfladesaltholdighederne er mindre i den indre Østersø, end de er i de Danske Stræder og Kattegat. Skagerrak-fronten ses i overgangen mellem Kattegat og Skagerrak, en saltvandskile, der trænger ind i Kattegat og de Danske Stræder langs bunden, og en overstrømning af Darss tærsklen, som fortsætter ind i de nedre lag i indre Østersø.

Ændringen i saltholdigheden pga. forbindelserne er vist i Figur 1-8 og Figur 1-10, som begge viser en stigning i Kattegat og Bælthavet (mere mod bunden), marginale sporadiske ændringer i Arkona Bassinet, en dominerende stigning i bundlaget i Bornholmer Bassinet, og en stigning lige under haloklinen i Gotlands Bassinet (pga. stigningen i bundlaget i Kattegat). Der forekommer øvrige sporadiske ændringer, som ikke er beskrevet i den korte oversigt af de væsentlige tendenser. Ændringerne er lidt større i år 2100 end i år 2019.

Stigningen i saltholdighed i bundlaget i Kattegat i 2019 skyldes en øget opblanding fra nedre til øvre lag forårsaget af forbindelserne, som bevirker en større turbulensproduktion i øvre lag. Den øgede opblanding giver en tilsvarende øget indstrømning i nedre lag fra Skagerrak, og dermed stiger saltholdigheden i nedre lag. Dette medfører, at saltholdigheden af det indstrømmende saltvand i bundlagene i Østersøen stiger lidt, hvilket ses at resultere i en øget saltholdighed under haloklinen i Gotlands Bassinet. Dette er et resultat, som ikke har været betragtet i tidligere undersøgelser, og som kun kan belyses, idet der benyttes en model af hele Østersøsystemet. I 2100 øges saltholdigheden i bundlaget i Kattegat yderligere pga. af mindre turbulensproduktion i nedre lag (dokumenteret vha. modellens resultater), som mindsker nedblandingen fra øvre til nedre lag. I Sund & Bælt (2025A) er de øgede saliniteter i nedre lag ( $\sim 0,2$  g/kg fra forbindelser og  $\sim 0,2$  g/kg fra klimaændringer) også beregnet med den konceptuelle model.

I Kattegat ses et meget lokalt fald i saltholdigheden under haloklinen. Dette skyldes Kattegatforbindelsen, hvor der indgår brøløsninger både øst og vest for Samsø, som forårsager en meget lokal nedblanding af vand fra overfladelaget pga. Kattegatforbindelsens turbulensproduktion.

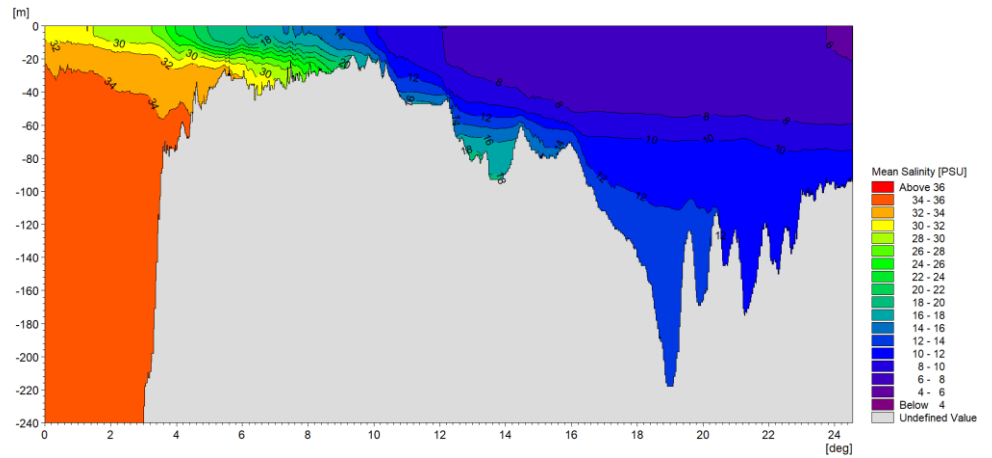
Ændringen i saltholdigheden pga. klimaændringer er vist i Figur 1-11, som viser et fald i saltholdigheden i indre Østersø og i øvre lag i Bælthavet og Kattegat og en stigning i bundlaget i Kattegat. Faldene skyldes øget nettonedbør og afstrømning. Stigningen i bundlaget i Kattegat skyldes mindre nedblanding<sup>4</sup> fra øvre til nedre lag, hvilket øger saliniteten i nedre lag.

Ændringerne forårsaget af henholdsvis forbindelserne og klimaændringer er af forskellig størrelsesorden, hvor ændringer fra klimaændringer er betydelig større end for forbindelserne. For den indre Østersø er ændringerne fra forbindelserne små. I Bælthavet giver forbindelserne anledning til en lille øgning af saltholdigheden, mens påvirkningerne fra klimaændringerne fører til en tydelig reduceret saltholdighed.

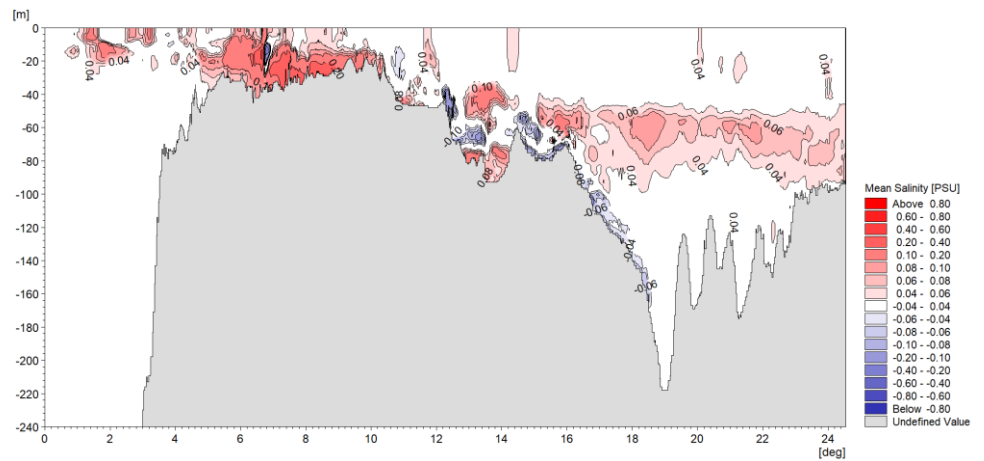
---

<sup>4</sup> Ordene "opblanding" og "nedblanding" er benyttet for kombineret medrivning og vertikal transport over et lag.

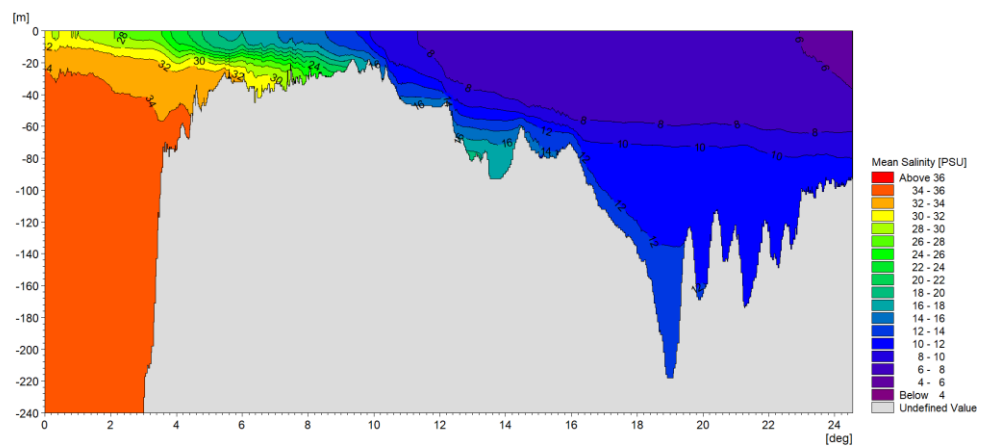




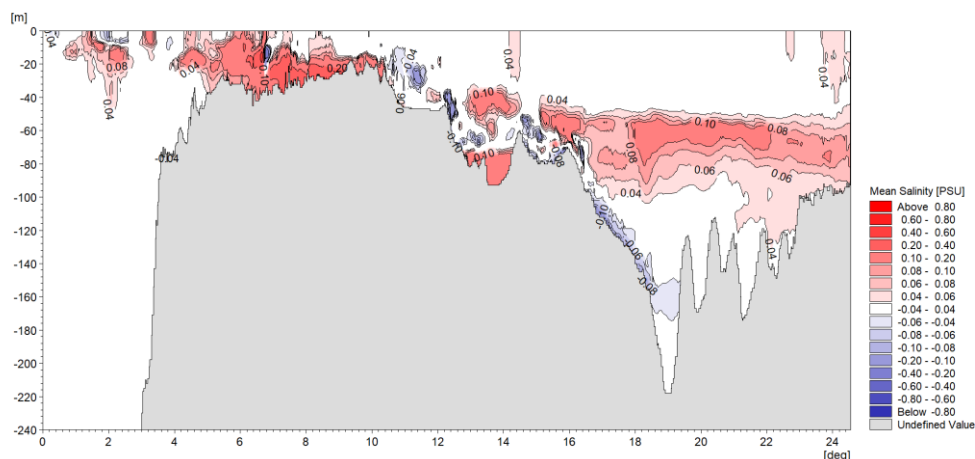
Figur 1-7 Middel saltholdighed langs transekt i 2019 uden forbindelser.



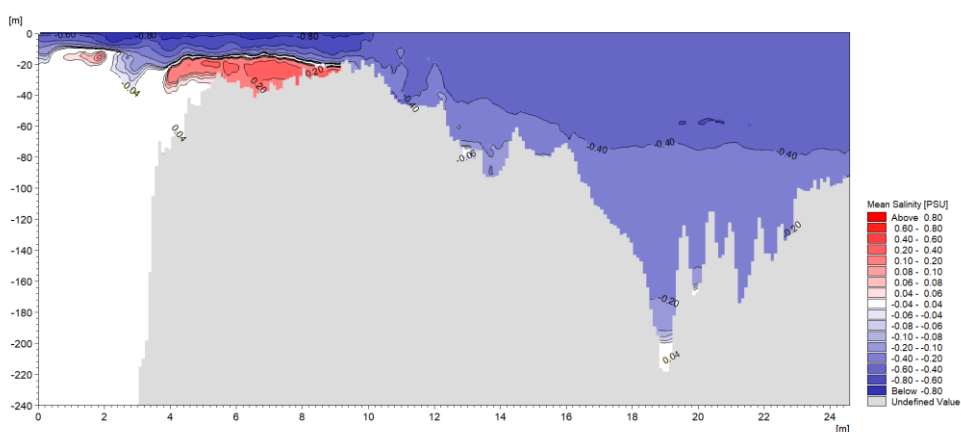
Figur 1-8 Ændring i middel saltholdighed langs transekt i 2019 med og uden forbindelser (positive værdier angiver højere saltholdighed med forbindelser).



Figur 1-9 Middel saltholdighed langs transekt i 2100 uden forbindelser.



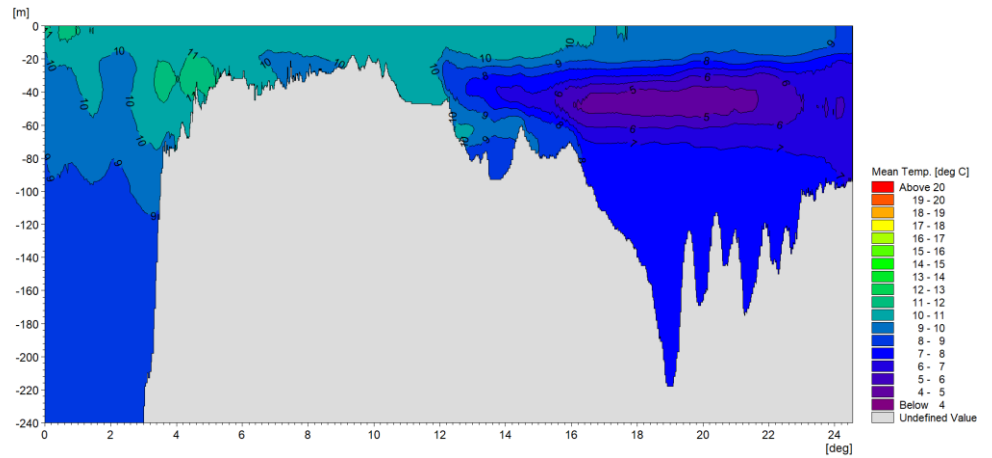
Figur 1-10 Ændring i middel saltholdighed langs transekt i 2100 med og uden forbindelser (positive værdier angiver højere saltholdighed med forbindelser).



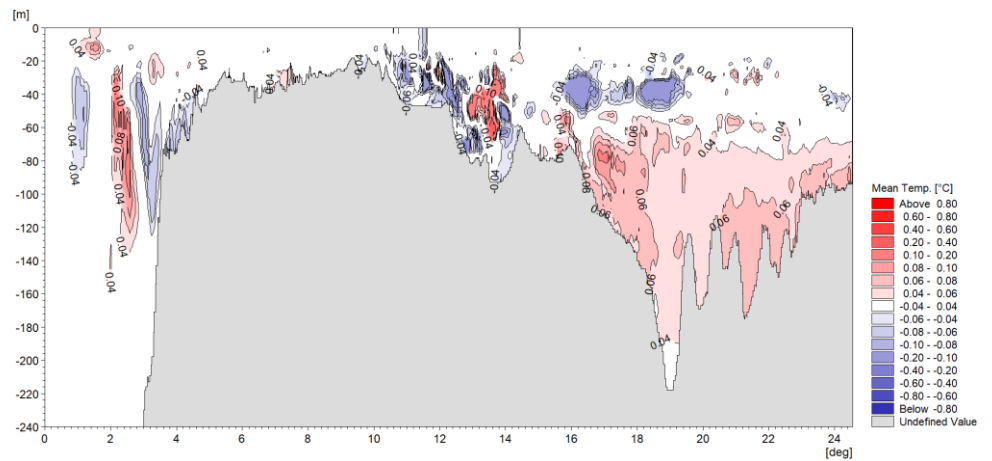
Figur 1-11 Ændring i middel saltholdighed langs transekt i 2019 uden forbindelser og 2100 uden forbindelser (positive værdier angiver højere saltholdighed med klimaændringer).

En sammenligning af temperaturfordelingerne i 2019 med og uden forbindelser (se fordeling uden forbindelser i Figur 1-12 og ændringer i Figur 1-13) og i 2100 med og uden forbindelser (se fordeling uden forbindelser i Figur 1-14 og ændringer i Figur 1-15) viser kun marginale forskelle i disse fordelinger forårsaget af forbindelserne. Klimaændringerne får temperaturen til at stige.

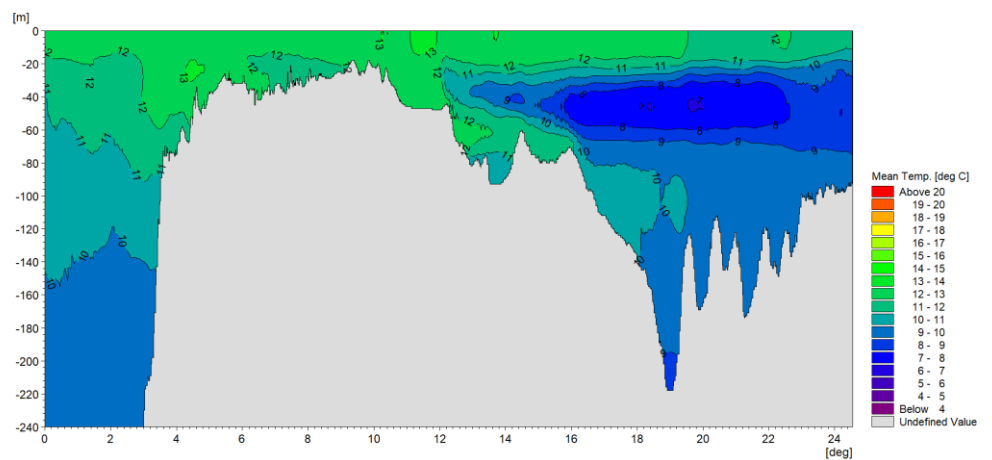
Ændringerne i temperaturen pga. forbindelserne, som ses i Figur 1-13 og Figur 1-15, viser begge en uændret temperatur i Kattegat og Bælthavet, et marginalt fald i nedre lag i Arkona Bassinet, svagt stigende temperatur under haloklinen og svagt faldende temperatur nærmere bunden i Bornholmer Bassinet, og en marginal stigning i det nedre lag i Gotlands Bassinet. Der er øvrige sporadiske ændringer, som ikke er beskrevet i den korte oversigt af de væsentlige tendenser. Den mindre stigning i hele bundlaget i Gotland Bassinet ses som et udtryk for, at betydningen af den regulære indstrømning til den indre Østersø stiger relativt, mens betydningen af den irregulære og sjældnere indstrømning falder relativt. Ændringerne er lidt større i år 2100 end i år 2019.



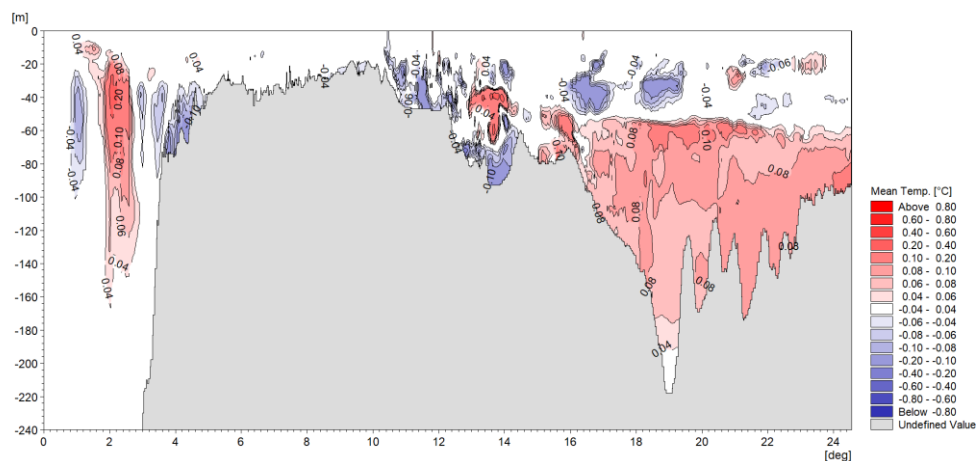
Figur 1-12 Middel temperatur langs transekt i 2019 uden forbindelser.



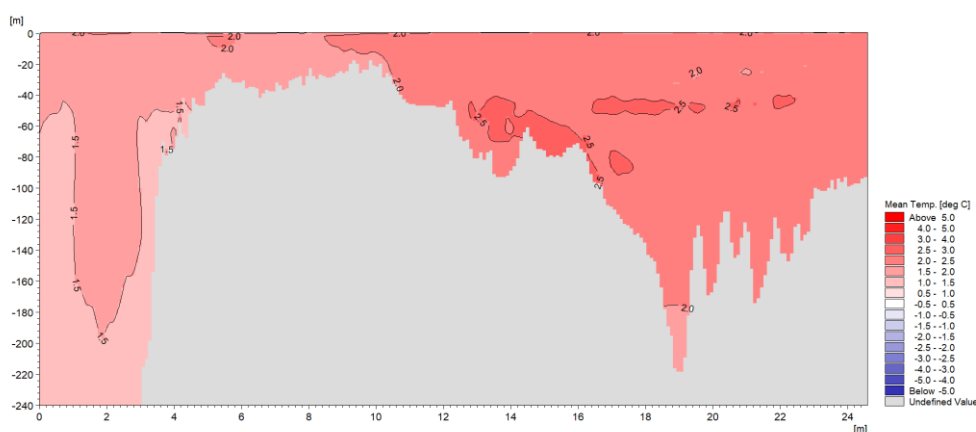
Figur 1-13 Ændring i middel temperatur langs transekt i 2019 med og uden forbindelser (positive værdier angiver højere vandtemperaturer med forbindelser).



Figur 1-14 Middel temperatur langs transekt i 2100 uden forbindelser.



Figur 1-15 Ændring i middel temperatur langs transekt i 2100 med og uden forbindelser (positive værdier angiver højere vandtemperaturer med forbindelser).



Figur 1-16 Ændring i middel temperatur langs transekt i 2019 uden forbindelser og 2100 uden forbindelser (positive værdier angiver højere temperaturer med klimaændringer).

Ændringen i temperaturen pga. klimaændringer er vist i Figur 1-16, som viser en stigende temperatur i hele transektet og stigende ændringer ind i Østersøen. Denne stigning vil påvirke økosystemet i den indre Østersø.

Ændringerne i temperaturen forårsaget af henholdsvis forbindelserne og klimaændringer er meget forskellige. Der er en betydningsfuld temperaturstigning for klimaændringerne, og kun marginale temperaturændringer fra forbindelserne.

Vandførings- og salttransportændring (begge brutto) er beregnet med de samme formler, som er benyttet for Storebæltsforbindelsen og Øresundsforbindelsen.

De beregnede vandføringsændringer er vist i Tabel 1-1 og de beregnede salttransportændringer vist i Tabel 1-2.

I 2019 og 2100 med og uden forbindelser er der en positiv vandføringsændring (brutto) i Lillebælt og Øresund (over Drogden tærsklen), se Tabel 1-1. Dette er pga. omfordeling fra Storebælt til Øresund og Lillebælt. Således er omfordeling mellem stræderne af betydning, som kun identificeres, hvis en integreret og

holistisk metode benyttes, som i dette projekt, hvor flere forbindelser og hele Østersøen betragtes samlet.

Det ses også i 2019 og 2100 med og uden forbindelser, at vandføringsændringerne bliver mindre fra Kattegat til Arkona Bassinet gennem Storebælt, dvs. fra Storebælt og Tårs-Spødsbjerg, til Femern Bælt og Darss tærsklen, til Arkona og samlet Darss- og Drogden tærsklerne (og således er det lokale ændringsmål svært at sammenligne med ændringen i andre tværsnit). Dette skyldes aftagende tidevand, aftagende kompleksitet af densitetsstrømmene, og at omfordelingen tages i betragtning i Arkona Bassinet og samlet i Darss- og Drogden tærsklerne.

*Tabel 1-1 Vandføringsændring (brutto) i de Danske Stræder (se de syv tværsnit i Figur 7-53).*

| Scenarie                                | Tværsnit        | $\Delta Q$<br>( $10^{10} \text{ m}^3$ ) | $Q_{\text{ref}}$<br>( $10^{12} \text{ m}^3$ ) | Ændring<br>(%) |
|-----------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------|
| 2019 uden forb.<br>&<br>2019 med forb   | Lillebælt       | +0,65                                   | 0,36                                          | +1,80          |
|                                         | Drogden T.      | +0,28                                   | 1,19                                          | +0,24          |
|                                         | Storebælt       | -1,83                                   | 2,51                                          | -0,73          |
|                                         | Tårs-Spødsbjerg | -1,87                                   | 2,40                                          | -0,78          |
|                                         | Femern Bælt     | -0,97                                   | 2,40                                          | -0,40          |
|                                         | Darss tærsklen  | -0,95                                   | 2,49                                          | -0,38          |
|                                         | Arkona Basin    | -0,54                                   | 3,69                                          | -0,15          |
|                                         | Drogden+Darss   | -0,63                                   | 3,48                                          | -0,18          |
| Scenarie                                | Tværsnit        | $\Delta Q$<br>( $10^{10} \text{ m}^3$ ) | $Q_{\text{ref}}$<br>( $10^{12} \text{ m}^3$ ) | Ændring<br>(%) |
| 2100 uden forb.<br>&<br>2100 med forb   | Lillebælt       | +0,62                                   | 0,36                                          | +1,71          |
|                                         | Drogden T.      | +0,38                                   | 1,19                                          | +0,32          |
|                                         | Storebælt       | -1,97                                   | 2,51                                          | -0,78          |
|                                         | Tårs-Spødsbjerg | -1,96                                   | 2,40                                          | -0,82          |
|                                         | Femern Bælt     | -1,09                                   | 2,40                                          | -0,45          |
|                                         | Darss tærsklen  | -1,01                                   | 2,49                                          | -0,41          |
|                                         | Arkona Basin    | -0,62                                   | 3,69                                          | -0,17          |
|                                         | Drogden+Darss   | -0,60                                   | 3,48                                          | -0,17          |
| Scenarie                                | Tværsnit        | $\Delta Q$<br>( $10^{10} \text{ m}^3$ ) | $Q_{\text{ref}}$<br>( $10^{12} \text{ m}^3$ ) | Ændring<br>(%) |
| 2019 uden forb.<br>&<br>2100 uden forb. | Lillebælt       | +1,46                                   | 0,36                                          | +4,03          |
|                                         | Drogden T.      | +7,39                                   | 1,19                                          | +6,23          |
|                                         | Storebælt       | +11,74                                  | 2,51                                          | +4,68          |
|                                         | Tårs-Spødsbjerg | +9,67                                   | 2,40                                          | +4,03          |
|                                         | Femern Bælt     | +10,32                                  | 2,40                                          | +4,31          |
|                                         | Darss tærsklen  | +10,65                                  | 2,49                                          | +4,28          |
|                                         | Arkona Basin    | +16,42                                  | 3,69                                          | +4,45          |
|                                         | Drogden+Darss   | +17,31                                  | 3,48                                          | +4,98          |
| Scenarie                                | Tværsnit        | $\Delta Q$<br>( $10^{10} \text{ m}^3$ ) | $Q_{\text{ref}}$<br>( $10^{12} \text{ m}^3$ ) | Ændring<br>(%) |
| 2019 uden forb.<br>&<br>2100 med forb.  | Lillebælt       | +2,08                                   | 0,36                                          | +5,74          |
|                                         | Drogden T.      | +7,78                                   | 1,19                                          | +6,56          |
|                                         | Storebælt       | +9,77                                   | 2,51                                          | +3,89          |
|                                         | Tårs-Spødsbjerg | +7,71                                   | 2,40                                          | +3,21          |
|                                         | Femern Bælt     | +9,23                                   | 2,40                                          | +3,85          |
|                                         | Darss tærsklen  | +9,64                                   | 2,49                                          | +3,87          |
|                                         | Arkona Basin    | +1,58                                   | 3,69                                          | +4,28          |
|                                         | Drogden+Darss   | +1,67                                   | 3,48                                          | +4,81          |

Det væsentligste mål for ændringen fås samlet ved Darss- og Drogden Tærsklerne, som udtrykker forbindelsernes potentielle påvirkning af den indre Østersø, som er det, der har den største interesse. Det viser, i hvilket omfang forbindelserne potentielt kan påvirke økosystemet i den indre Østersø.

Ændringen i vandføringen (brutto) for forbindelserne er således beregnet til  $-0,18\%$  og for klimaændringer til  $+5,0\%$ . Ændringen på  $-0,18\%$  fra forbindelserne er inden for det forventede interval baseret på analytiske beregninger (se Tabel 3-1) og er som forventet mindre end den beregnede ændring med lokalmodellen af Bælthavet (se afsnit 6.2.2). Det bemærkes, at allerede i Jakobsen et al. (1996) blev ændringen fra klimaændringer ved simple analyser vurderet til at være  $+6,0\%$  (den vurdering havde ikke den samme pålidelighed, som er opnået i dette arbejde).

Sammenlignes vandføringsændringerne (brutto) i Tabel 1-1 med og uden klimaændringer findes det, at påvirkningen fra klimaændringer er langt større og med modsat fortegn end påvirkningen fra forbindelserne. Klimaændringerne åbner de Danske Stræder pga. vandstandsstigningen, hvilket fører til større vandføringer.

Tabel 1-2 Salttransportændring (brutto) i de Danske Stræder (se de syv tværsnit i Figur 7-53).

| Scenarie                                | Tværsnit        | $\Delta Q_s$<br>( $10^{10}$ kg) | $Q_{sref}$<br>( $10^{12}$ kg) | Ændring<br>(%) |
|-----------------------------------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------|
| 2019 uden forb.<br>&<br>2019 med forb.  | Lillebælt       | +20,60                          | 7,67                          | +2,69          |
|                                         | Drogden T.      | +5,33                           | 14,80                         | +0,36          |
|                                         | Storebælt       | -11,02                          | 47,51                         | -0,23          |
|                                         | Tårs-Spødsbjerg | -13,29                          | 42,76                         | -0,31          |
|                                         | Femern Bælt     | -1,05                           | 38,68                         | -0,03          |
|                                         | Darss tærsklen  | -0,75                           | 34,25                         | -0,02          |
|                                         | Arkona Basin    | +3,79                           | 38,26                         | +0,10          |
|                                         | Drogden+Darss   | +4,55                           | 46,49                         | +0,10          |
| Scenarie                                | Tværsnit        | $\Delta Q_s$<br>( $10^{10}$ kg) | $Q_{sref}$<br>( $10^{12}$ kg) | Ændring<br>(%) |
| 2100 uden forb.<br>&<br>2100 med forb.  | Lillebælt       | +18,82                          | 7,67                          | +2,39          |
|                                         | Drogden T.      | +7,66                           | 14,80                         | +0,52          |
|                                         | Storebælt       | -13,74                          | 47,51                         | -0,29          |
|                                         | Tårs-Spødsbjerg | -15,26                          | 42,76                         | -0,36          |
|                                         | Femern Bælt     | -5,31                           | 38,68                         | -0,14          |
|                                         | Darss tærsklen  | -9,35                           | 34,25                         | -0,27          |
|                                         | Arkona Basin    | -2,01                           | 38,26                         | -0,05          |
|                                         | Drogden+Darss   | -2,47                           | 46,49                         | -0,05          |
| Scenarie                                | Tværsnit        | $\Delta Q_s$<br>( $10^{10}$ kg) | $Q_{sref}$<br>( $10^{12}$ kg) | Ændring<br>(%) |
| 2019 uden forb.<br>&<br>2100 uden forb. | Lillebælt       | +16,98                          | 7,67                          | +2,22          |
|                                         | Drogden T.      | +14,45                          | 14,45                         | +0,98          |
|                                         | Storebælt       | +55,41                          | 47,51                         | +1,17          |
|                                         | Tårs-Spødsbjerg | +16,59                          | 42,76                         | +0,39          |
|                                         | Femern Bælt     | -1,93                           | 38,68                         | -0,05          |
|                                         | Darss tærsklen  | -20,69                          | 34,25                         | -0,60          |
|                                         | Arkona Basin    | -16,14                          | 38,26                         | -0,42          |
|                                         | Drogden+Darss   | -0,43                           | 46,49                         | -0,01          |
| Scenarie                                | Tværsnit        | $\Delta Q_s$<br>( $10^{10}$ kg) | $Q_{sref}$<br>( $10^{12}$ kg) | Ændring<br>(%) |
| 2019 uden forb.<br>&<br>2100 med forb.  | Lillebælt       | +35,30                          | 7,66                          | +4,61          |
|                                         | Drogden T.      | +22,12                          | 14,79                         | +1,50          |
|                                         | Storebælt       | +41,67                          | 47,51                         | +0,88          |
|                                         | Tårs-Spødsbjerg | +1,33                           | 42,76                         | +0,03          |
|                                         | Femern Bælt     | -7,24                           | 38,68                         | -0,19          |
|                                         | Darss tærsklen  | -30,05                          | 34,25                         | -0,88          |
|                                         | Arkona Basin    | -18,14                          | 38,25                         | -0,47          |
|                                         | Drogden+Darss   | -2,90                           | 46,48                         | -0,06          |

Salttransportændringerne (brutto) i Tabel 1-2 viser også en omfordeling fra Storebælt til Øresund og Lillebælt. Ændringerne er positive i Lillebælt og Øresund

(over Drogden tærsklen). Ligeledes ses der i 2019 og 2100 med og uden forbindelser (som for vandføringsændringen) en tendens til en aftagende salttransportændring fra Kattegat til Arkona Bassinet gennem Storebælt.

Påvirkningen fra klimaændringer er ikke tilsvarende større end påvirkningerne fra forbindelserne, som fundet for vandføringsændringen. Dette skyldes, at nettonedbør og afstrømning ikke bringer salt til Østersøen, og der skal også med klimaændringer være en saltbalance for den indre Østersø (Knudsens relationer).

### 1.3 Diskussion

I beregninger og analyser er der benyttet:

- fem infrastrukturprojekter (forbindelser); for hvert projekt er valgt en udformning, der giver den største modstand af de optimerede udformninger, som forventes at blive undersøgt i det videre arbejde; og
- et median klimascenarie med dette scenarios medianændringer.

Alle fem infrastrukturprojekter er blevet eller aktuelt bliver undersøgt, men der er ikke truffet beslutning om gennemførelse. Hvis der arbejdes videre med et eller flere af de betragtede infrastrukturprojekter, kan strømningsmodstanden ændres i forhold til dem anvendt i de foreliggende analyser.

Ligeledes vil de betragtede klimaændringer i de foreliggende analyser sandsynligvis afvige fra dem, der udvikles i fremtiden.

Uanset disse mulige afvigelser for infrastrukturprojekter og klimaændringer, der er benyttet i de foreliggende analyser, forventes den overordnede konklusion fra dette arbejde ikke at ændres:

- En optimering af infrastrukturprojekterne kan, og vil sandsynligvis, mindske deres modstand på gennemstrømningerne.
- Der er allerede tydelige tegn på klimaændringer.

Og således forbliver den overordnede konklusion:

- Påvirkningen fra klimaændringer af de hydrografiske forhold er betydelig og vil kunne måles.
- Påvirkningen fra forbindelserne af de hydrografiske forhold er marginal og vil ikke kunne måles.
- Påvirkningen fra klimaændringer af de hydrografiske forhold er overordnet betydeligt større end påvirkningen fra forbindelserne.
- Påvirkningen fra forbindelserne af de hydrografiske forhold er nær det samme med og uden klimaændringer.

De hydrografiske ændringer påvirker økosystemet i Østersøen, se Sund & Bælt (2025B):



- De betydeligt ændrede hydrografiske forhold forårsaget af klimaændringerne og øget næringssalttilførsel giver en betydelig afledt påvirkning af økologien i Østersøen.
- De marginalt ændrede hydrografiske forhold forårsaget af forbindelserne giver tilsvarende kun en marginal påvirkning af økologien i Østersøen.

Hvorvidt resultaterne af en senere miljøkonsekvensvurdering leder til, at infrastrukturprojekterne vurderes 'ikke alene eller kumulativt med andre planer og projekter at påvirke hydrografien og vandudvekslingen på en sådan måde, at det står i vejen for langsigtet at opnå eller opretholde en god miljøtilstand i Østersøen' er uvist. Men påvirkningerne fra infrastrukturprojekterne på hydrografien er fundet at være marginale, og forventes pba. dette projekt ikke i sig selv at stå 'i vejen for langsigtet at opnå eller opretholde en god miljøtilstand i Østersøen'. En vurdering af afledte påvirkninger på økologien skal ikke vurderes i denne rapport.

## 2 Indledning

### 2.1 Formål

Projektet "Undersøgelse af fremskudt færgehavn ved Tårs" udføres for Sund og Bælt af COWI, DHI og Force Technology.

Formålet med projektet er at undersøge udformningen af den fremskudte havn og dens hydrografiske påvirkning lokalt i Langelandsbælt og i Bælthavet, samt af den fremskudte havn og andre udvalgte infrastrukturprojekters og klimaændrings samlede påvirkning af hydrografien og økologien i Østersøen.

Fokus i projektet er således, at få ændringerne forårsaget af infrastrukturprojekter og af klimaændringer på Østersøniveau til at fremstå klart; og dermed ikke at beskrive hydrografien og økologien i Østersøen gennem mange år.

Denne rapport fokuserer på hydrografien og ændringer af denne, både lokalt og i Østersøen.

### 2.2 Indhold og baggrund

Denne rapport beskriver:

- Opsætningen af de hydrografiske modeller benyttet i projektet, herunder randbetingelser og hvorledes disse ændres pga. betragtede forbindelser, klimaændringer, og valgte scenarier; og
- Præsentation og analyse af de hydrografiske resultater, hvor fokus ikke mindst er på, hvorledes de hydrografiske forhold i Østersøen ændres af forbindelser og klimaændringer.

Der er i projektet skrevet flere notater, som danner baggrund for denne rapport:

1. Ekspertnotat, som giver en detaljeret beskrivelse af de hydrografiske forhold i Østersøen, og som på baggrund af eksisterende viden vurderer den forventede påvirkning af planlagte forbindelser og klimaændringer på Østersøen (Sund & Bælt, 2024C).
2. Afgrænsningsnotat, som beskriver analyserne, der skal gennemføres i projektet, herunder hvilke hydrografiske forhold der skal belyses (Sund & Bælt, 2024D).
3. Forudsætningsnotat, som analyserer og beskriver de forbindelser der skal betragtes og de forventede klimaændringer (Sund & Bælt, 2024E).

Det er forsøgt at skrive denne rapport kort uden at gentage den fulde baggrundsinformation i disse tre notater, men stadig at give en tilstrækkelig information til, at rapporten kan læses selvstændigt.

De udvalgte infrastrukturprojekter, der er inkluderet i denne undersøgelse, er:

- Stormflodssikring af hovedstaden (SH), hvor det væsentligste bidrag er fra Lynetteholm
- Østlig Ringvej
- Als-Fyn forbindelsen
- Fremskudt færgehavn ved Tårs
- Kattegatforbindelsen

Klimascenariet, der betragtes, er SSP2-4.5 i perioden 2081-2100 (benævnes og betragtes som 2100).

Til vurdering af påvirkningen fra infrastrukturprojekter og klimaændringer på Østersøen betragtes og sammenholdes fire scenarier:

- Referencescenarie ("år 2019 uden forbindelser"), dvs. uden den fremskudte havn og de udvalgte større infrastrukturprojekter og uden klimaændringer
- Scenarie ("år 2019 med forbindelser"), dvs. med den fremskudte havn og de udvalgte større infrastrukturprojekter og uden klimaændringer
- Scenarie ("år 2100 uden forbindelser"), dvs. uden den fremskudte havn og de udvalgte større infrastrukturprojekter og med klimaændringer
- Scenarie ("år 2100 med forbindelser"), dvs. med den fremskudte havn og de udvalgte større infrastrukturprojekter og med klimaændringer.

De udførte beregninger og analyser er senere i noten præsenteret og understøttet af figurer og analyser.

I projektet benyttes der også en videreudviklet konceptuel model, som beskriver middel forholdene for hydrografien (saltholdighed i øvre og nedre lag og skillefladens dybde) i Østersøen. Den konceptuelle model og resultaterne fra den er præsenteret i Sund & Bælt (2024F og 2025A). Den konceptuelle model benyttes til at beregne de hydrografiske ændringer i Østersøen for flere klimascenarier og med deres udfaldsrum (i form af en sandsynlighedsfordeling beskrevet ved median og standardafvigelse), og giver således uafhængige supplerende beregninger af de hydrografiske ændringer forårsaget af de betragtede infrastrukturprojekter og klimaændringer. Hvor modellen af Østersøen benyttet i dette projekt og den konceptuelle model har beregnet de samme scenarier passer deres resultater tilfredsstillende overens. Den konceptuelle model og resultater fra denne er ikke berørt i detaljer i denne rapport.

Parallelt til denne hydrografiske rapport udarbejdes en økologisk rapport, der beskriver de økologiske resultater for de ændrede hydrografiske forhold ifm. både infrastrukturprojekterne og klimaændringer (Sund & Bælt, 2025B).

Endelig udarbejdes der en sammenfattende rapport, som beskriver de væsentlige resultater fra hele projektet "Undersøgelse af fremskudt færgehavn ved Tårs" kort og uden for mange tekniske detaljer (Sund & Bælt, 2025C).

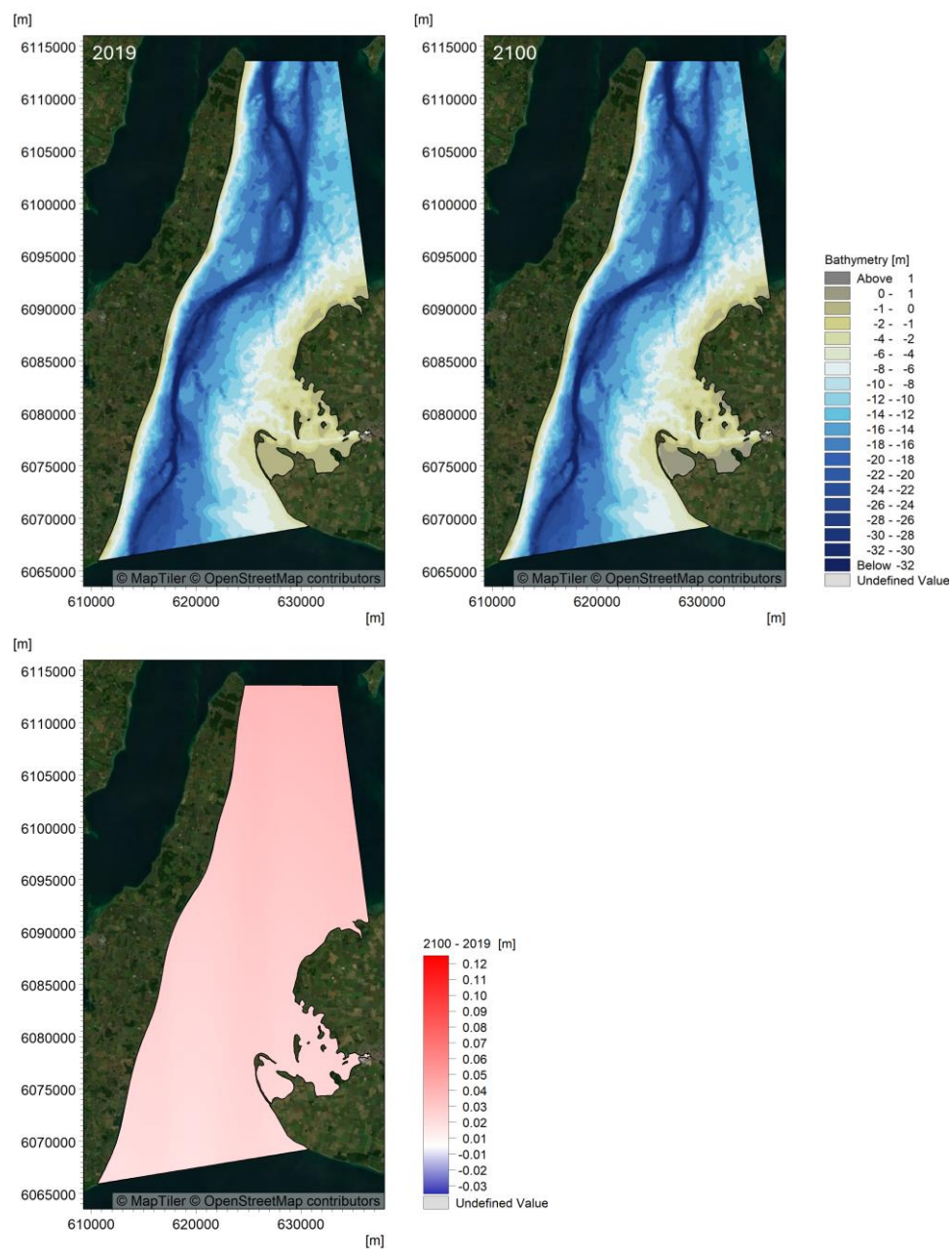
## 3 Hydrografiske modeller

### 3.1 Indledning

Tre hydrografiske modeller er sat op, som dækker hvert sit område af Østersøen, og som benyttes til forskellige delopgaver i dette arbejde:

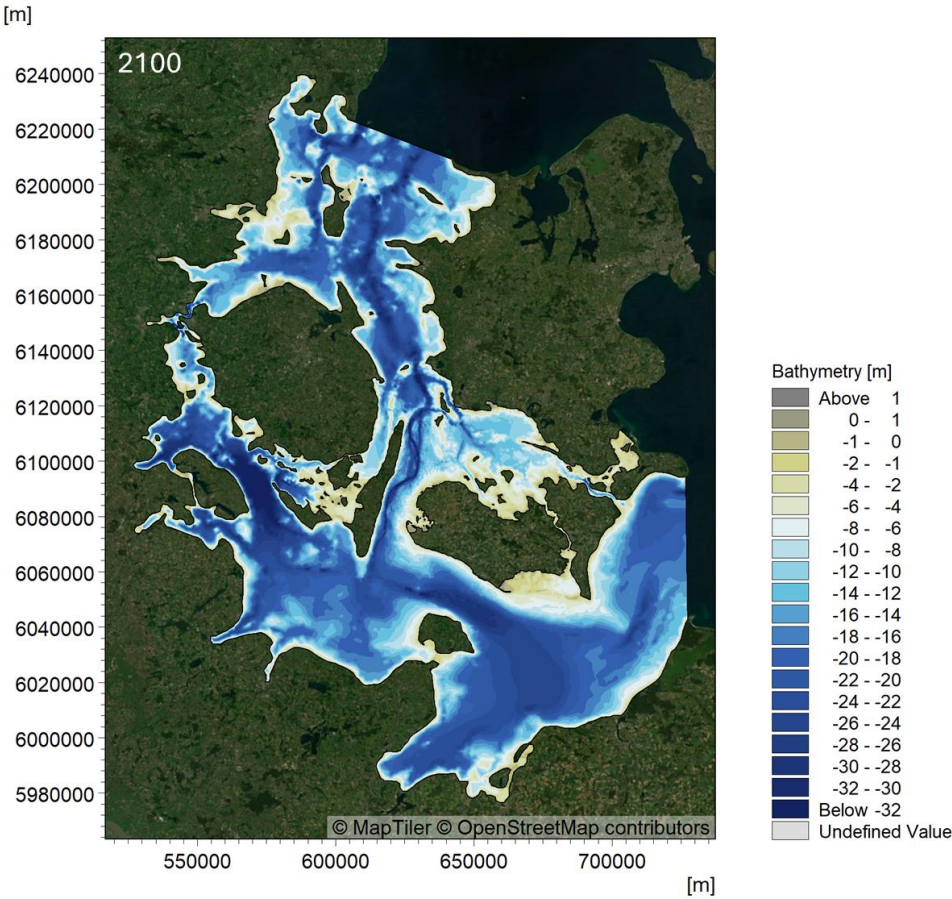
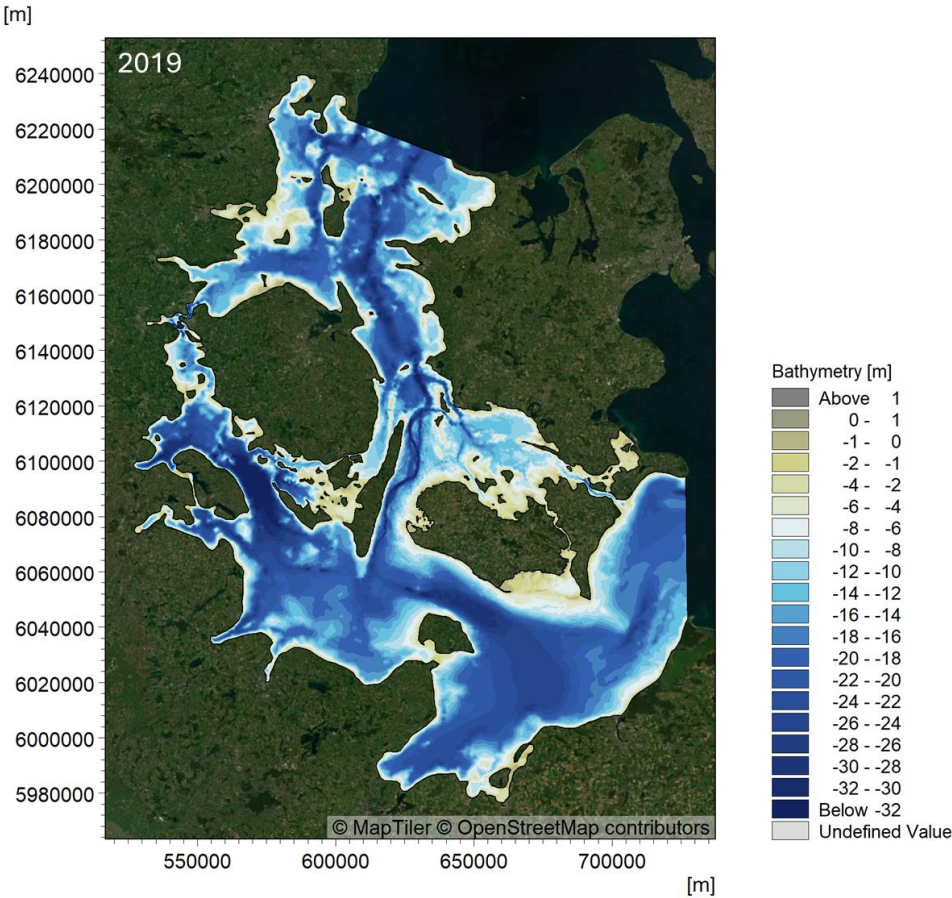
- Langelandsmodel, som dækker Langelandsbælt, se Figur 3-1.  
Den benyttes til vurdering af:
  - Havnens udformning
  - Kystpåvirkning
- Lokal model, som dækker Bælthavet, se Figur 3-2.  
Den benyttes til vurdering af:
  - Strømningsmodstand fra den fremskudte havn
  - Højvandstandsændringer under østlig storm
- Regional model, som dækker Østersøen og Skagerrak, se Figur 3-3.  
Den benyttes til vurdering af:
  - Strømningsmodstand fra infrastrukturprojekter
  - Klimaeffekter
  - Miljøforhold i Østersøen

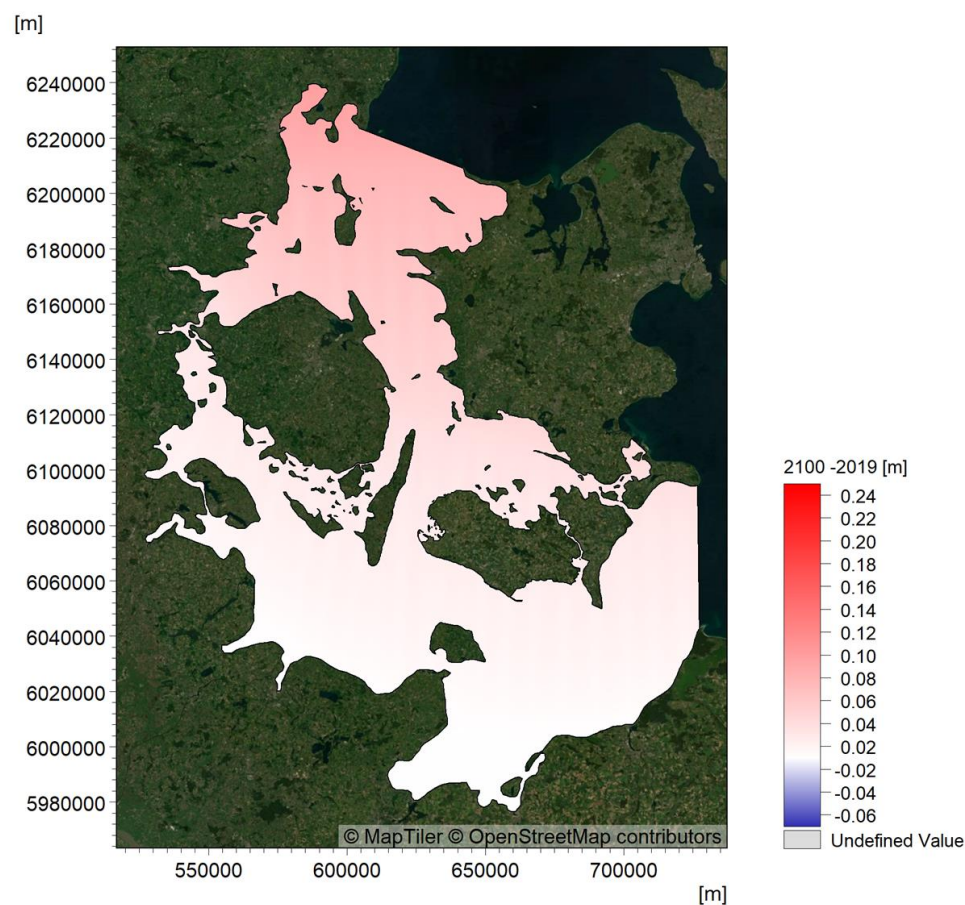
En mere detaljeret beskrivelse, af hvad modellerne benyttes til at vurdere, kan findes i projektets afgrænsningsnotat (Sund & Bælt, 2024D).



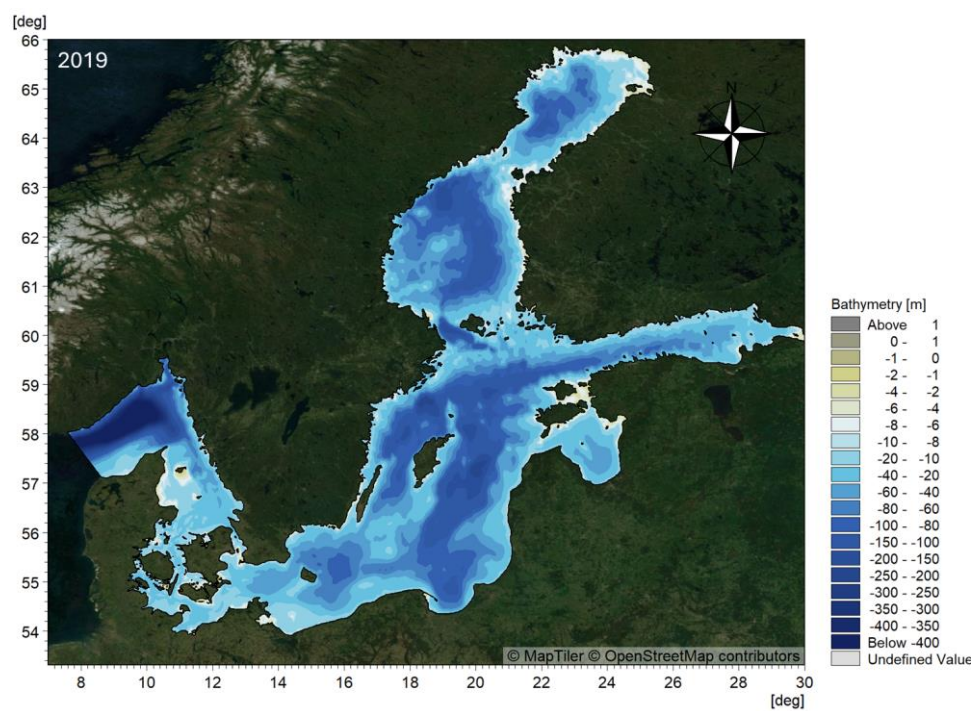
Figur 3-1 Langelandsbæltets område og batymetri for både 2019 og 2100, og forskellen imellem de to batymetrier pga. landhævning.



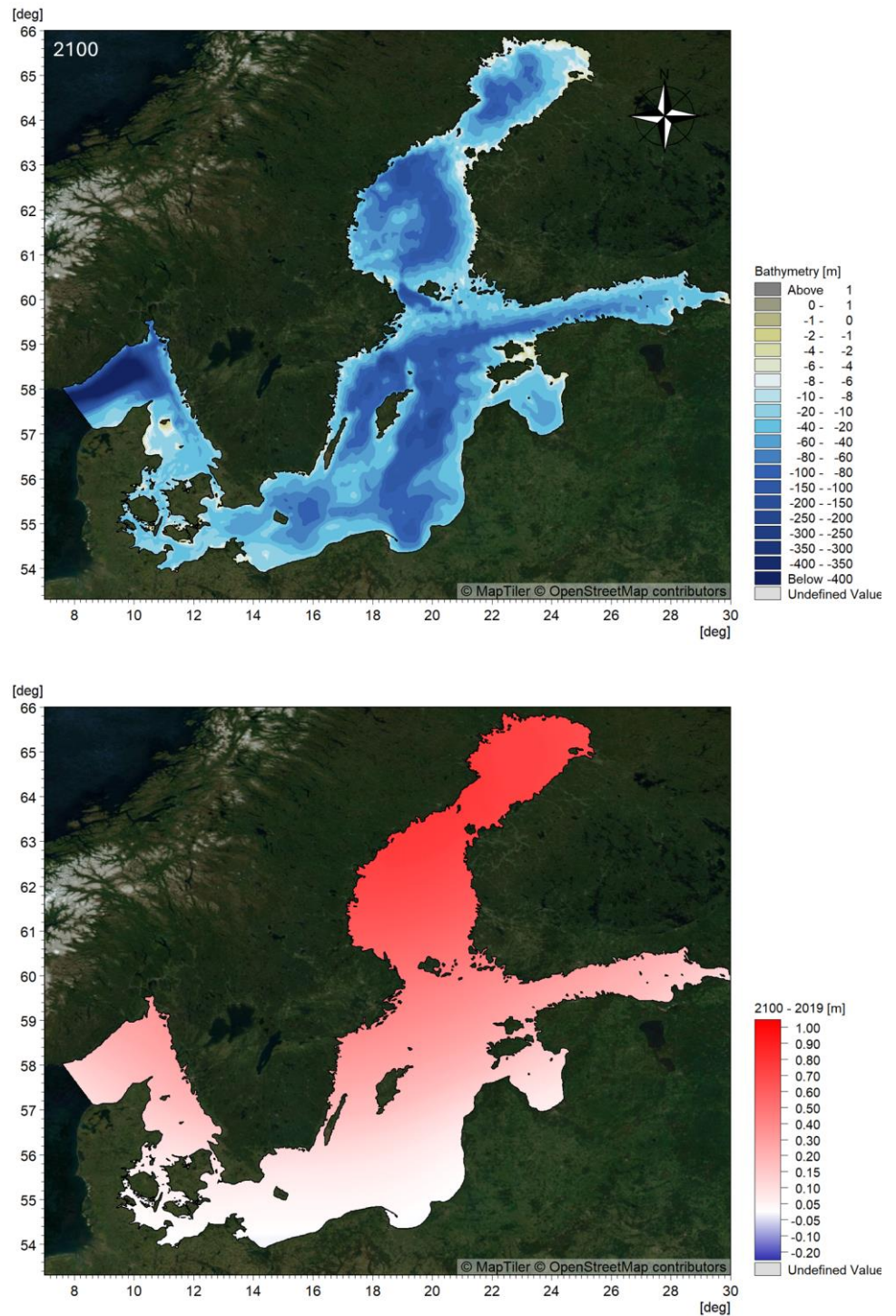




Figur 3-2 Bælthavets område og batymetri, og forskellen imellem de to batymetrier pga. landhævning.







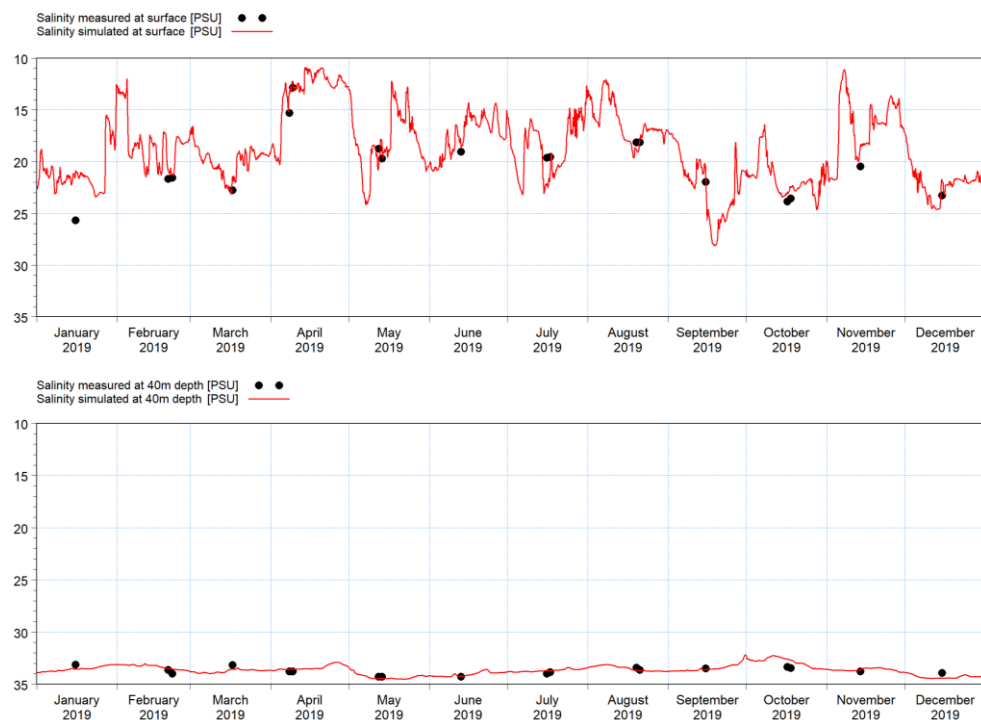
Figur 3-3 Østersøens område og batymetri, og forskellen imellem de to batymetrier pga. landhævning.

Udvalgte detaljer omkring opsætningen af de tre modeller beskrives i det følgende.

## 3.2 Modeller

Den regionale model af Østersøen og Skagerrak er en eksisterende 3D numerisk model (ofte benævnt DKBS-modellen) sat op i MIKE modelsystemet, der køres operationelt på DHI.

Modellen er kalibreret og valideret fra en lang række projekter. En sammenligning af målt og beregnet saltholdighed ved Anholt i 2019 er vist i Figur 3-4.



Figur 3-4 Sammenligning af målt (udtrukket NOVANA målinger) og beregnet saltholdighed i overflade- og bundvand med DKBS-modellen ved Anholt.<sup>5</sup>

Den lokale model af Bælthavet og langelandsmodellen af Langelandsbælt dækker mindre områder i den regionale model. De sættes op som den regionale model, men med højere horisontal opløsning.

### 3.2.1 Randbetingelser

Randbetingelser til de 3 modeller udtrækkes fra DKBS-modellen. Modellen har beregnet perioden fra omkring 1990 til dags dato, hvor resultater derfra (vandstande, strøm, og lagdelingen, dvs. salt og vandtemperatur) er gemt. Resultaterne fra DKBS-modellen benyttes meget ofte af DHI til at generere randbetingelser til mindre modelområder. Det fungerer godt og sparer tid ved generering af initiale betingelser, betingelser på åbne rande og vindfelter.

<sup>5</sup> Bemærk, at der for saltholdighed benyttes en y-akse med stigende saltholdighed nedad, hvorved vand med en lavere salinitet, hvilket oftest også har en lavere densitet, er højere oppe (på y-aksen), og vise versa.

### 3.2.2 Beregningsperioder

Til beregningerne med Langelandsmodellen benyttes år 2019, som er et typisk år, der indeholder både storme og saltvandsindbrud til Østersøen. Beregningen dækker således omskiftelige forhold, dvs. både lagdelte og mere homogene forhold, svage og kraftige strømme, høje og lave bølger fra forskellige retninger, og forskellige vindretninger og vindstyrker. Således dækkes et bredt udfaldsrum. Dokumentation for valget af år 2019 er givet i afsnit 4.4.

Lokalmodellen beregner også for år 2019, og resultaterne benyttes til at bestemme påvirkningen af den fremskudte færgehavn ved Tårs på gennemstrømning og lokale vandstandsændringer.

For den regionale model beregnes også år 2019, hvilket gentages cyklisk med de drivende kræfter (vandstand, meteorologi, og afstrømning), indtil en nærstationær situation udvikles (i betydningen, at de hydrografiske forhold kun ændres lidt fra beregning til beregning i de sidste cykliske gentagelser). De drivende kræfter (vandstand, meteorologi, og afstrømning) i år 2019 ændres pga. klimapåvirkninger til at repræsentere år 2100, og år 2100 gentages ligeledes cyklisk indtil en nærstationær situation udvikles. Klimaændringerne er de forventede klimaændringer i år 2100 (se kapitel 8), og er dermed en mærkbar klimaændring. Modellen køres således for et antal gentagelser af år 2019 med og uden infrastruktur forbindelser og med og uden klimaændringer, og indtil en nærstationær situation udvikles. Da det kun drejer sig om cyklisk brug af 'et repræsentativt år, er der ikke nogen mellem-årige påvirkninger, og infrastruktur forbindelsernes påvirkning kan derved identificeres i resultaterne.

## 3.3 Infrastrukturprojekter

### 3.3.1 Betragtede projekter

De undersøgte infrastrukturprojekter, der er inkluderet i denne undersøgelse, er (Sund & Bælt, 2024D):

- Stormflodssikring af hovedstaden (SH), hvor det væsentligste bidrag er fra Lynetteholm, som er miljøvurderet og vedtaget ved anlægslov. Perimeteren for Lynetteholm planlægges færdig i 2026
- Østlig Ringvej, som er under miljøvurdering
- Als-Fyn forbindelsen, som er forundersøgt
- Fremskudt færgehavn ved Tårs, hvor der gennemføres supplerende hydrografiske analyser
- Kattegatforbindelsen, som har gennemgået en indledende forundersøgelse

### 3.3.2 Modstande

Disse projektideer er udviklet i forskellig grad og rummer en række alternative løsninger, hvorfor deres påvirkning af vandføringerne kendes med forskellig præcision. En oversigt over deres vandføringsændringer (definition er vist i

afsnit 5.2.3) er præsenteret i Tabel 3-1 (fra Sund & Bælt, 2024C), baseret på de udvalgte anlægsvarianter.

Det bemærkes, at vandføringsændringerne for de forskellige projekter er beregnet med et modelområde, der er mindre end hele det stræde, projekterne ligger i. Derfor er de beregnede vandføringsændringer lidt for store (absolut) og ligger dermed "på den sikre side".

*Tabel 3-1      Oversigt over infrastrukturprojekternes omtrentlige vandføringsændringer (brutto) i det lokale stræde de befinder sig i og i det samlede overgangs-område (Bælthavet og Øresund). Lokale ændringer er udtrykt fra 1: (By & Havn, 2020), 2: (DHI & COWI, 2024), 3: (Sund & Bælt, 2024B), 4: (Sund & Bælt, 2018), og 5: (Sund & Bælt, 2022).*

| Infrastruktur                     | Ændring lokalt (%) | Ændring overgangs-område (%) |
|-----------------------------------|--------------------|------------------------------|
| SH / Lynetteholm <sup>1</sup>     | -0,25              | -0,07                        |
| Østlig Ringvej <sup>2</sup>       | 0                  | 0                            |
| Als-Fyn forbindelsen <sup>3</sup> | -0,04              | 0,00                         |
| Fremskudt havn Tårs <sup>4</sup>  | -0,31 – -0,14      | -0,20 – -0,09                |
| Kattegatforbindelsen <sup>5</sup> | -0,3 – -0,0        | -0,22 – -0,00                |
| <b>Sum</b>                        | <b>NA</b>          | <b>-0,49 – -0,16</b>         |

De lokale ændringer kan ikke sammenlignes eller adderes, men det kan ændringerne i overgangsområdet. Den samlede ændring af de undersøgte infrastrukturprojekter i overgangsområdet er således usikkert estimeret til -0,49% – -0,16%.

Infrastrukturprojekternes samlede modstand bestemmes mere korrekt senere i denne rapport fra beregningsresultater med den regionale model, se afsnittene 3.4 og 7.8.

### 3.3.3 Valg af udformninger for forbindelserne

I beregningerne benyttes for hver forbindelse den udformning, der giver den største modstand for gennemstrømningen ud af de udformninger, der stadig er med i overvejelserne for den pågældende forbindelse.

De to forbindelser med de største maksimale ændringer af vandgennemstrømninger i overgangsområdet er:

- Kattegatforbindelsen
- Fremskudt færgehavn ved Tårs

For Kattegatforbindelsen er den betragtede løsning:

- KKV-2.1 Højbro/lavbro
- KKØ-4.3 Sænketunnel/lavbro, omfattende nordligt rev og kunstig ø

For fremskudt færgehavn ved Tårs er det scenarie 6, som er vist i Figur 3-5:

- Omtrentlig ellipseformet havn med en nordvestlig orientering.

- 800 m bro yderst ved havnen.
- 600 m bro inderst ved kysten.
- 2100 m dæmning mellem de to broer.
- 3 bropiller med en diameter på 0,8 m på tværs af broerne hver 25 m langs broen.

Udformninger af fremskudt færgehavn ved Tårs med en mindre modstand kan vurderes ved en 'interpolation' pba. deres mindre modstand. Disse udformninger giver en mindre påvirkning af forholdene i Østersøen.



Figur 3-5 Skitse af scenarie 6 for fremskudt færgehavn ved Tårs.

### 3.4 Parameterisering i den regionale model

Detaljeret geometrisk beskrivelse er fremskaffet for de betragtede forbindelser, og fire af disse er implementeret direkte i den regionale model (Østlig Ringvej er ignoreret, da dens modstand er vurderet til at være ubetydelig, se afsnit 4.2):

- Lynetteholm
- Als-Fyn forbindelsen
- Fremskudt færgehavn ved Tårs
- Kattegatforbindelsen

### 3.5 Klimaændringer

#### 3.5.1 Scenarie

Klimascenariet, der betragtes i de numeriske beregninger, er (se Sund & Bælt, 2024E):

- SSP2-4.5

SSP2-4.5 kan opsummeres således:

- SSP2-: Medium scenarie, dvs. i betydningen medium udfordringer for afbødning og tilpasning.
- -4.5: Strålingspåvirkning i år 2100 og reduktionsindsats ligger begge centralt blandt SSP klimascenarierne.

SSP2-4.5 befinder sig således midt i et større muligt udfaldsrum.

Forskellige klimascenarier er undersøgt med den konceptuelle model Sund & Bælt (2024F og 2025A).

### 3.5.2 Periode

En periode er udvalgt til brug i de numeriske beregninger:

- 2081-2100, som benævnes og betragtes som 2100, se også kapitel 8

Ændringerne i Østersøens hydrografi og økosystem vil øges langsomt over tid (opholdstiden i Østersøen er mange år) og vil være udviklet og størst i denne periode. Således fås de største signaler at sammenligne.

Reference tidspunktet/perioden for de betragtede klimaændringer er 1995-2014, hvor året 2005 er midt i denne periode.

Der er klimaændringer fra referencetidspunktet i 2005 og frem til 2019. Af denne årsag er de betragtede klimaændringer lineært interpoleret mellem 2005 og 2030, og benyttet til at nulstille klimaændringerne i 2019. Dermed er 2019 det nye referencetidspunkt. De bestemte klimaændringer skal således påføres forholdene i 2019.

### 3.5.3 Tidslig repræsentation

Klimaændringerne opløses i tid med en ændring i den betragtede parameter (for eksempel lufttemperatur eller nedbør) for hver måned over året. Årsvariationen i ændringerne beskrives således, og er betragtelig.

### 3.5.4 Parametre

Meteorologiske, hydrologiske og hydrografiske parametre der betragtes er:

1. havvandspejl og landhævning
2. vandtemperatur
3. vind
4. lufttemperatur
5. nedbør
6. fordampning
7. afstrømning



Disse parametre (undtagen landhævning) ændres direkte eller indirekte af klimaændringerne, hvor de fleste af parametrene stiger eller øges på grund af klimaændringerne.

Det er valgt at se bort fra ændret arealanvendelse, for eksempel ændret landbrugspraksis, øgning af skovarealer, udtagning af landbundsjord og implementering af vådområder, da der er stor usikkerhed om implementeringen af de vedtagne aftaler og dermed om hvornår og i hvilket omfang effekterne kan forventes.

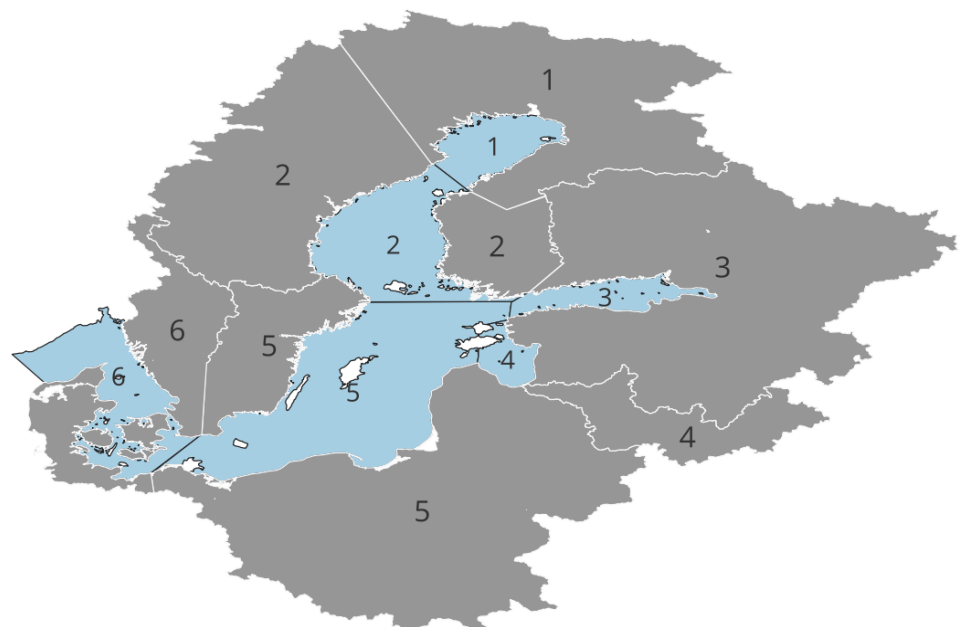
Andre påvirkninger, så som mindre havis, forsuring af havene, tørkeperioder og skovbrande, og korte ekstremhændelser, er ikke medtaget, idet de ikke forventes at have en afgørende indflydelse på Østersøens hydrografiske forhold.

### 3.5.5 Nedhentede data

IPCC's (Intergovernmental Panel on Climate Change) seneste resultater for lufttemperatur, nedbør og fordampning fra de globale klimamodeller (Global Climate Models (GCMs)) er nedhentet.

De nedhentede data er behandlet og resultatet er ensembler af klimafaktorer (Climate Change Factors (CCF)) for nedbør og absolutte faktorer for lufttemperatur.

I denne forbindelse opdeles Østersøen og opland i seks områder, som følger Østersøens opdeling i forskellige havområder og tilhørende afstrømningsområder, se Figur 3-6.



*Figur 3-6 Kort som viser inddelingen af Østersøen i 6 områder: 1 Botniske Bugt, 2 Botniske Hav, 3 Finske Bugt, 4 Riga Bugten, 5 Centrale Østersø, og 6 Bælterne, Kattegat og Skagerrak.*

Parametrenes ændringer bestemmes for hvert af disse delområder, hvor der skelnes mellem land og vand. Således er der for eksempel for område 2 resultater for to landområder og et vandområde.

### 3.5.6 Benyttede klimaændringer

#### Havvandstand og vandtemperatur

Vandstands- og vandtemperaturstigningen fra 2019 til 2100 lægges til modelranden i Skagerrak i den regionale model i 2019. Dvs. at vandstanden på randen gennem 2019 løftes med en konstant vandstandsstigning og ligeledes at vandtemperaturen over randen øges med en konstant temperaturstigning.

Den benyttede øgning i vandstand og vandtemperatur fra 2019 til 2100 er (Sund & Bælt, 2024E):

- +0.481 m
- +1.5°C

Landhævning lægges til batymetrien (med fortegn), der benyttes i år 2100 beregningerne (detaljer kan findes i Sund & Bælt, 2024E). Effekten er størst i den nordlige Østersø.

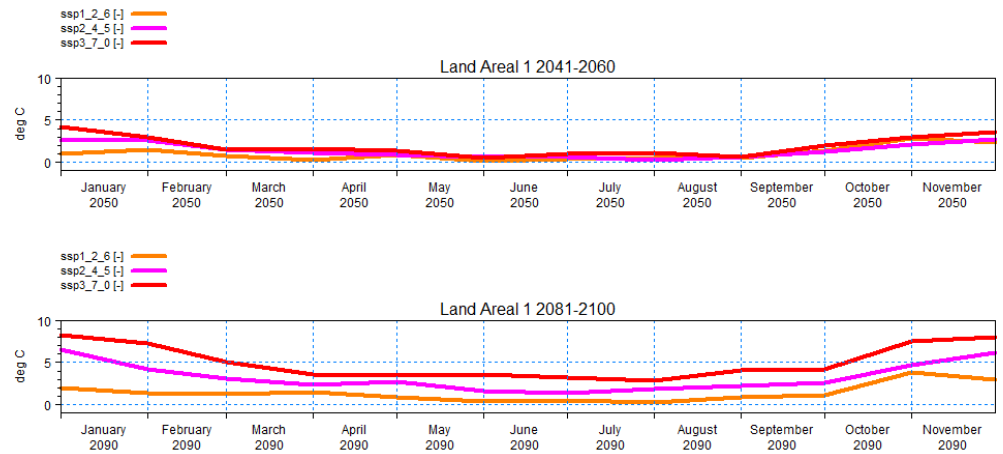
#### Vind, lufttemperatur og nedbør

Der forventes kun en ganske begrænset formindskelse af vindens middel hastighed, og derfor er det valgt at se bort fra vindændringer.

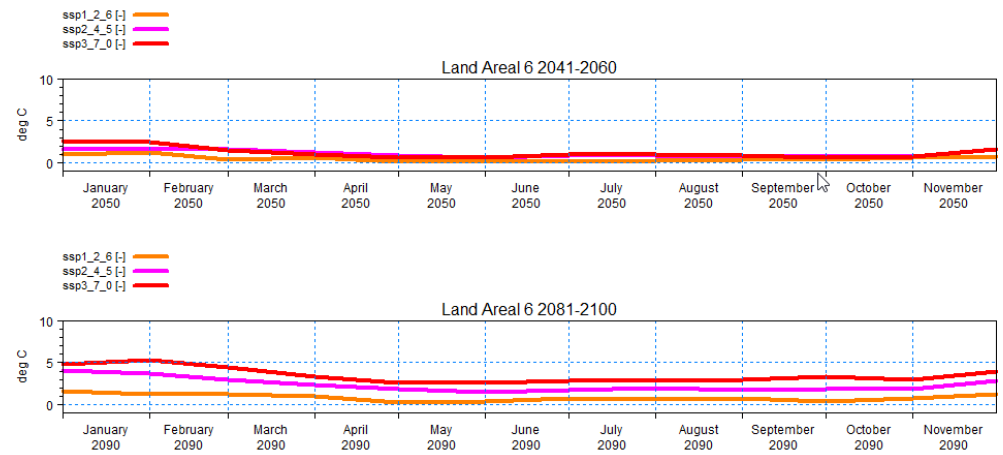
Ændring i lufttemperatur og nedbør påføres lufttemperatur- og nedbørfelterne benyttet i den regionale model i 2019 (Sund & Bælt, 2024E). Øgningen i lufttemperatur tillægges lufttemperaturen i de 6 områder vist i Figur 3-6, og tilsvarende multipliceres en nedbørsændringsfaktor på nedbørfelterne i 2019.

Analyserne af lufttemperaturen viser, at klimaændringerne giver den største øgning i lufttemperaturen i den nordlige del af Østersø området. Figur 3-7 og Figur 3-8 viser forskellen mellem det nordlige landområde (område 1) og landområdet, der indeholder Danmark (område 6). Det er specielt i efterår- og vintermånederne, at forskellen er udtalt.

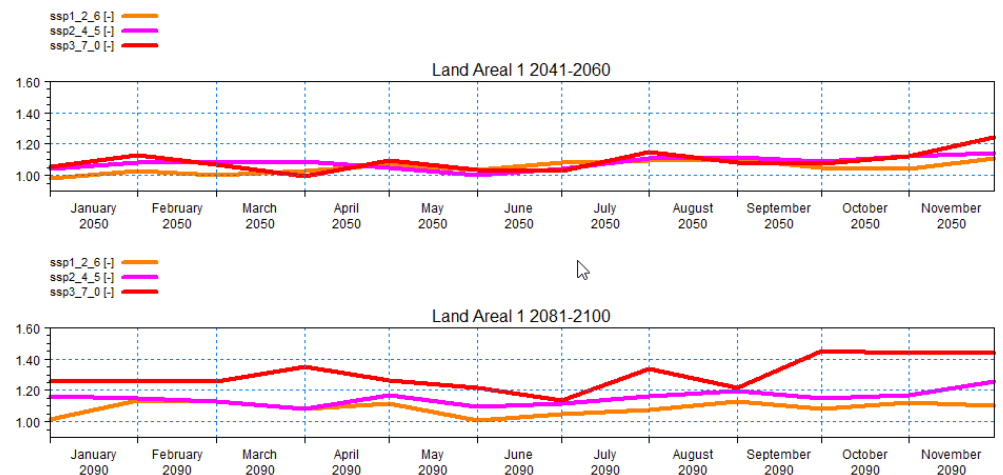
Klimafaktorerne for nedbør er bestemt for områderne vist i Figur 3-6, og opdelt i land og vand. Der er begrænset forskel mellem land og vand, inden for de enkelte områder. I Figur 3-9 og Figur 3-10 vises klimafaktorerne for land for områderne 1 og 6. Det er specielt for det høje klimascenarie, at der er forskelle.



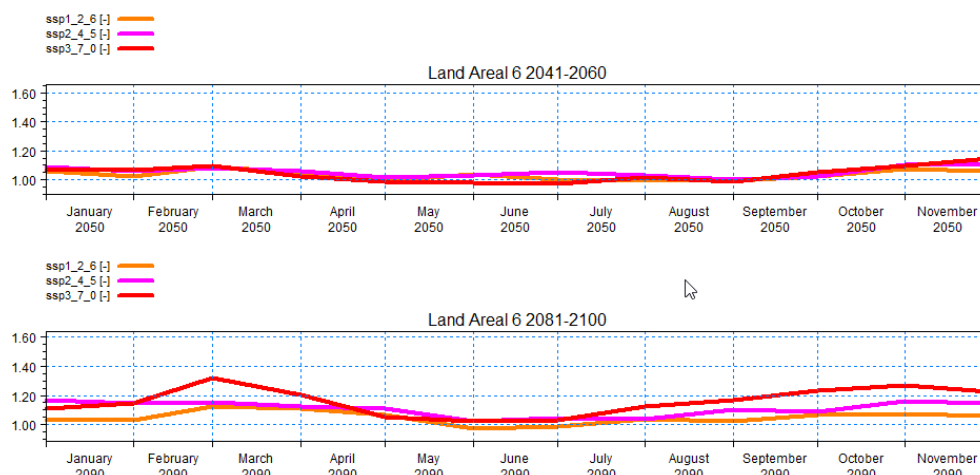
Figur 3-7 Øgning i lufttemperatur i område 1.



Figur 3-8 Øgning i lufttemperatur i område 6, som inkluderer Danmark.



Figur 3-9 Klimafaktorer for nedbør over land for område 1.



Figur 3-10 Klimafaktorer for nedbør over land for område 6, som inkluderer Danmark.

Den potentielle fordampning i 2019 og 2100 er beregnet med Priestley-Taylor formelen med lufttemperatur i 2019 og 2100 og indstråling i 2019 som input parametre. Den væsentligste inputparameter i beregningen af den potentielle fordampning er lufttemperaturen.

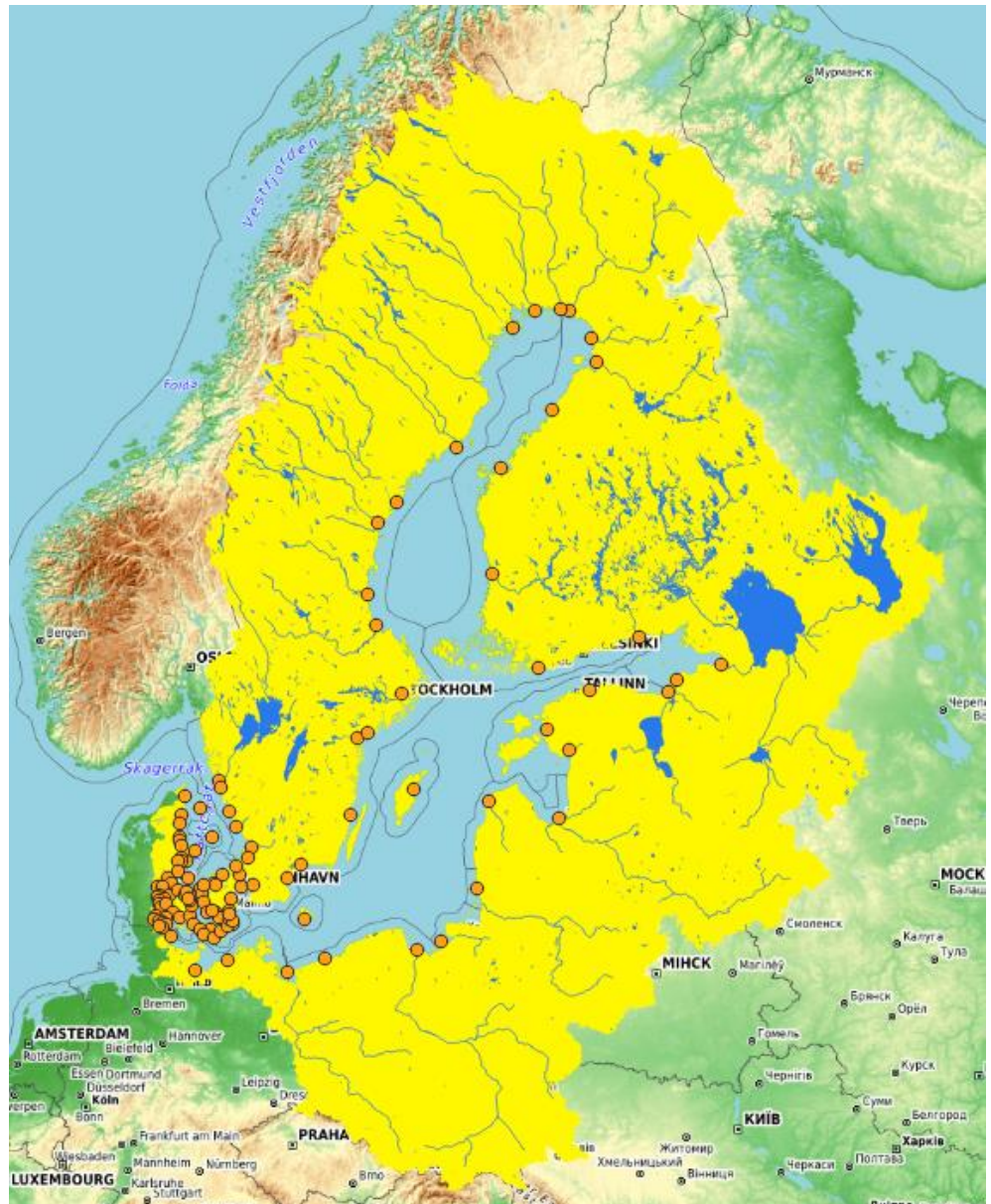
Fordampning fra vand beregnes med den regionale hydrografiske model af Østersøen og fra land med den Globale Hydrologiske Model, se det følgende afsnit.

### Ferskvandstilstrømning

DHIs validerede Globale Hydrologiske Model (Murray et al, 2023) er benyttet til at beregne den øgede afstrømning til Østersøen i 2019 ud fra information om lufttemperatur og nedbør (Sund & Bælt, 2024E), se Figur 3-11. Afstrømningen beregnes også i år 2100 med den øgede lufttemperatur og nedbør.

Modellen er valideret vha. data fra mange områder, flere klimabælter og med mange års data. Derfor er modellen også egnet til at beskrive klimaændringer ved Østersøen. Klimaændringen ved Østersøen svarer til forskydning af klimabælterne. Forholdene ved Østersøen i 2100 ændres til omkring det nuværende klima ved Middelhavet, hvor modellen også er valideret.

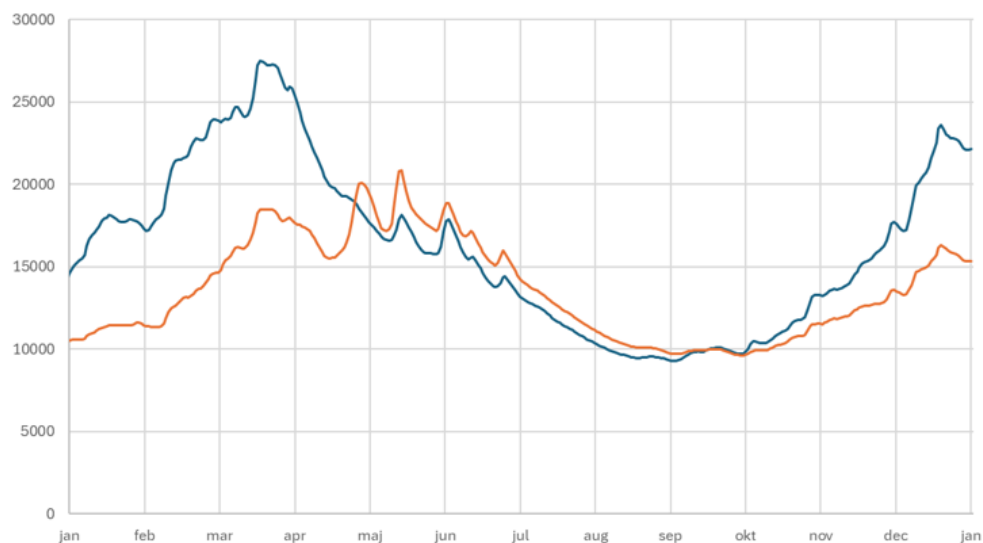
I dette projekt er modellen ændret ganske lidt for at få en bedre sammenligning mellem målt og beregnet årsvariation. F.eks. små ændringer af forsinkelser gennem søer og reservoirer. Vandbalancen er ikke påvirket af disse ændringer. Af denne årsag betragtes modellen stadig som værende valideret.



Figur 3-11 Østersøens afstrømningsområde (det gule område) og tilstrømningspunkter til Østersøen langs kysten (orange punkter).

Afstrømningen fordeles på 73 tilstrømningspunkter omkring Danmark og 46 tilstrømningspunkter omkring den indre Østersø og vestkysten af Sverige, se Figur 3-11. Det store antal punkter omkring Danmark er fra de modeller DHI har og benytter. Det er ikke for de foretagne analyser væsentligt at have så mange punkter omkring Danmark.

Ved at skalere lufttemperatur og nedbør med de fundne klimaændringer beregner den Globale Hydrologiske Model afstrømning for det valgte klimascenarie. I Figur 3-12 er afstrømningen til Østersøen vist for både år 2019 og år 2100 (SSP2-4.5).



Figur 3-12 Afstrømning ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) til Østersøen for år 2019 (rød kurve) og 2100 (SSP2-4.5) (blå kurve).

Afstrømningen stiger pga. klimaændringer, og den årlige fordeling ændres, dvs. at den stiger i den kolde periode. I Tabel 3-2 er de gennemsnitlige ændringer for afstrømning, nedbør og potentiel fordampning vist.

Tabel 3-2 Ændring i afstrømning, nedbør og fordampning pga. klimaændringer.

| Gennemsnit     | Afstrømning [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] | Nedbør [mm]   | Potent. fordampning [mm] |
|----------------|---------------------------------------|---------------|--------------------------|
| 2019           | 13.788                                | 710           | 601                      |
| 2100           | 16.368                                | 790           | 649                      |
| <b>Forskel</b> | <b>+18,7%</b>                         | <b>+11,3%</b> | <b>+8%</b>               |



## 4 Forudsætninger og konsekvenser

### 4.1 Introduktion

I Forudsætningsnotatet (Sund & Bælt, 2024E) er baggrunden for de valgte forudsætninger beskrevet i detaljer, herunder for de undersøgte infrastrukturprojekter og det valgte klimascenarie.

På baggrund af efterfølgende drøftelser af projektet og drøftelser med de eksterne reviewere fremhæves udvalgte forudsætninger og deres konsekvenser i dette kapitel.

### 4.2 Infrastrukturprojekter

I projektet inddrages 5 infrastrukturprojekter, se afsnit 3.3.1.

Østlig Ringvej: nuværende løsning indeholder en rampe ved Prøvestenen og en rampe ved Københavns Lufthavn, se Figur 4-1:

- Begge ramper er placeret i et område med svag strøm og ligger i læ af henholdsvis Prøvestenen og Kastrup Halvøen.
- Begge ramper er delvist strømlinede.

Derfor antages vandføringsændring fra Østlig Ringvej at være ubetydelig (DHI & COWI, 2024).

Det bemærkes, at pga. rampernes udformning kan vandføringsændringen vise sig at være positiv.

Ramperne kan ændres, men ikke i en grad, der forventes at ændre den meget begrænsede påvirkning. Vandføringsændringen for Østlig Ringvej projektet beregnes på et senere tidspunkt i projektet.

Københavns Nordhavn er ikke nævnt i Forudsætningsnotatet (Sund & Bælt, 2024E).

I projektet betragtes kun undersøgte fremtidige projekter, hvilket Københavns Nordhavn falder uden for, da havnen er bygget. Den ses i den nordlige del af området på Figur 4-1.

Havnens strømningsmodstand er i en tidligere rapport (KK & KDI, 2009) vurderet at være lille og uden betydning for gennemstrømningen i Øresund, dvs. at vandføringsændringen er lille. Vandføringsændringen er ikke kvantificeret, som gjort i denne rapport, og kan således ikke sammenlignes direkte med andre forbindelser.



Figur 4-1

Kort viser omrids af Østlig Ringvejs to ramper (til venstre for rød pil). Projektet er stadig på et tidligt stade i planlægningen, og ramperne kan blive ændret.

### 4.3 Klimaændringer

Det undersøgte klimascenarie er SSP2-4.5, som er et medium-scenarie, i år 2100.

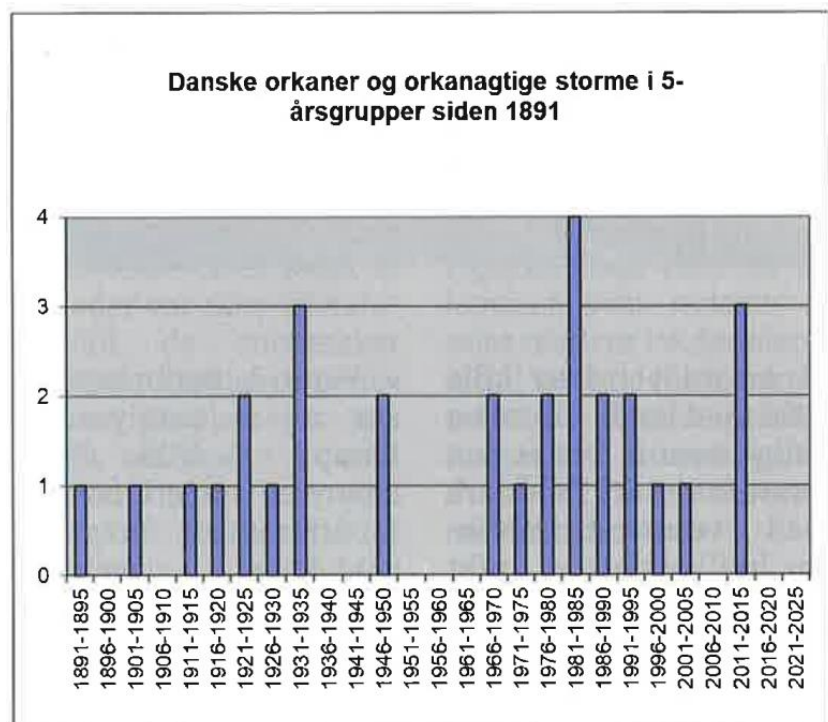
I projektet lægges der vægt på middelændringer (og af denne årsag er den benyttede Delta Change metode tilstrækkelig). Der er stor 'inerti' i Østersøen, tidskalaen er 5 – 30 år afhængigt af område og dybde, og således ændres forholdene i Østersøen ikke ved for eksempel kortvarige ændringer i afstrømning.

Den forventede ændring i middel vinden er lille og negativ, se Forudsætningsnotatet (Sund & Bælt, 2024E), og ændringer i vinden antages at være nul i beregningerne for det fremtidige klimascenarie (må ikke forstås således, at vindændringer ignoreres, de er blot små og antaget at være nul). Derfor benyttes vindfelterne for år 2019 uændret i scenariet med klimaændringer.

Ekstreme hændelser og ændringer er ikke specifikt undersøgt i projektet, da det er ændringer på en længere tidsskala, som undersøges.

Uanset dette kan det overvejes, om storme over Nordsøen og Østersøen bliver kraftigere. Hyppigere og kraftigere storme kan påvirke indstrømning til Østersøen og dermed udskiftningen af de dybere vandmasser i indre Østersø.

Det er der dog ikke klart belæg for at antage, se for eksempel Cappelen (2024), som skriver, at "Blæsevejr i Danmark viser variationer, men generelt ingen ændring". Af Figur 4-2 ses det, at storme fordeler sig i grupper (det samme er også observeret for store indstrømninger og isvintre).



Figur 4-2 Antallet af danske storme og deres tidlige fordeling fra 1891 til september 2024 (fra Cappelen, 2024).

Således er der få storme i perioden fra 1936 til 1966 (klimavariationer er variationer på en 30-års tidsskala), og en tendens til færre store storme fra 2006 og frem (og få store indstrømninger). Det vides ikke, hvor længe denne nuværende periode med tendens til færre storme vil vare.

## 4.4 År 2019

### 4.4.1 Det mest repræsentative år

Det er valgt at benytte 2019, som et repræsentativt år, i beregningerne.

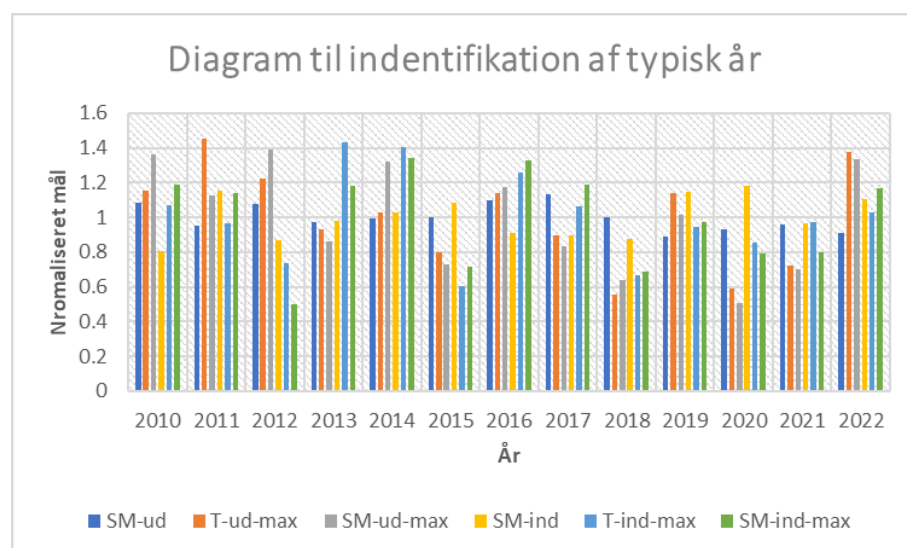
I Sund & Bælt (2024A) er de 13 år fra 2010 til 2023 analyseret for at kunne bestemme det mest repræsentative år.

Analysen af strømningsforhold er baseret på vandstandsmålinger fra Viken og Skanør. Det er vist i flere studier, at sådanne vandstande (i eller ved sydlige Kattegat og Arkona Bassinet) bestemmer transporten gennem Storebælt, Øresund og Lillebælt, se for eksempel Jacobsen (1980) og Jacobsen et al. (2010).

Hydrografiske strømningsforhold, der er benyttet til at karakterisere årene, ses på Figur 4-3:

- Varigheden af kraftigste ind- og udstrømningshændelser
- Volumen for kraftigste ind- og udstrømningshændelser
- Varigheden af perioderne med ind- og udstrømning i et år

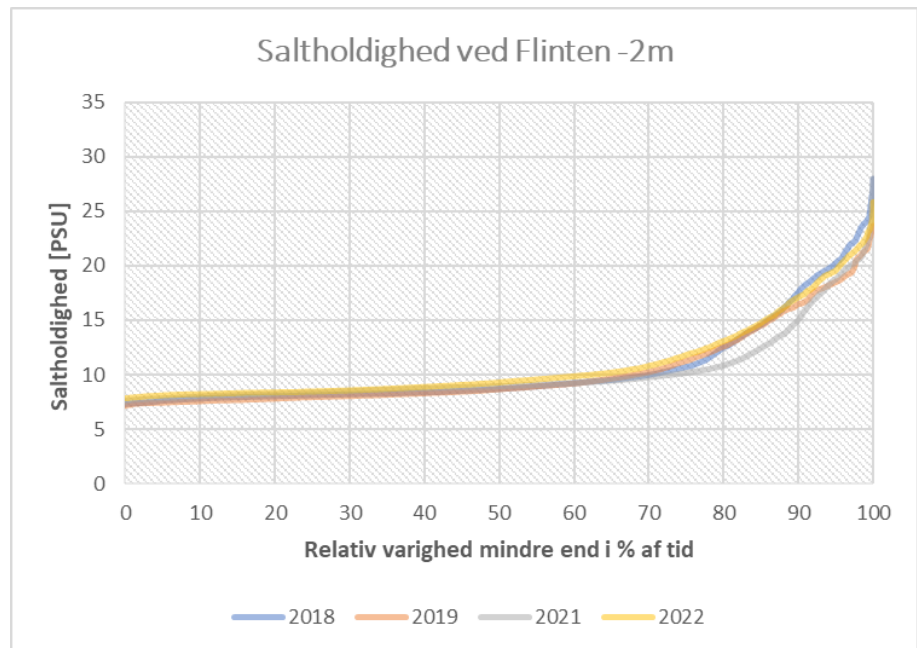
En integration af målene viser, at 2019 er det mest repræsentative år.



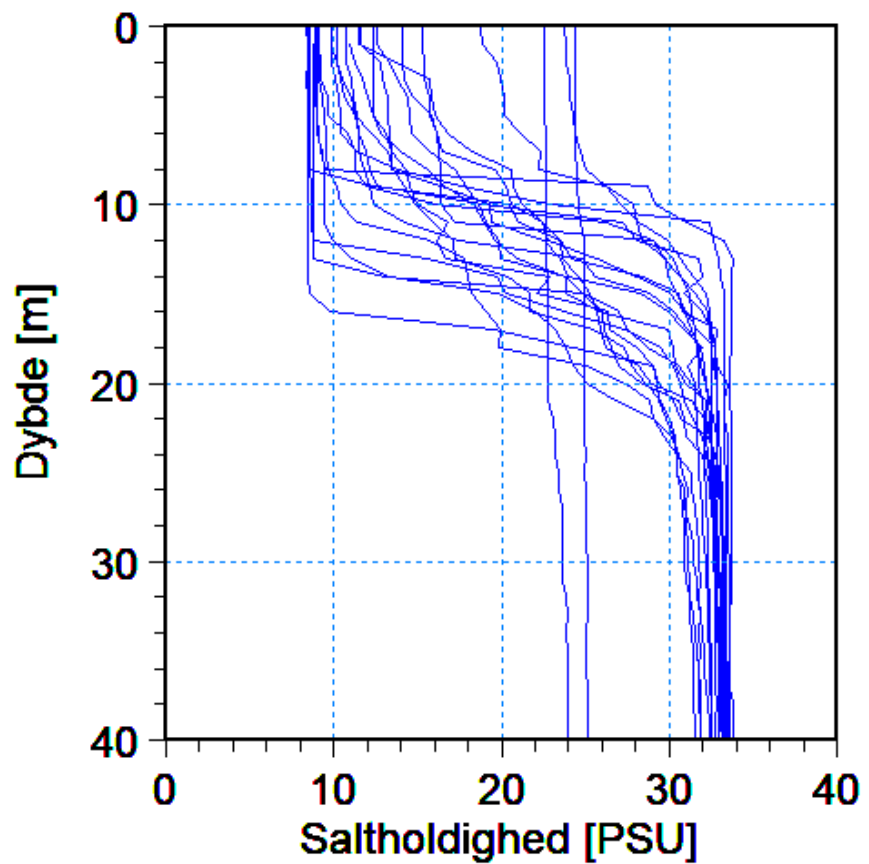
Figur 4-3 De 6 normaliserede mål i de enkelte år (fra Sund & Bælt, 2024A).

Derudover vurderes saltholdighedsvariationen i Øresund, hvilket også viser, at 2019 er et repræsentativt år, se Figur 4-4.

Saltholdighedsprofilerne fra Hven Sydøst viser også, at der er en kraftig vindhændelse i 2019, som blander vandmasserne, se Figur 4-5.



Figur 4-4 Angivelse af varigheder i % af tid på året, hvor saltholdigheden i kote -2m ikke overstiger et givet niveau (fra Sund & Bælt, 2024A).



Figur 4-5 Målte saltholdighedsprofiler ved Hven Sydøst i 2019 (fra Sund & Bælt, 2024A).

I Sund & Bælt (2024A) drages følgende konklusion:

- De udførte analyser viser med al tydelighed, at der kan være større år-til-år forskelle på de kraftigste ind- og udstrømningshændelser, men at disse forskelle skrumper betragteligt, når man sammenligner de kumulerede styrkemål opgjort for hele året.

Endelig indeholder 2019 også betydeligt højvande, se Tabel 4-1.

Tabel 4-1 Målte ekstreme vandstande ved Bagenkop Havn i perioden fra 1. juni 1976 til 1. januar 2024 (fra KDI, 2024).

| Nummer    | Dato              | Trendfri (cm) | Målt (cm)  |
|-----------|-------------------|---------------|------------|
| 1         | 20-10-2023        | 178           | 186        |
| 2         | 05-01-2017        | 164           | 170        |
| <b>3</b>  | <b>02-01-2019</b> | <b>163</b>    | <b>170</b> |
| 4         | 30-11-1988        | 155           | 155        |
| 5         | 04-01-1978        | 153           | 153        |
| 6         | 28-11-1989        | 145           | 145        |
| 7         | 21-02-1993        | 144           | 145        |
| 8         | 18-10-1991        | 137           | 137        |
| 9         | 08-02-1983        | 134           | 134        |
| 10        | 29-03-2020        | 133           | 140        |
| 11        | 06-01-2012        | 133           | 138        |
| 12        | 28-11-1983        | 132           | 132        |
| 13        | 02-11-1988        | 131           | 131        |
| 14        | 30-01-2022        | 130           | 138        |
| 15        | 07-12-1989        | 130           | 130        |
| 16        | 03-02-1983        | 129           | 129        |
| 17        | 28-08-1989        | 125           | 125        |
| 18        | 11-12-1979        | 124           | 124        |
| 19        | 14-12-1988        | 124           | 124        |
| 20        | 20-12-1988        | 124           | 124        |
| 21        | 25-12-1988        | 124           | 124        |
| 22        | 05-04-1989        | 119           | 119        |
| 23        | 22-03-2008        | 119           | 123        |
| 24        | 15-11-1989        | 118           | 118        |
| 25        | 31-12-1977        | 114           | 114        |
| 26        | 15-10-2009        | 114           | 119        |
| 27        | 26-12-1976        | 114           | 113        |
| 28        | 12-02-2011        | 113           | 118        |
| 29        | 14-10-2020        | 113           | 120        |
| 30        | 20-01-2022        | 112           | 120        |
| 31        | 03-01-1995        | 112           | 113        |
| 32        | 07-11-1995        | 112           | 113        |
| <b>33</b> | <b>09-01-2019</b> | <b>111</b>    | <b>118</b> |
| 34        | 29-10-2018        | 110           | 117        |
| 35        | 25-12-1977        | 109           | 109        |
| 36        | 25-09-1983        | 109           | 109        |
| 37        | 09-01-2010        | 109           | 114        |
| 38        | 29-11-2010        | 109           | 114        |
| 39        | 14-01-2012        | 109           | 114        |
| 40        | 08-04-1995        | 108           | 109        |

På denne baggrund er år 2019 vurderet at være et tilstrækkeligt repræsentativt år og benyttes i beregningerne i dette projekt.



#### 4.4.2 Cyklisk gentagelse

Året 2019 gentages i beregningerne, både for beregningerne af år 2019 og for beregningerne af år 2100, som er år 2019 med klimaændringer.

Beregninger med år 2019 og med år 2100 gentages i begge tilfælde 20 gange for at opnå, at resultaterne ikke ændres meget fra gentagelse til gentagelse, se Bilag A.

Resultaterne påvirkes af dette på to forskellige måder:

- De hydrografiske karakteristika for år 2019
- Gentagelsen af år 2019 (eller år 2100)

Selvom år 2019 er et repræsentativt år, kan det ikke beskrive alle de variationer, der dækkes af mange efterfølgende år. Dette kan påvirke saltholdigheden i bundlaget i Østersøen og mere, jo dybere i bundlaget forholdene betragtes. I bundlaget udskiftes de øvre dele semikontinuert, mens de nedre lag udskiftes med længere mellemrum (der kan være op til flere års mellemrum). Således påvirkes de allernederste lag mest, men disse har også de mindste volumener og mindste horisontale udbredelser. I de sidste adskillige år har der været færre storme (se Figur 4-2) og kun få store indstrømninger til den indre Østersø, og således er betydningen aftaget. Alt i alt vurderes det derfor, at året 2019 er det bedste valg til at vise de hydrografiske ændringer, som forårsages af infrastrukturprojekterne.

Gentagelsen af år 2019 gør, at de hydrografiske ændringer fra infrastrukturprojekter udvikles fuldt ud (og at de kan identificeres meget klart). Dette tager 20 gentagelser eller 20 år. I scenarier med klimaændringer burde forholdene ændres kontinuert (og dermed også i 2019, hvor der også er klimaændringer, men det er mindre betydningsfuldt, da gradienterne for ændringerne er fladere / langsommere). Dvs. at en sådan 'balance' af hydrografien mht. klimaændringer og infrastrukturprojekter ikke vil udvikles fuldt ud, men vil halte bagefter. Således vil forholdene i år 2100 hverken være i balance med hensyn til klimaændringerne eller påvirkningen af infrastrukturprojekter (men i mindre grad for infrastrukturprojekterne). På denne måde er de hydrografiske påvirkninger fra både klimaændringer og infrastrukturprojekter svagt overvurderede i beregningerne pga. de 20 gentagelser. Det vurderes at være tilfredsstillende, da det er påvirkningerne fra klimaændringer og infrastrukturprojekter, som ønskes bestemt, og en svagt overvurderet hydrografisk ændring er acceptabel. Forsigtigt anslået svarer overvurderingen til omkring 10 - 20 års forskydning, i den forstand, at hvis klimaændringerne i 2050 påtrykkes og de hydrografiske forhold beregnes, vil de bestemte hydrografiske forhold være de der er i omkring 2060 - 2070 (se også afsnit 8.5).

#### 4.5 Vurdering af resultater

Nærværende analyseprojekt er ikke en miljøkonsekvensvurdering af den fremskudte færgehavn ved Tårs, men en undersøgelse af projektets påvirkning af vandgennemstrømningen i de danske stræder, samt de særlige strømforhold ved indsejlingen til et fremskudt færgeleje (se projektets Kommissorium). Først

efter nærværende projekt vil der blive taget stilling til, om der skal foretages en miljøkonsekvensvurdering (VVM).

Nærværende undersøgelse er derfor ikke bundet af de samme formelle krav, som gælder for en miljøkonsekvensvurdering. Uanset dette er arbejdet tydeligt inspireret af både Havstrategidirektivet og Vandrammedirektivet, se Forudsætningsnotatet (Sund & Bælt, 2024E), afsnit 6. I disse direktiver relateres der til et referencescenarie, hvor de "naturlige niveauer" anvendes som grundlag for fastlæggelse af miljømålene.

I Østersøhandleplanen (HELCOM, 2021) betragtes Østersøen integreret og holistisk, dvs. at hele Østersøens økosystem betragtes med dets tilstand og påvirkninger, og igen med henvisning til en referencetilstand. De "naturlige niveauer" er baseret på hindcast modelberegninger (cirka år 1900) og historiske data dækkende perioden 1880-1970 (dvs. før store infrastrukturprojekter og nævneværdige menneskeskabte klimaændringer). I Østersøhandleplanen kan forskellige påvirkninger sammenlignes. Dette er i god tråd med moderne kystzoneforvaltning og en grundlæggende del af den metode, der benyttes i "Integrated Coastal Zone Management" (ICZM). I nærværende arbejde benyttes også en integreret og holistisk betragtning i den forstand, at hele Østersøen betragtes, inklusive påvirkninger fra både infrastrukturprojekter og klimaændringer.

I denne rapport beskrives ændringerne af de hydrografiske forhold, der er forårsaget af de undersøgte infrastrukturprojekter og klimaændringer.

Både infrastrukturprojekter og klimaforandringer kan ændre de hydrografiske forhold, som igen kan påvirke de økologiske forhold i Østersøen. I sig selv betragtes ændringerne af de hydrografiske forhold ikke som af afgørende betydning for Østersøens økosystem. Derimod betragtes det som afgørende, hvorledes de hydrografiske forholds ændringer påvirker økosystemet i Østersøen. For eksempel vil en stigning af vandtemperaturen bevirke et mindre iltindhold og et hurtigere forbrug af ilten i havvandet, og altså en påvirkning fra temperaturen mod iltfattigere forhold i bundlagene i Østersøen. Det afgørende for Østersøen er således de mere iltfattige forhold og i mindre grad temperaturstigningen i sig selv. Derfor vurderes de hydrografiske ændringer ikke at have afgørende betydning for vurderingen af påvirkningen på Østersøen i sig selv. De hydrografiske ændringers påvirkning af økosystemet i Østersøen beskrives i en parallel rapport, der omhandler økologien i Østersøen (Sund & Bælt, 2025B), hvor også andre miljøpåvirkninger end den hydrografiske ændring inddrages, ikke mindst forøgede nærringsaltstilførsler.

## 5 Hydrografisk påvirkning i Langelandsbælt

### 5.1 Baggrund

Langelandsmodellen benyttes til vurdering af (se evt. Afgrænsningsnotatet (Sund & Bælt, 2024D), afsnit 3.3 og 3.6):

- Havnens udformning
- Kystpåvirkning

Vurderingen af disse forhold baseres på ét års (2019) hydrodynamiske beregningsresultater fra Langelandsmodellen.

Optimering af den fremskudte havns udformning omfatter placering og orientering af den kunstige ø og af adgangsvejen bestående af lavbroer og dæmning (deres placering, længder og geometri). Disse optimeres i forhold til strømningsmodstand, som undersøges i denne rapport, men også i forhold til besejlings- og manøvreforhold og bølgeuro i havnen, og under hensyntagen til den fremskudte færgehavns økonomi (se Sund & Bælt, 2025C).

Aflejring og erosion langs kysten, som følge af de ændrede hydrodynamiske forhold, er vurderet, for eksempel læsideerosion, og om der er behov for kystbeskyttelse. Beregningerne med Langelandsmodellen viser bundfriktionen og bølgerne langs kysten med og uden den fremskudte havn. Dette giver et godt grundlag for at vurdere ændringerne af det lokale kystområde.

### 5.2 Havnens udformning

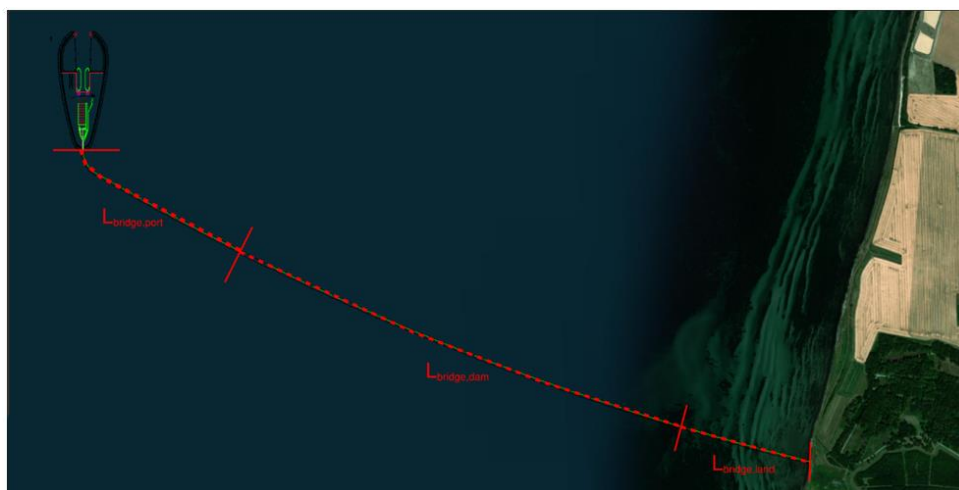
#### 5.2.1 Undersøgelse af alternative udformninger

Der er gennemført en omfattende undersøgelse af forskellige udformninger af den fremskudte havn, dvs. af den kunstige ø og kombinationer af broer og dæmning. Udformningerne er afgrænsede, som vist i listen nedenfor (det bemærkes, at for udformningerne 4 og 5 blev åbningspositionerne ændret til dem i udformningerne 6 og 7, og af denne årsag vises resultaterne for udformning 4 og 5 ikke):

- Reference: Eksisterende forhold (ingen ø, ingen dæmning, ingen bro)
- Udformning 1: Oprindelig ø med havn og hel dæmning på hele strækningen, se Sund & Bælt (2018).
- Udformning 2: Oprindelig ø med havn og dæmning på strækningen med to åbninger, se Sund & Bælt (2018).
- Udformning 3: Dråbeformet havn og en lang bro på hele strækningen.
- Udformning 6: Elliptisk havn og dæmning med to åbninger.
- Udformning 7: Elliptisk havn, åbning drejet mod nord, og dæmning med to åbninger.

- Udformning 8: Øen har samme form som i udformning 7. Lavbroerne har 40 m mellem understøtningerne, og pillernes diameter er 1,0 m.
- Udformning 9: Har samme udformning som udformning 7, men broen ved havnen er afkortet fra 800 m til 600 m, hvilket øger dæmningens længde fra 2100 m til 2300 m.
- Udformning 10: Øen er flyttet cirka 900 m mod land, broens længde til havnen ændret til 450 m og dæmningens længde er 1575 m.

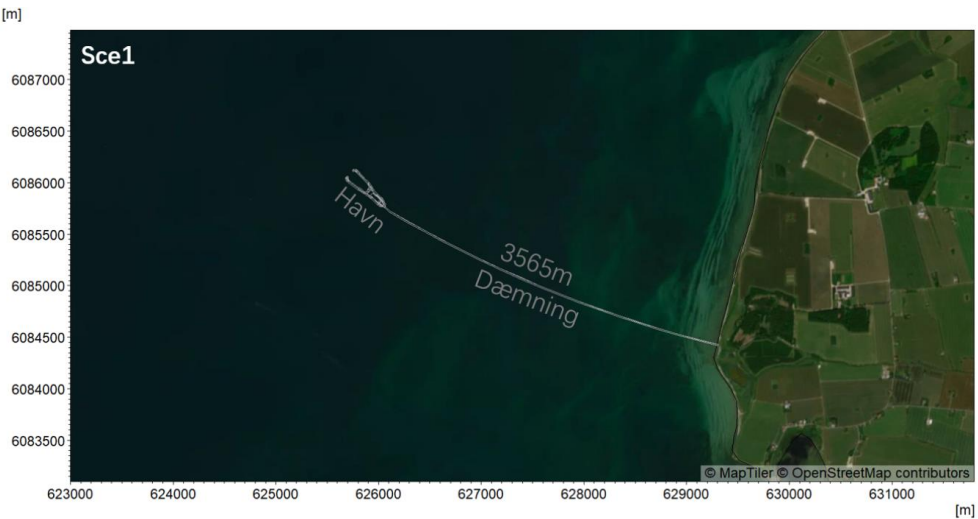
En generel udformning af den fremskudte havn og adgangsvej er vist i Figur 5-1. Detaljer omkring de betragtede udformninger er vist i Tabel 5-1, mens Figur 5-2 viser detaljer for de betragtede udformninger. Broens konstruktioner på vand er vist i Figur 5-3. Bortset fra udformning 8 var udformningerne med en eller flere lavbroer med 25 meter mellem understøtningerne og tre piller pr. understøtning. Hver pille har en diameter på 0,8 m, og der er en afstand mellem dem på tværs af broen på 5 m. I udformning 8 er der 40 m mellem understøtningerne, og pillernes diameter er 1,0 m. Den marine begroning antages at være 0,1 m.

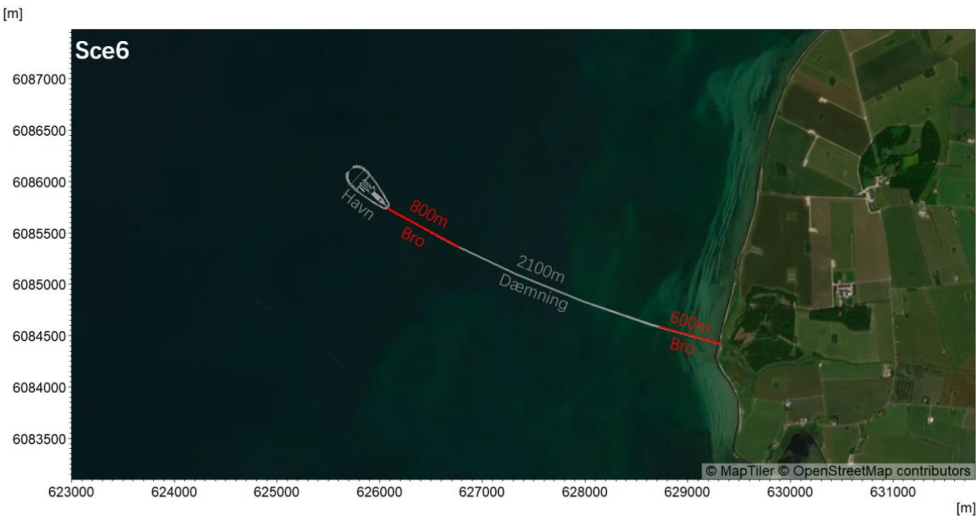


Figur 5-1 General udformning af den fremskudte havn og adgangsvej.

Tabel 5-1 Detaljer for de undersøgte udformninger. L er Længde.

| No | Udformning                 | Bro spænd [m] | Pille diame-ter [m] | Lbro, havn [m] | Lbro, land [m] | Ldæm [m] | Ltot [m] |
|----|----------------------------|---------------|---------------------|----------------|----------------|----------|----------|
| 1  | Alternativ A               | -             | -                   | -              | -              | 3565     | 3565     |
| 2  | Alternativ B               | 25            | 0.8                 | 800            | 425            | 2340     | 3565     |
| 3  | Alternativ 3.1             | 25            | 0.8                 | 1782.5         | 1782.5         | 0        | 3565     |
| 6  | Alternativ 3 Plan Ver. 0.5 | 25            | 0.8                 | 800            | 600            | 2100     | 3500     |
| 7  | Alternativ 2 Plan Ver. 0.4 | 25            | 0.8                 | 800            | 600            | 2100     | 3500     |
| 8  | Alternativ 2 Plan Ver. 0.4 | 40            | 1                   | 800            | 600            | 2100     | 3500     |
| 9  | Alternativ 2 Plan Ver. 0.4 | 25            | 0.8                 | 600            | 600            | 2300     | 3500     |
| 10 | Alternativ 4 Plan Ver. 0.1 | 25            | 0.8                 | 450            | 600            | 1575     | 2625     |

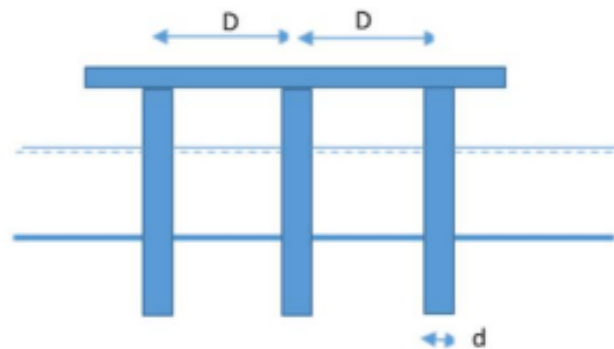








Figur 5-2 Skitser af de undersøgte udformninger.



Figur 5-3 Skitse af snit i bro.

## 5.2.2 Strømme

### Maksimal nordgående strøm

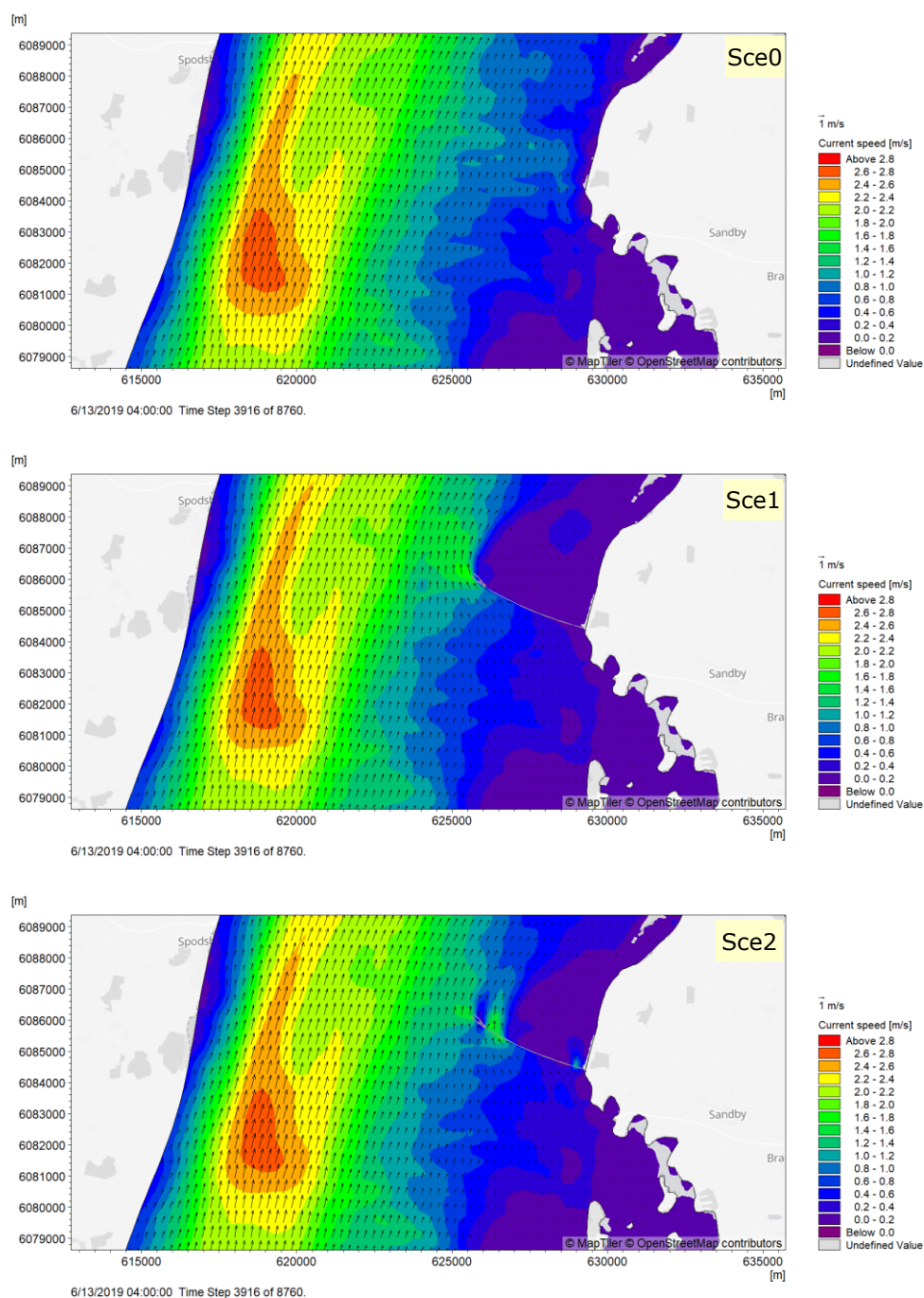
Nordlig strøm gennem Langelandsbælt er maksimal den 13. juni 2019 klokken 04:00 (UTC-tid).

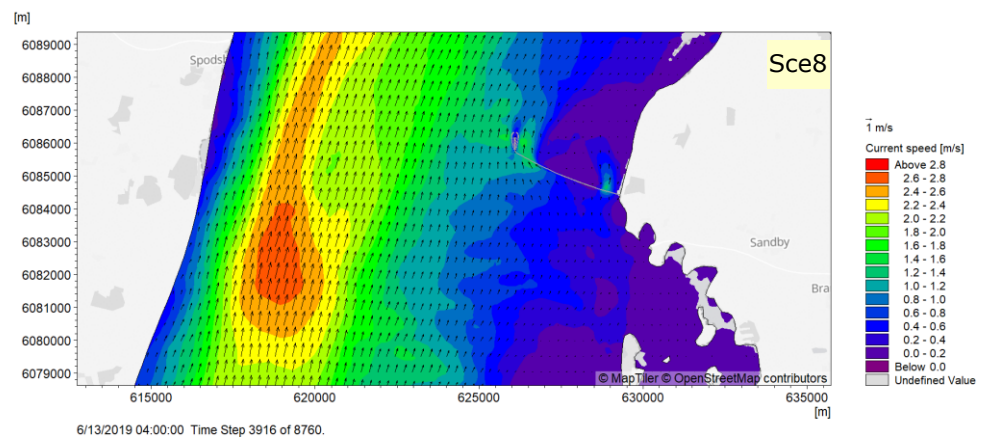
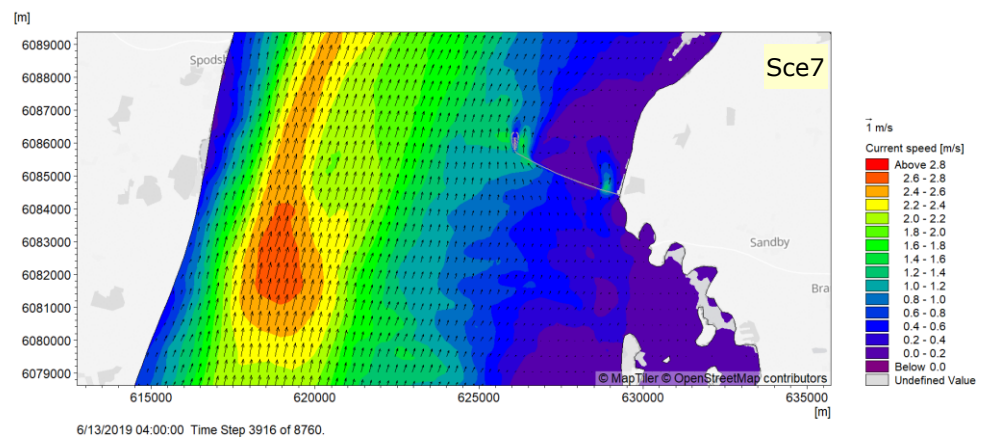
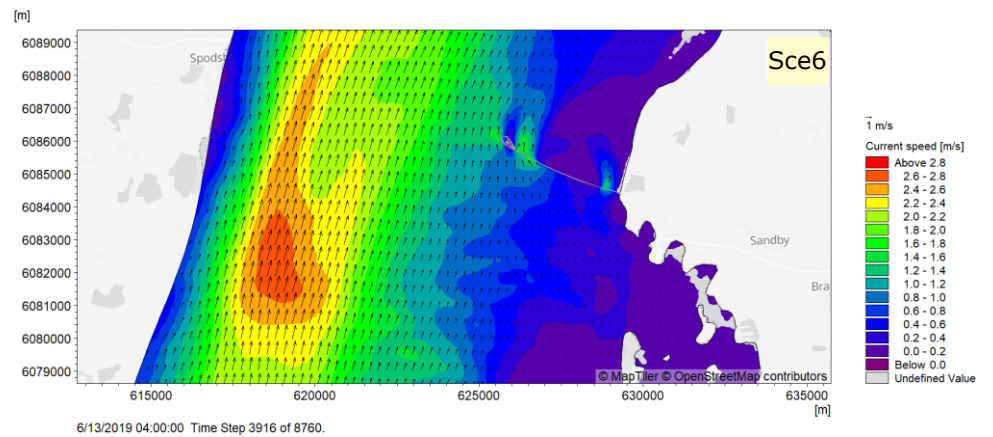
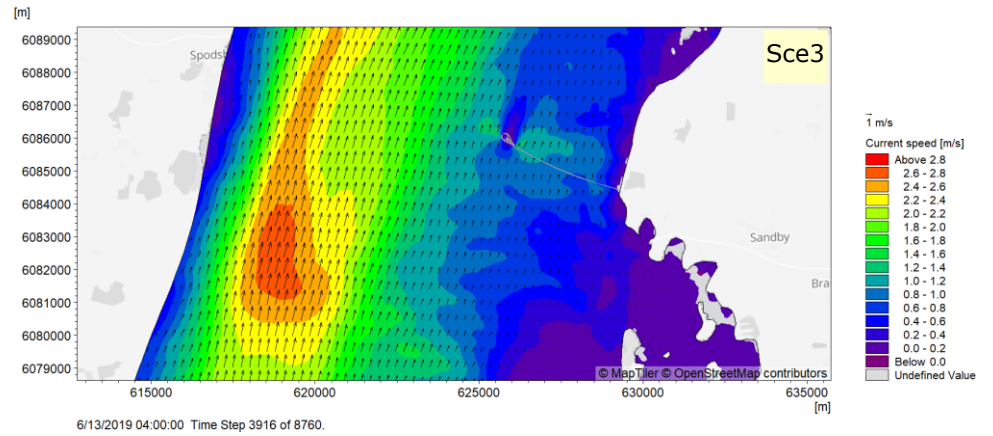
Figur 5-4 viser den maksimale nordgående strømhastighed for referencescenariet og med de betragtede udformninger. Figur 5-5 viser ændringen i strømmene (i forhold til referencescenariet) for de undersøgte udformninger.

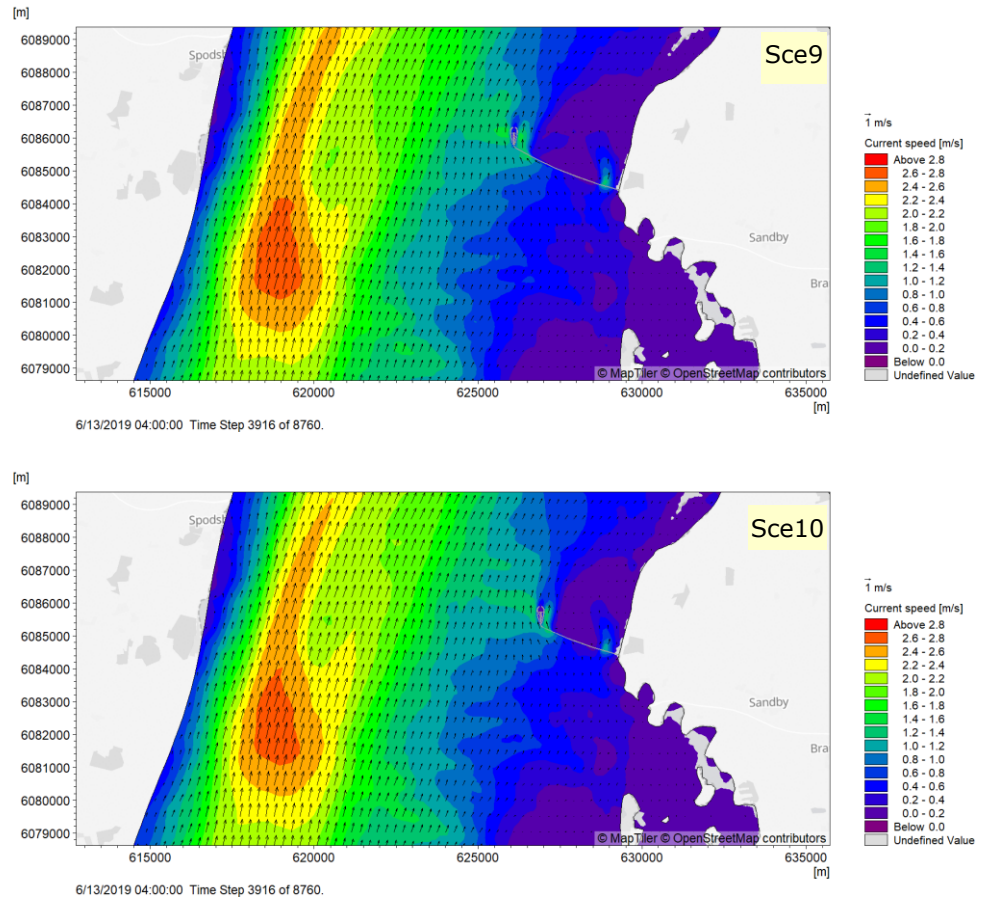
Strømfordelingerne og ændringerne viser, at havnen påvirker strømfelterne og giver læzoner ved den kunstige ø og dæmning og koncentreret strømning gennem broerne og omkring øen.

Sammenlignes udformning 6 og 7 ses det, som forventet, at en drejning af øen mod nord mindsker påvirkningen fra øen og giver mindre vandføringsændringer.

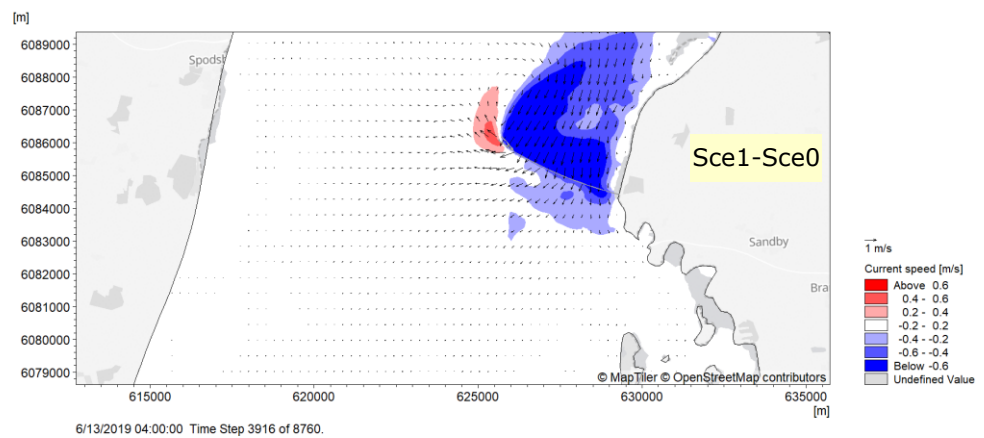
Sammenlignes udformning 7 og 8 ses det, at effekten af en større afstand mellem større bropillerne er begrænset.

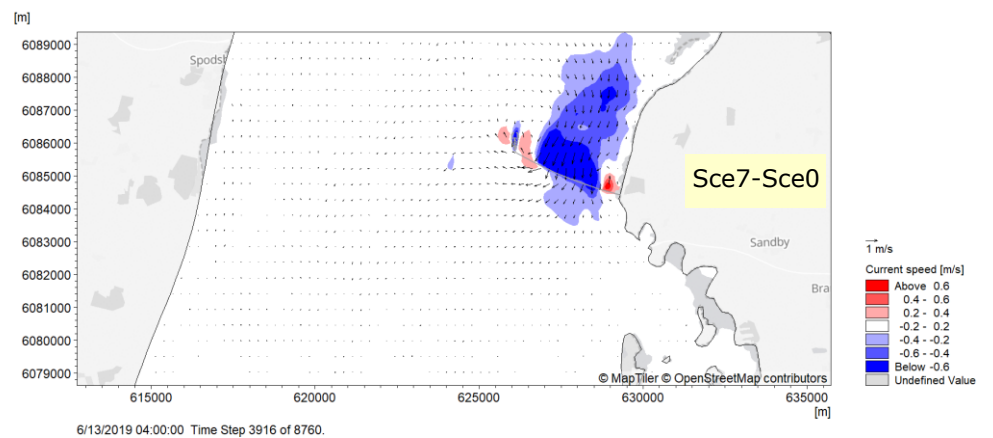
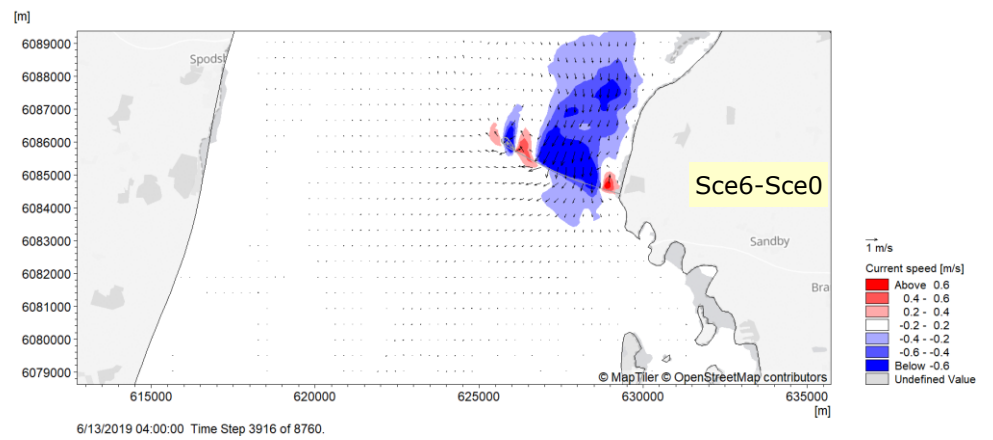
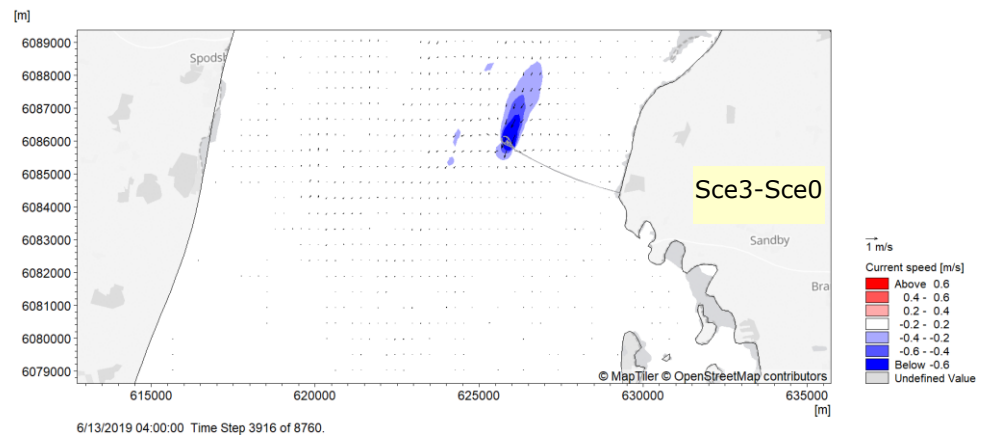
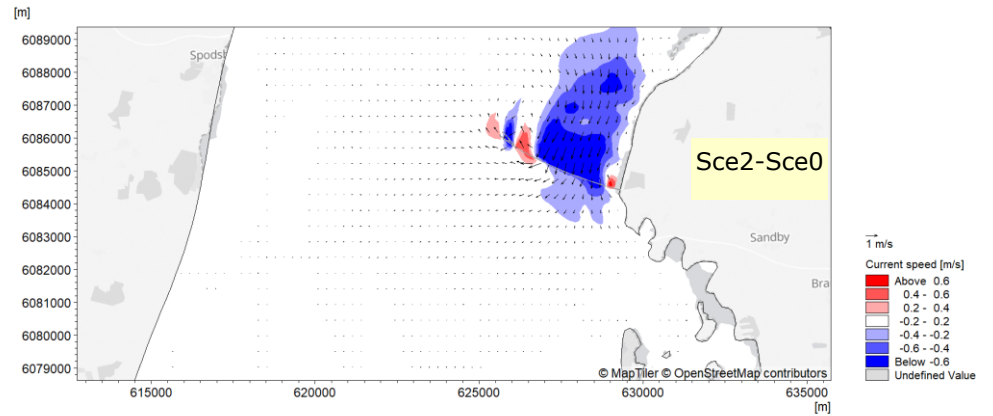




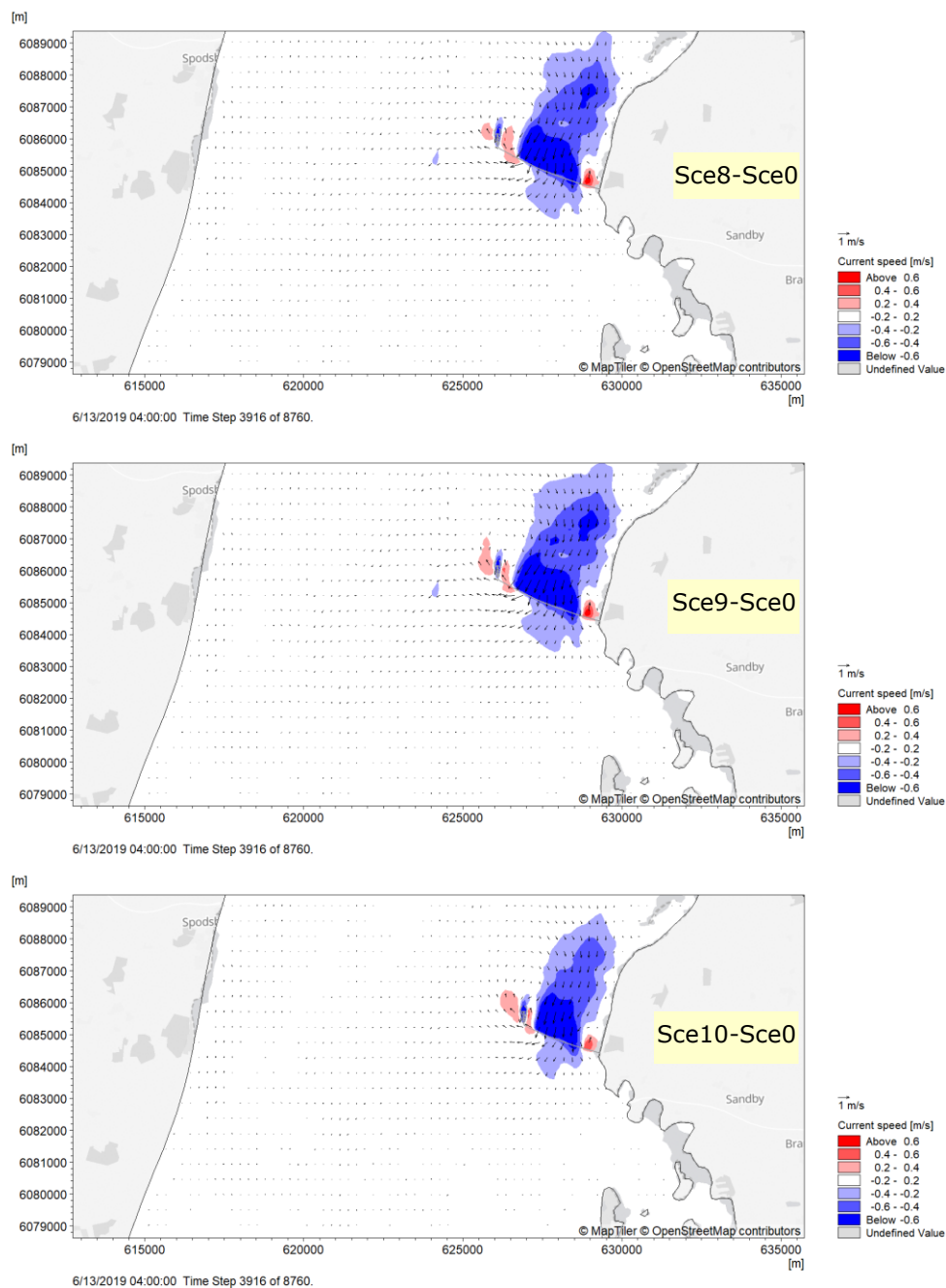


Figur 5-4 Maksimal nordgående strøm med de undersøgte udformninger.









Figur 5-5 Strømændring ved maksimal nordgående strøm for de undersøgte udformninger (strøm uden havn er fratrasket i hvert tilfælde).

### Maksimal sydgående strøm

Sydlig strøm gennem Langelandsbælt er maksimal den 29. november 2019 klokken 14:00 (UTC-tid).

Figur 5-6 viser den maksimale sydgående strømhastighed for referencescenariet og med de undersøgte udformninger. Figur 5-7 viser ændringen i strømmene (i forhold til referencescenariet) for de undersøgte udformninger.

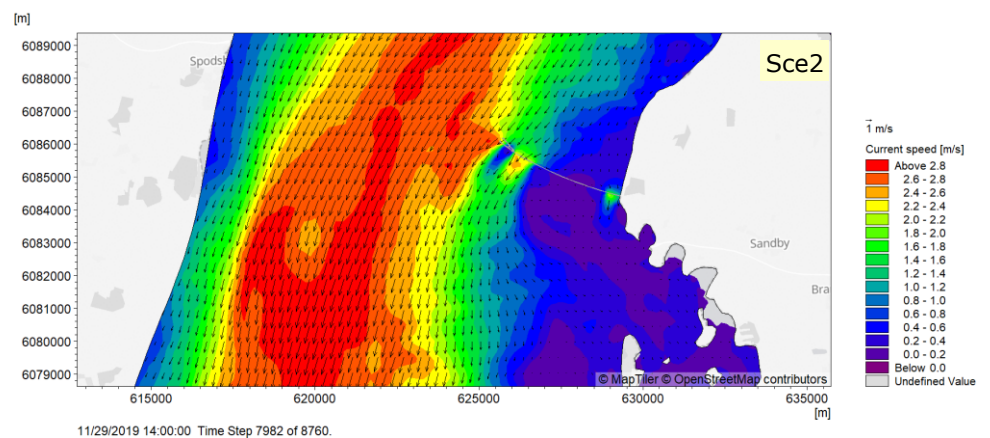
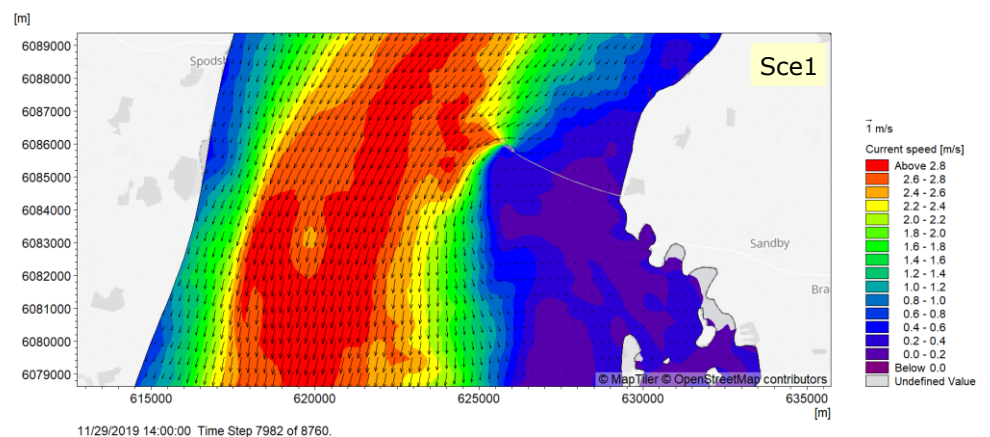
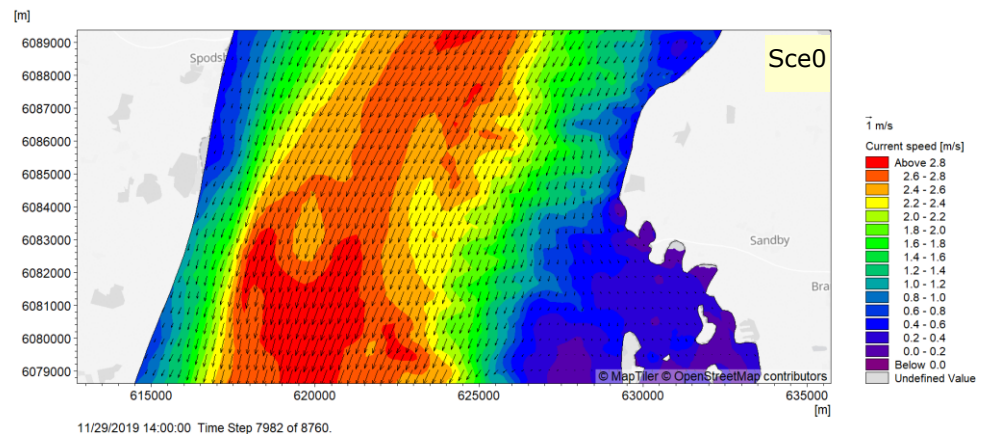
Strømfordelingerne og ændringerne viser, som for nordgående strøm, men lidt mindre udtalt, at havnen påvirker strømfelterne og giver læzoner ved den

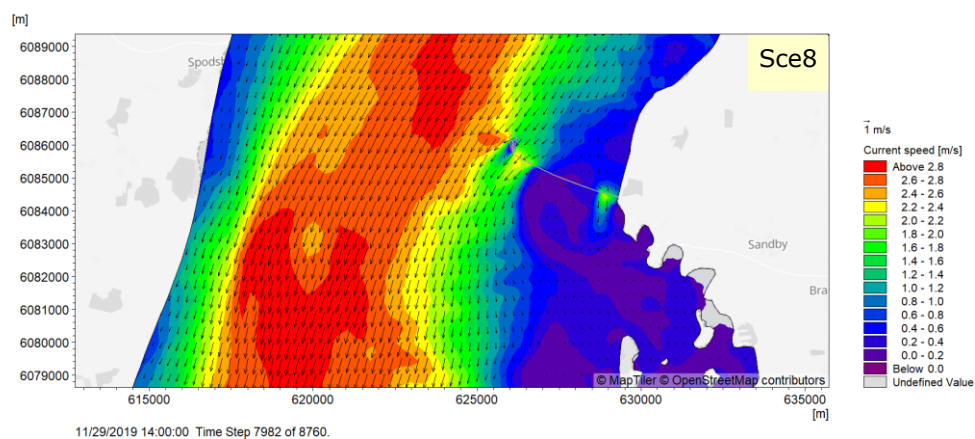
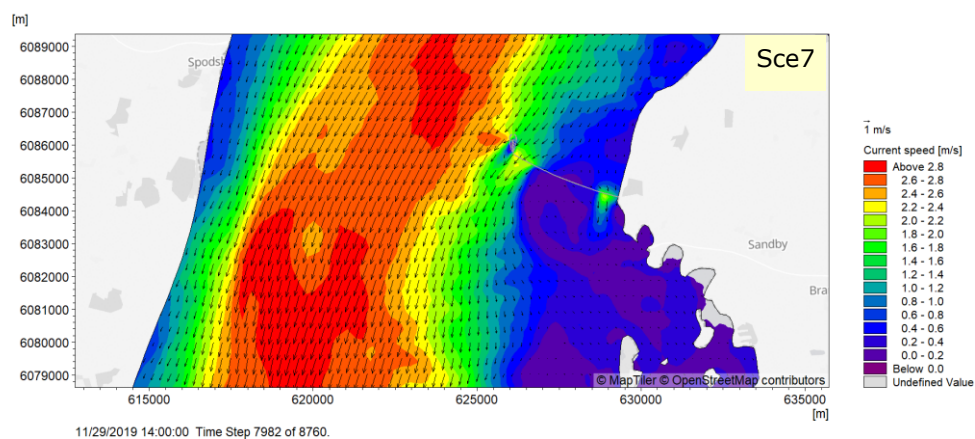
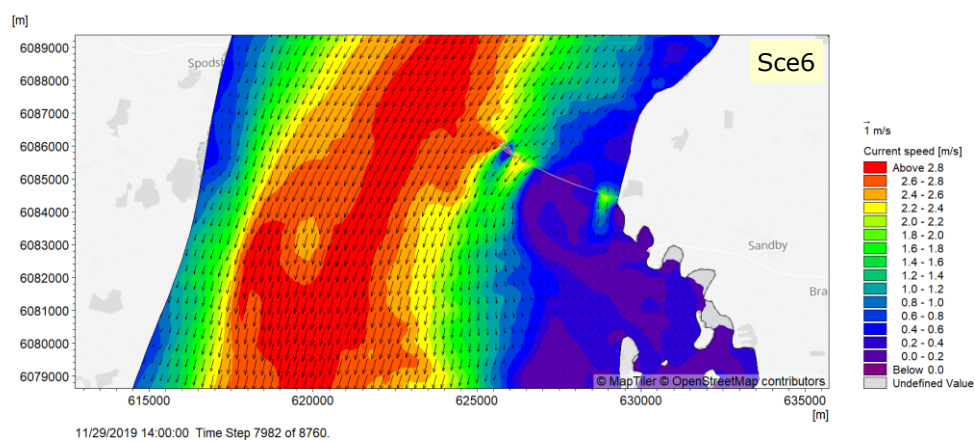
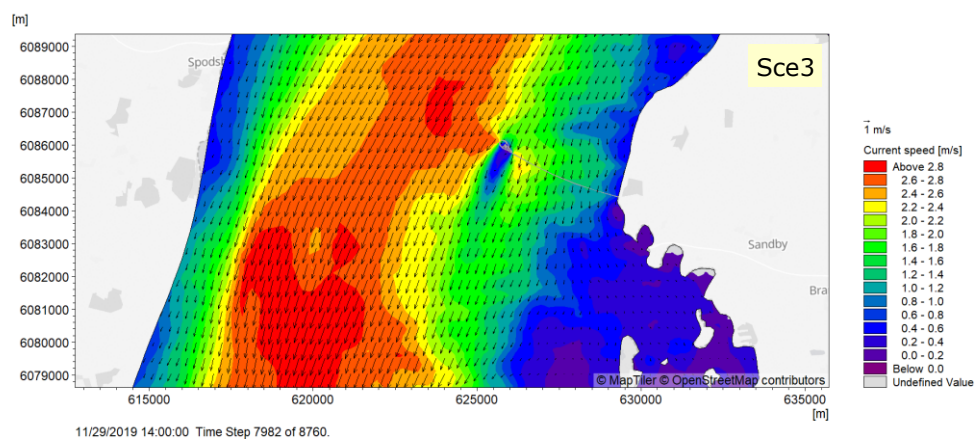


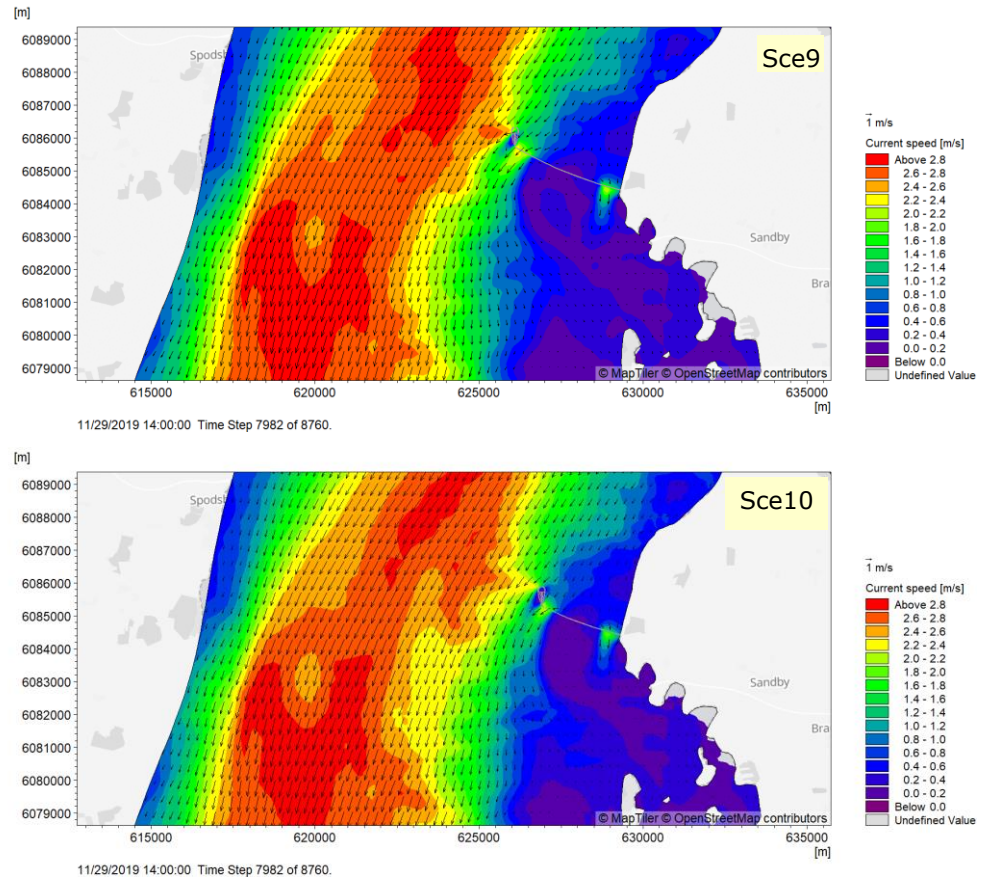
kunstige ø og dæmning og koncentreret strømning gennem broerne og omkring øen.

Sammenlignes udformning 6 og 7 ses det, som forventet, at en drejning af øen mod nord mindsker påvirkningen fra øen og giver mindre strømændringer.

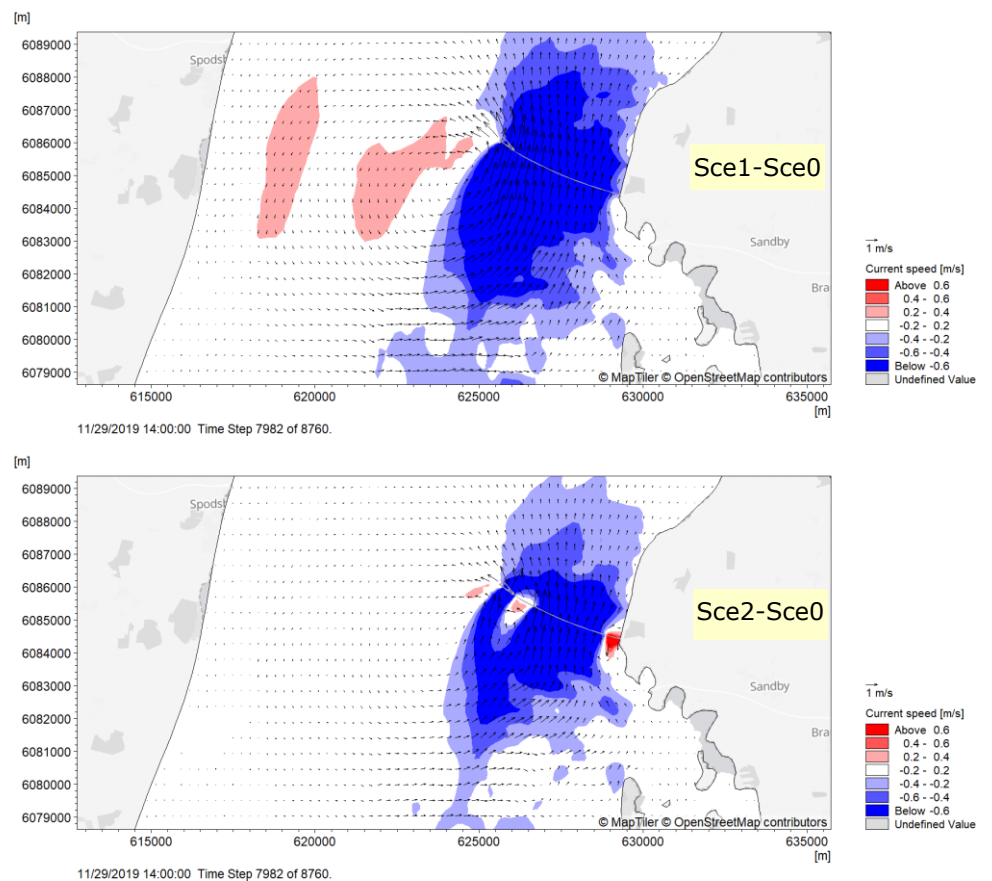
Sammenlignes udformning 7 og 8 ses det, at effekten af en større afstand mellem større bropillerne er begrænset.



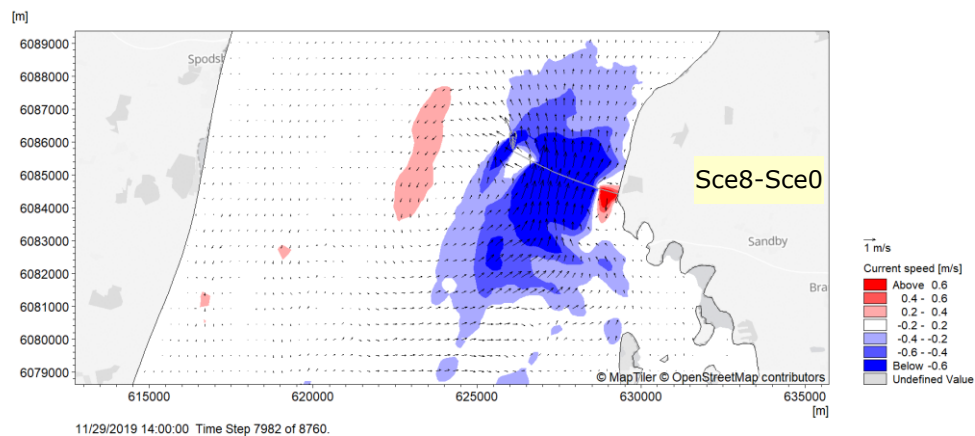
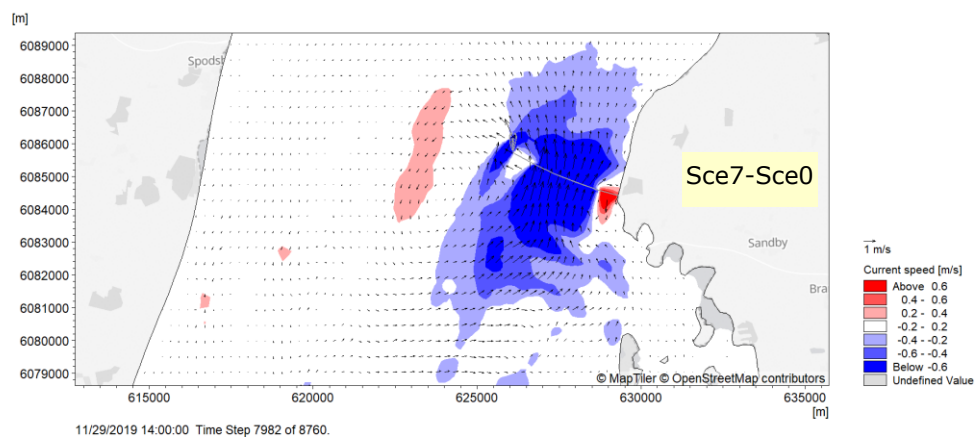
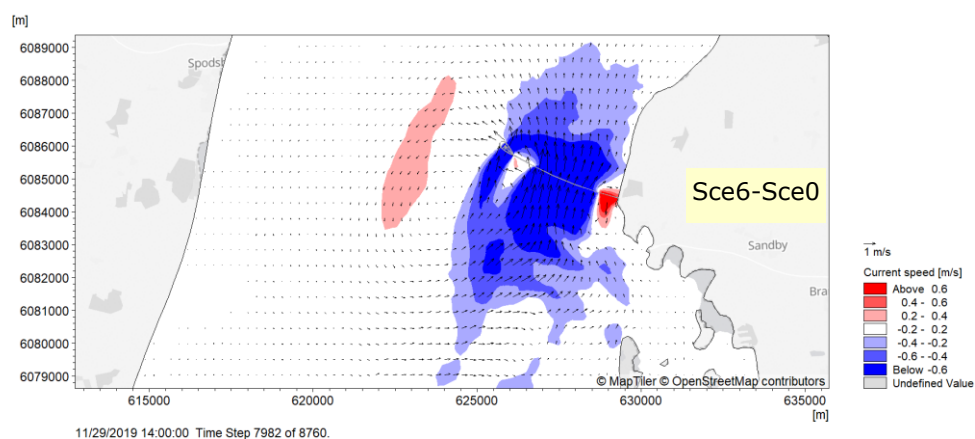
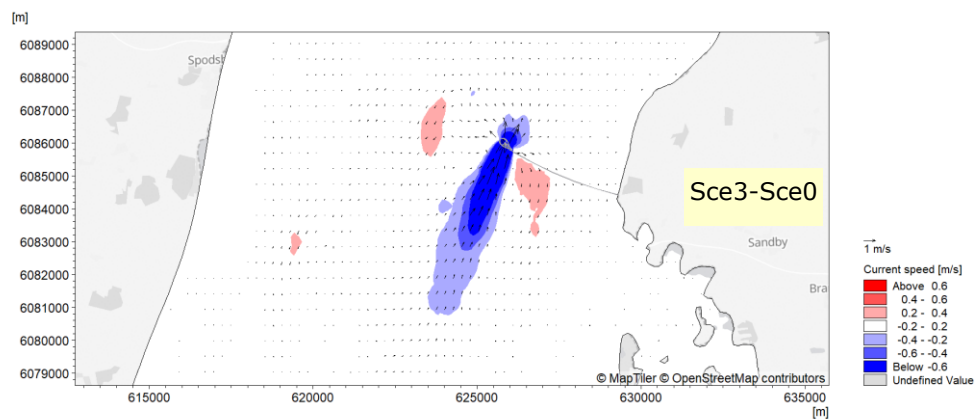


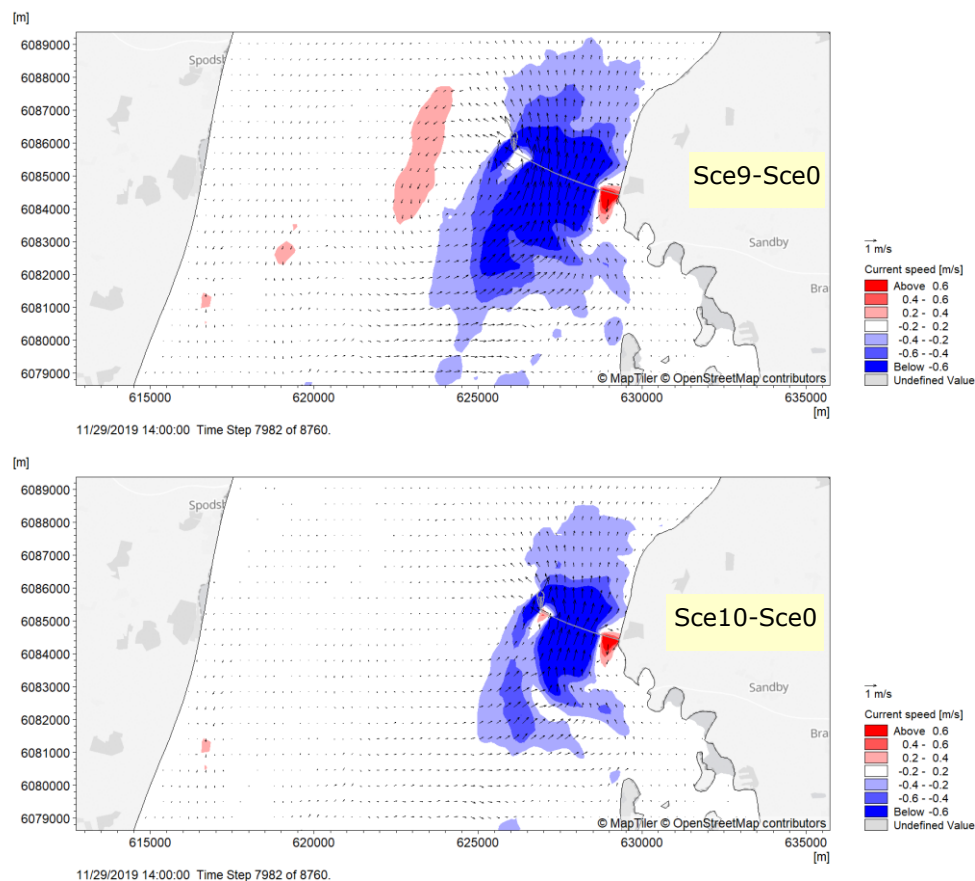


Figur 5-6 Maksimal sydgående strøm med de undersøgte udformninger.









Figur 5-7 Strømændring ved maksimal sydgående strøm for de undersøgte udformninger (strøm uden havn er fratrasket i hvert tilfælde).

### 5.2.3 Vandføringsændring (brutto)

Undersøgelsen fokuserer på den vandføringsændring, som vil indstille sig ved anlæg af en ny færgehavn i Langelandsbælt. Det er væsentligt at bestemme, hvorledes vandføringsændringen varierer med forskellige kombinationer af lavbro og dæmning, samt med forskellige former af øen. Dette sammen med havnens funktion og økonomien afgør, hvilken udformning der vurderes at være mest attraktiv.

Det er vigtigt at bemærke, at vandførings- og salttransportændringen angiver ændringen i bruttotransporten, som er forskellig fra ændringen i nettotransporten.

#### Beregning

Vandføringsændringen (brutto) er beregnet med den formel, som blev benyttet for de tidligere forbindelser i de danske farvande, se for eksempel Møller & Ottesen Hansen (1988), Farmer & Møller (1990) og Ottesen Hansen & Møller (1990). En vandføringsændring påvirker vandcirkulationen og opholdstiden i den indre Østersø og dermed også økosystemet. Dette gør vandføringsændringen til en væsentlig parameter af interesse for forbindelsernes påvirkning af forholdene i den indre Østersø, og den er også benyttet i planlægningen af tidligere forbindelser. Beregningen af vandføringsændringen (brutto) baseres på denne formel:

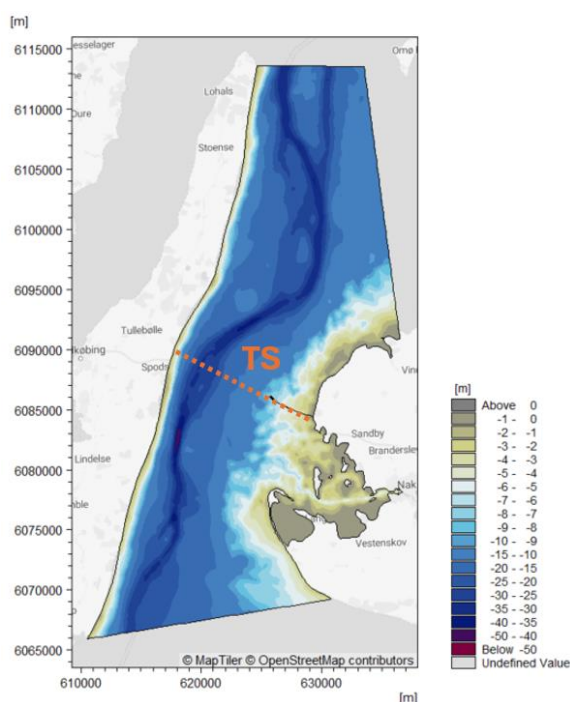
$$\Delta Q(T) = \frac{\int_0^T (|Q_{scenario}(t)| - |Q_{ref}(t)|) dt}{\int_0^T |Q_{ref}(t)| dt}$$

hvor  $Q_{ref}$  og  $Q_{scenario}$  er de øjeblikkelige vandføringer gennem et tværsnit, i dette tilfælde tværsnit TS nær Tårs (vist i Figur 5-8), for reference og med den betragtede udformning af havnen (scenariet).

Salttransportændringen (brutto) er beregnet baseret på denne formel:

$$\Delta Q_s(T) = \frac{\int_0^T (|Q_{scenario}(t)| - |Q_{ref}(t)|) dt}{\int_0^T |Q_{ref}(t)| dt}$$

hvor  $Q_{s,ref}$  og  $Q_{s,scenario}$  er de øjeblikkelige salttransporter gennem et tværsnit, i dette tilfælde tværsnit TS nær Tårs.



Figur 5-8 Tværsnit TS (for Tårs-Spodsberg) på tværs af Langelandsbælt.

### Vandførings- og salttransportændringer

Vandføringsændringerne for de undersøgte udformninger af havnen er vist i Tabel 5-2. Denne tabel indeholder ændring for både vandføring og salttransport.

Modellen af Langelandsbælt er for lille til at bestemme vandføringsændringen korrekt. Dette skyldes, at de åbne rande ikke er i et upåvirket område i Kattegat og Arkona Bassinet. Derfor bliver den beregnede vandføringsændring ikke helt korrekt. Vandføringsændringen for udformning 6 er i afsnit 6.2 bestemt mere korrekt med modellen af Bælthavet. Denne ændring (−0,49% for vandføring og −0,27% for salttransport, se afsnit 6.2) er benyttet til at skalere ændringerne, der er bestemt med modellen af Langelandsbælt. Denne skalerede vandføringsændring er en mere korrekt vandføringsændring for udformningerne.

For udformning 1 findes den største (numeriske) ændring af vandføring på −1,21%, mens den mindste (numeriske) findes for udformning 3 på −0,19%.



For salttransporten er ændringerne fra  $-0,72\%$  til  $-0,11\%$ .

Ændringerne afhænger af tre dele af havnen (og deres interaktion): den kunstige ø, dæmning og bro. Jo mere øen strømlines og drejes mod nord, desto mindre er påvirkningen fra øen. Tilsvarende, jo kortere dæmning og jo længere bro, desto mindre er påvirkningen fra adgangsvejen til øen. Dette ses i resultaterne for ændringerne.

I de efterfølgende analyser anvendes den udformning af den fremskudte havn, der giver den største (numeriske) vandføringsændring af de optimerede udformninger, som forventes at blive undersøgt i det videre arbejde. Derfor er analyserne udført med udformning 6. Resultaterne for denne udformning kan efterfølgende benyttes til interpolation for bestemmelse af påvirkning fra andre udformninger.

Tabel 5-2 Vandførings- og salttransportændring (begge brutto) for de undersøgte udformninger.

| Udformning | $\Delta Q$<br>( $10^{10} \text{ m}^3$ )  | $Q_{\text{ref}}$<br>( $10^{12} \text{ m}^3$ ) | Ændring<br>(%) | Ændring<br>skaleret<br>(%) |
|------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------|----------------------------|
| 1          | -2,71                                    | 2,34                                          | -1,16          | -1,21                      |
| 2          | -1,51                                    | 2,34                                          | -0,64          | -0,67                      |
| 3          | -0,42                                    | 2,34                                          | -0,18          | -0,19                      |
| 6          | -1,09                                    | 2,34                                          | -0,47          | <b>-0,49</b>               |
| 7          | -0,77                                    | 2,34                                          | -0,33          | -0,34                      |
| 8          | -0,76                                    | 2,34                                          | -0,33          | -0,34                      |
| 9          | -0,93                                    | 2,34                                          | -0,40          | -0,42                      |
| 10         | -0,53                                    | 2,34                                          | -0,23          | -0,24                      |
| Udformning | $\Delta Q_s$<br>( $10^{11} \text{ kg}$ ) | $Q_{s\text{ref}}$<br>( $10^{13} \text{ kg}$ ) | Ændring<br>(%) | Ændring<br>skaleret<br>(%) |
| 1          | -3,46                                    | 3,93                                          | -0,88          | -0,72                      |
| 2          | -1,97                                    | 3,93                                          | -0,50          | -0,41                      |
| 3          | -0,62                                    | 3,93                                          | -0,16          | -0,13                      |
| 6          | -1,30                                    | 3,93                                          | -0,33          | <b>-0,27</b>               |
| 7          | -0,77                                    | 3,93                                          | -0,19          | -0,16                      |
| 8          | -0,76                                    | 3,93                                          | -0,19          | -0,16                      |
| 9          | -0,96                                    | 3,93                                          | -0,24          | -0,20                      |
| 10         | -0,51                                    | 3,93                                          | -0,13          | -0,11                      |

### 5.3 Kystpåvirkning

Udformning 6 vurderes med hensyn til havnens påvirkning på kysten. Havnen vil påvirke strøm og bølger, som igen kan påvirke materialetransporten langs kysten, herunder kysterosion og aflejring, ikke mindst under storme.

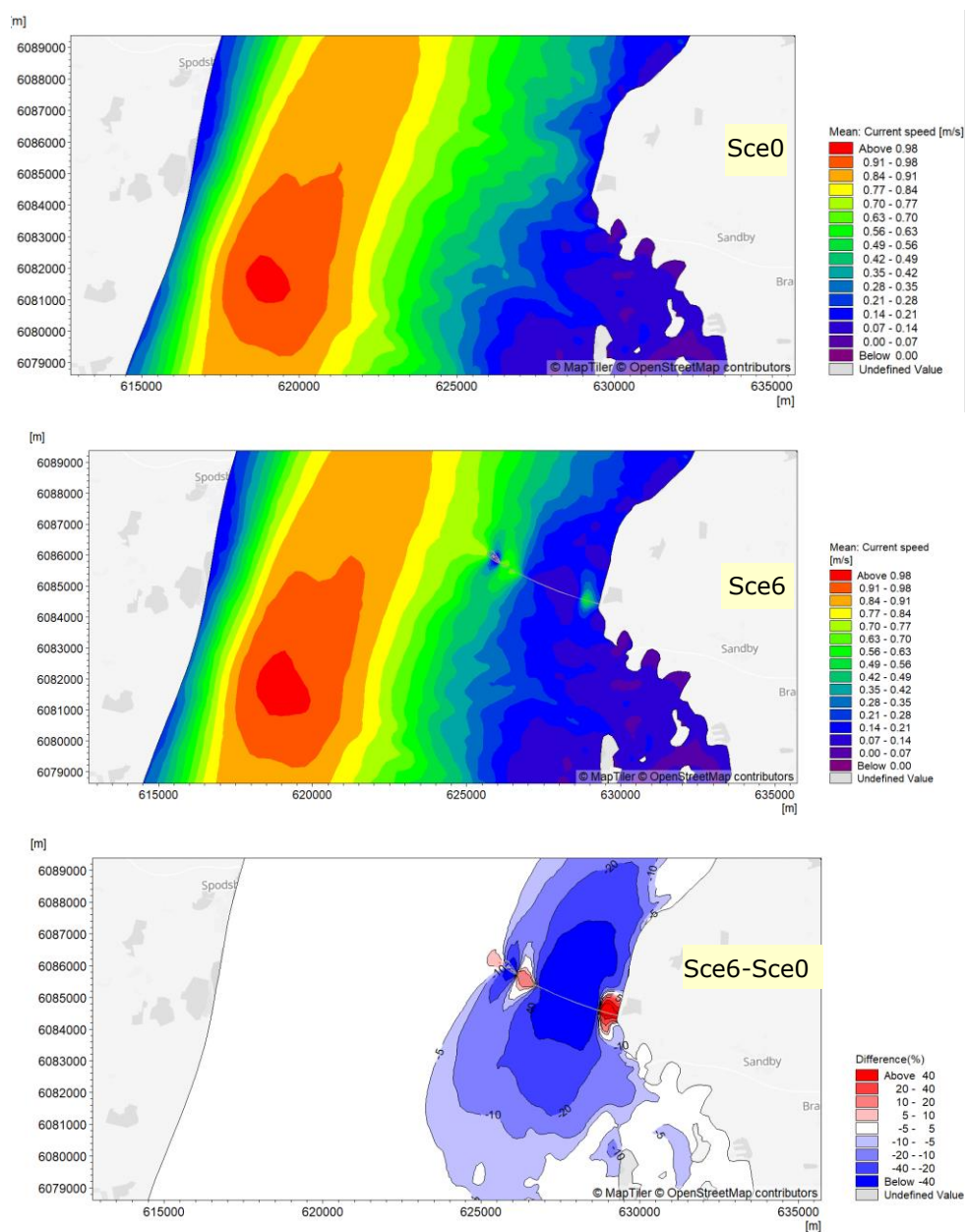
Også langs havnens udstrækning kan der opstå erosion og aflejring.

I vurderingen af påvirkningen på kysten kombineres beregninger af strømme, bølger og viden om sedimenttransport. Igen beregnes hele 2019 med og uden havnen. Dette muliggør en vurdering af ændringer i strømme, bølger og bundfriktioner langs kysten og således potentialet for kysterosion og også for aflejring langs kysten.

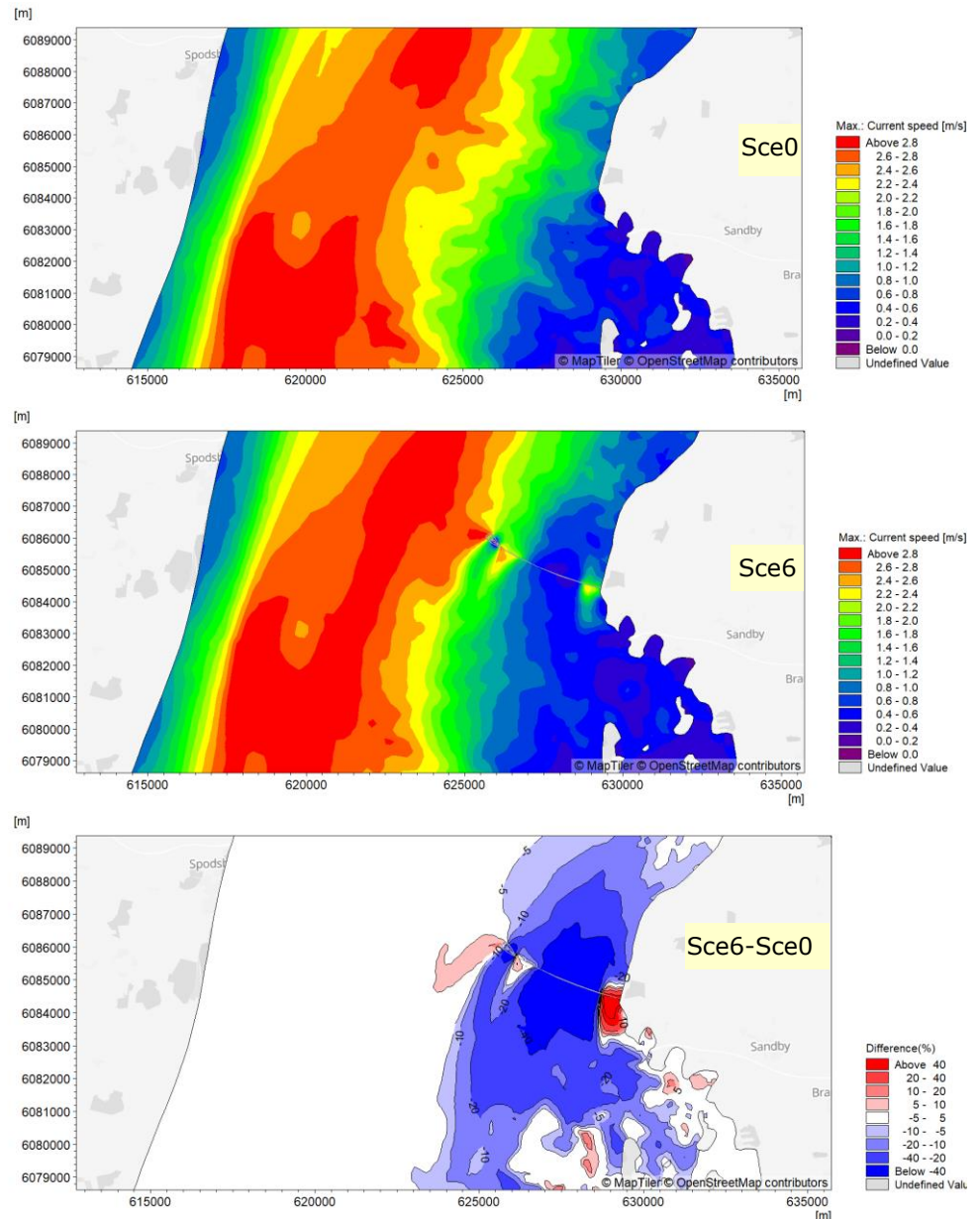
### 5.3.1 Strømændring

I referencesituationen er strømmen i området relativt jævn i Langelandsbælts retning, og strømhastighederne primært bestemt af bundforholdene. Når havnen indregnes, medfører det en ændring i strømningsmønsteret, se Figur 5-9 og Figur 5-10. Øen og dæmningen hindrer passagen af vand. Lavbroernes begrænsede åbninger bevirker, at vandstrømningen accelereres gennem broåbningerne. Omkring øen og i broåbningerne genereres der lokalt kraftigere strømme. Således skabes der både lokale områder med kraftigere strøm og lokale områder med svagere strøm.

Sammenlignet med referencesituationen viser ændringerne i strømhastigheden langs kystlinjen, at reduktioner og forøgelse er mindre end 30% for både middel- og maksimum-strømhastigheder.



Figur 5-9 Middel hastigheder med og uden havn og den procentvise ændring i strøm-  
hastigheder.

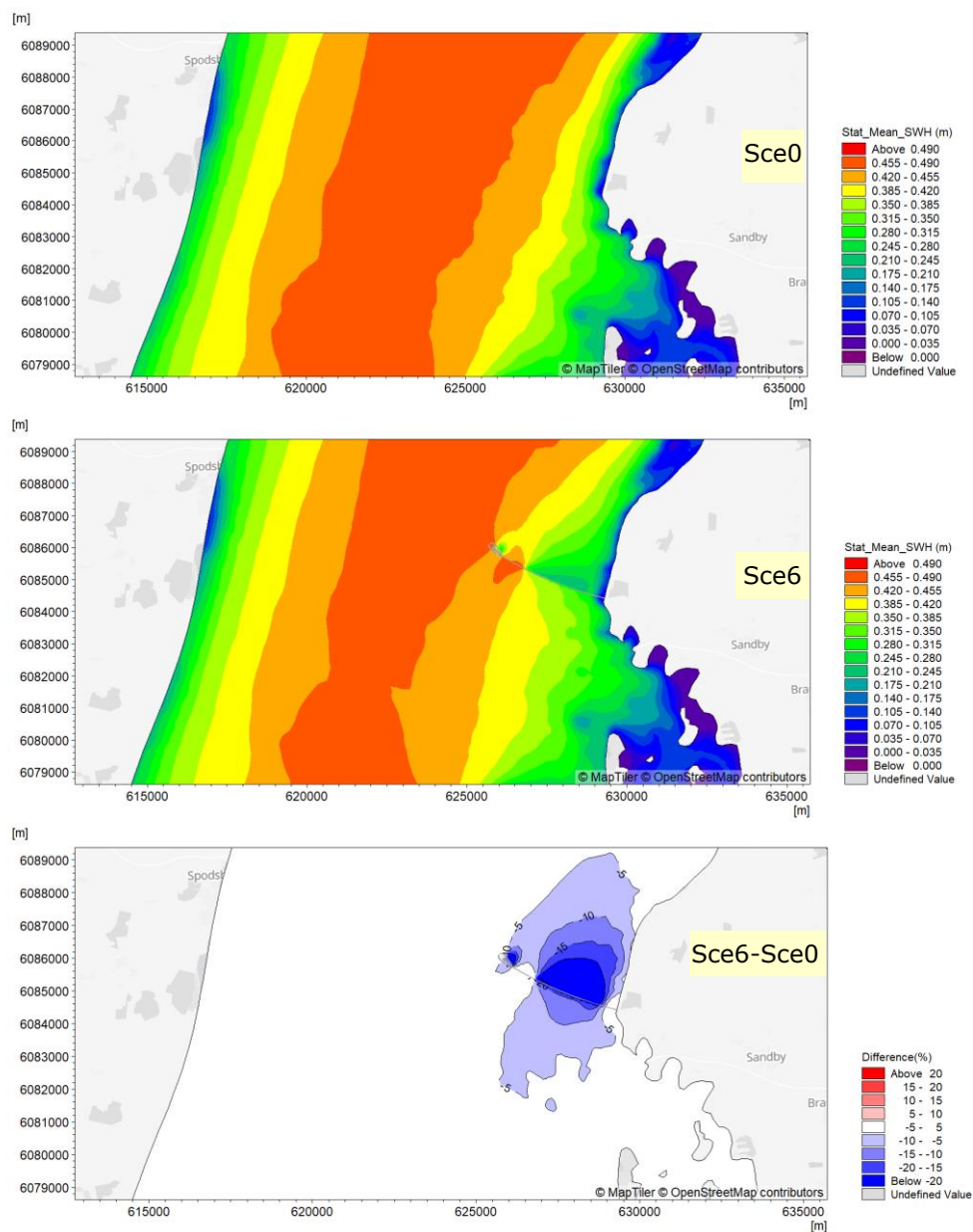


Figur 5-10 Maksimumshastigheder med og uden havn og den procentvise ændring i strømhastigheder.

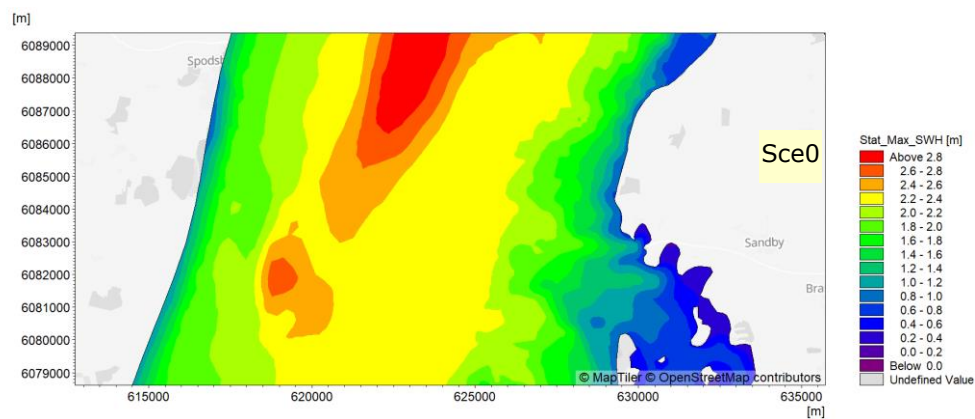
### 5.3.2 Bølgeændringer

I lighed med ændringerne for strømme introducerer havnen også ændringer i bølgeforholdene (udtrykt ved den signifikante bølge), se Figur 5-11 og Figur 5-12. Ikke blot hindres passagen af bølgerne, men de reflekteres og afbøjes (diffraktion) også. Således afskærmes og mindskes bølgerne nedstrøms havnen.

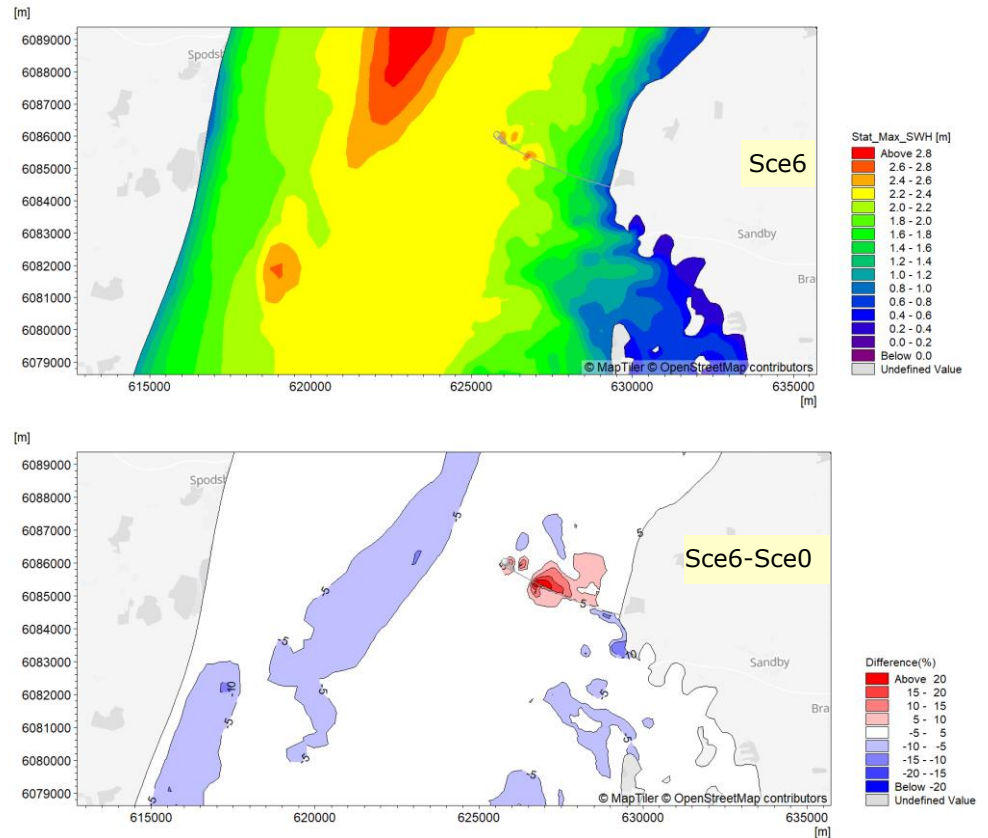
Ændringen i bølgeforholdene (udtrykt ved den signifikante bølgehøjde) langs kysten viser, at middel bølgehøjden falder med mindre end 20%, se Figur 5-11. Den maksimale bølgehøjde ændres ikke nord for havnen, og falder med mindre end 20% syd for havnen, se Figur 5-12.



Figur 5-11 Middel signifikant bølgehøjde med og uden havn og procentvis ændring af den.



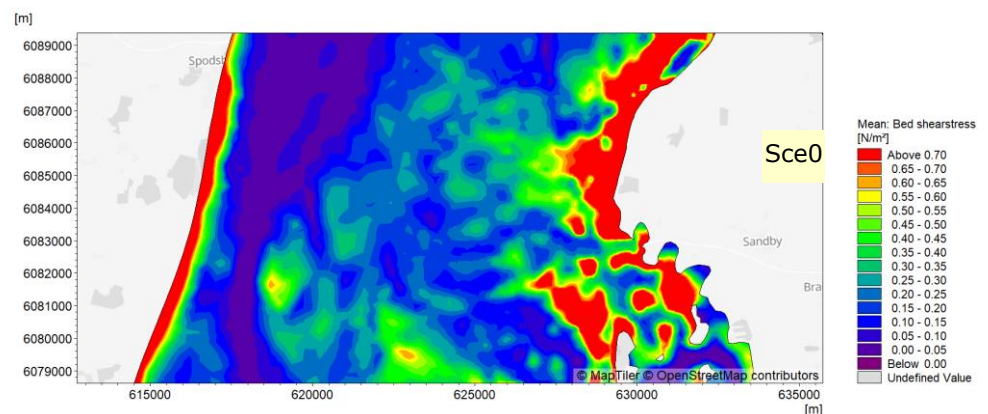


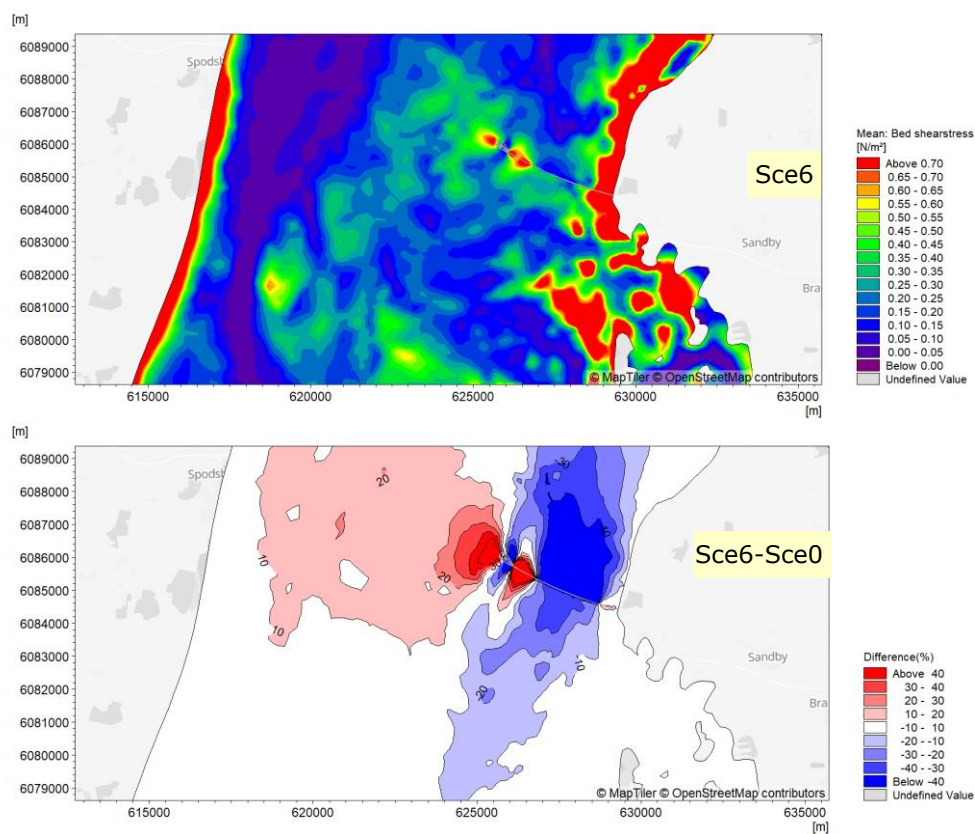


Figur 5-12 Maksimal signifikant bølgehøjde med og uden havn og procentvis ændring af den.

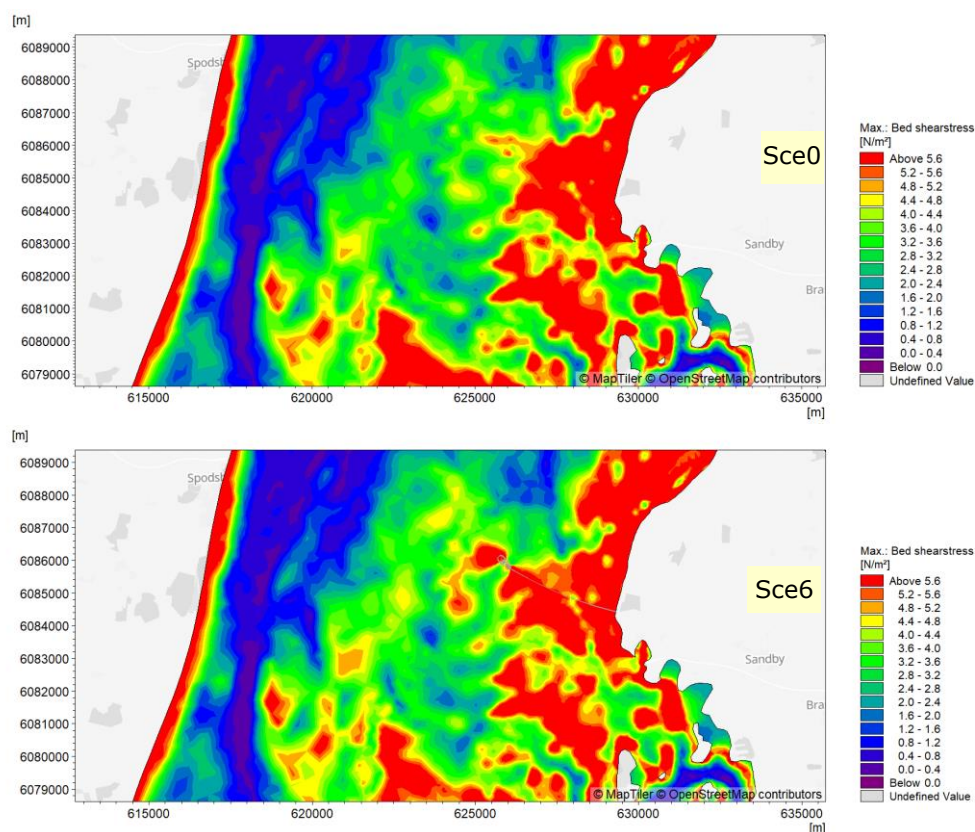
### 5.3.3 Bundfriktionsændring

Bundforskydningen bestemmes af kombinationen af strøm og bølger. Da strøm og bølger ændres af havnen, ændres bundfriktionen også, se Figur 5-13 og Figur 5-14. I de områder, hvor strøm og bølger øges, øges bundfriktionen og vice versa. Bundfriktionen øges omkring øen og i broens åbninger og mindskes i læzonen af ø og dæmning. Øgningen i bundfriktionen er over 50% for både mid- del og maksimal bundfriktion, mens der kun ses en begrænset ændring langs kysten.

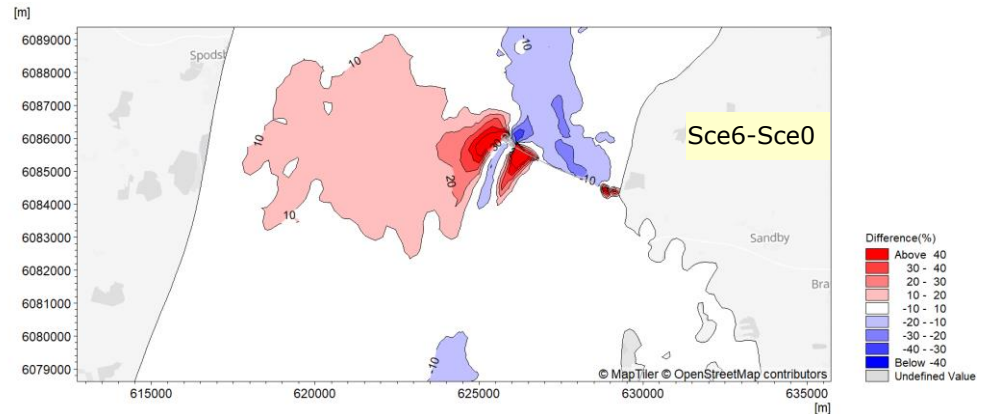




Figur 5-13 Middel bundfriktion med og uden havn og procentvis ændring af den.







Figur 5-14 Maksimal bundfriktion med og uden havn og procentvis ændring af den.

### 5.3.4 Ændring i erosion og aflejring

Sedimenttransport, og dermed erosion og aflejring, afhænger af bundfriktion. Jo større bundfriktion, desto større er den potentielle transport. Potentiel, da transporten også afhænger af bundens beskaffenhed. Den gennemførte analyse af bundfriktion, kombineret med viden om sedimenttransport, fokuserer således på den potentielle ændring i sedimenttransporten i området.

Baseret på analysen af ændringer i strøm, bølger og bundfriktion vurderes det, at der kan forekomme:

- aflejringer i læzonerne ved ø og dæmning;
- erosion omkring øen uden for læzonerne og ved broernes åbninger; og
- meget begrænset aflejring langs kysten undtagen ved broens åbning ved kysten.

Således forventes der ikke signifikante ændringer i forholdene langs kysten, og da der ikke forventes erosion (undtaget ved broens åbning ved kysten) er der ikke behov for kystbeskyttelse.

Omkring øen og ved broåbningerne skal der tages specifikt hensyn til erosion i designet af ø, enderne af dæmningen og lavbroerne. Erosionsbeskyttelse skal inkluderes i projekteringen af konstruktionerne.

## 6 Hydrografisk påvirkning i Bælthavet

### 6.1 Baggrund

Den lokale model af Bælthavet med udformning 6 for den fremskudte havn benyttes til vurdering af (se evt. Afgrænsningsnotatet (Sund & Bælt, 2024D)), afsnit 3.8 og 3.9:

- Strømningsmodstand fra den fremskudte havn
- Vandstandsændringer

En vandføringsændring (brutto), som defineret for de andre forbindelser i Bælthavet og Øresund, bestemmes for den fremskudte færgehavn ved Tårs. Derudover foretages en konkret vurdering af den lokale vandføringsændring fra den fremskudte færgehavn ved Tårs, og dermed den potentielle påvirkning af lokale strømforhold og vandudveksling og transport mellem vandområderne. Det giver mulighed for en indledende undersøgelse af påvirkningerne i lokalområdet, herunder Natura 2000-området "Nakskov Fjord og Indrefjord".

Der foretages en undersøgelse af betingede ændringer af risikoen for oversvømmelse af lavtliggende områder i nærheden af den fremskudte havn. Højvande beregnes med og uden den fremskudte havn og broer/dæmninger. Forskellene med og uden fremskudt havn analyseres, og betydningen af den fremskudte havn for lokale oversvømmelser klarlægges.

### 6.2 Vandføringsændring (brutto)

#### 6.2.1 Tværsnit

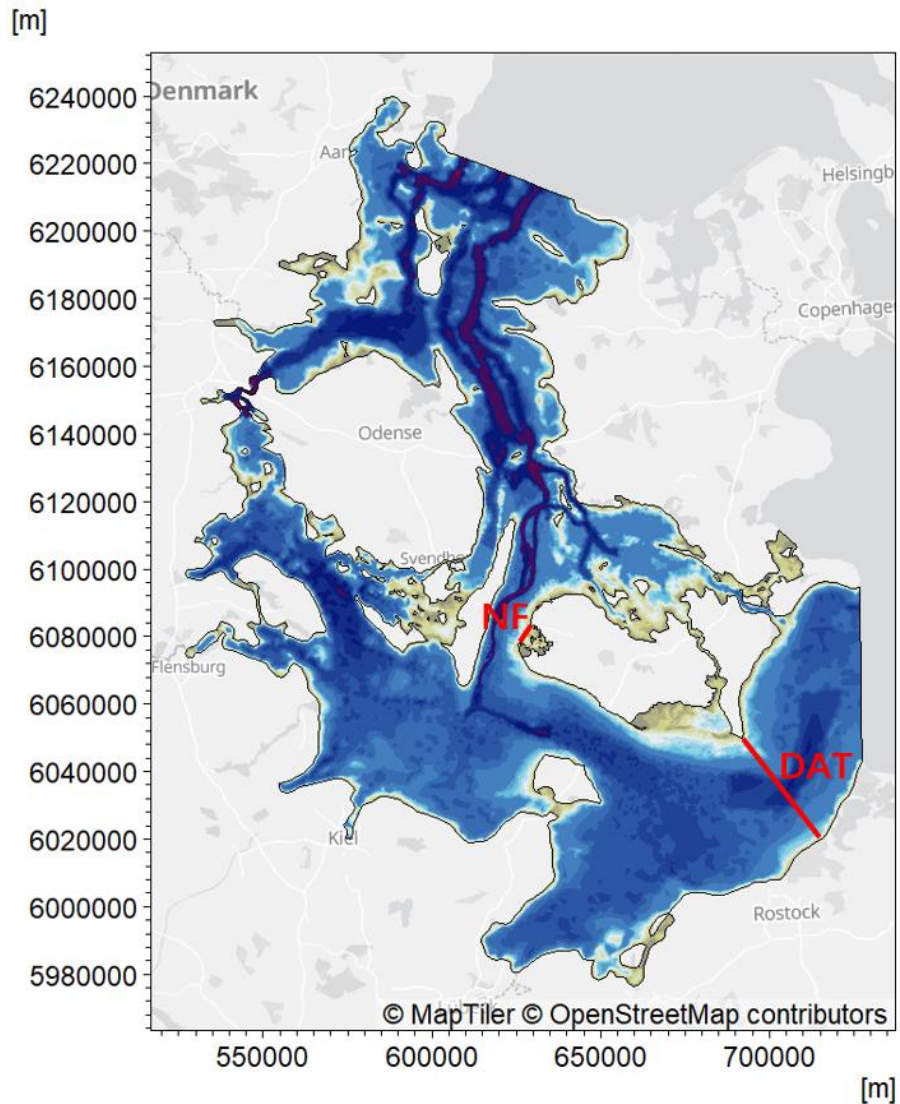
Beregningsmetoden for vandføringsændringen er beskrevet tidligere i afsnit 5.2.3.

Tværsnit, der betragtes, er vist i Figur 5-8 og Figur 6-1.

For gennemstrømningen i Bælthavet benyttes tværsnittene TS på tværs af Langelandsbælt og DAT på tværs af Darss tærsklen.

Disse to tværsnit adskiller sig af flere årsager. Snittet ved Darss tærsklen påvirkes af gennemstrømning fra både Storebælt og Lillebælt, hvorimod det ved Tårs kun påvirkes af gennemstrømning fra Storebælt. Desuden er der mere tidevand ved Tårs end ved Darss tærsklen. Endelig er der en saltfælde ved Darss tærsklen, hvormed menes, at det tunge vand, der passerer Darss tærsklen og strømmer ind i Arkona Bassinet, er fanget og strømmer ikke tilbage igen. Derfor er vandføringsændringen ikke nødvendigvis den samme i de to tværsnit.

For Nakskov Fjord benyttes tværsnittet NF over munden til Nakskov Fjord.



Figur 6-1 Tværsnit NF (for Nakskov Fjord) ved åbningen til Nakskov Fjord og DAT (for Darss tærsklen) på tværs af Darss tærsklen.

### 6.2.2 Langelandsbælt

Vandføringsændring for gennemstrømningen fra og til Østersøen er vist i Tabel 6-1. Beregningerne er baseret på resultater fra modellen af Bælthavet, som forbinder Kattegat og Arkona Bassinet, dvs. to områder, hvor vandstanden kun i marginalt omfang er påvirket af havnen og andre forbindelser. Således er den beregnede ændring mere korrekt, men stadig ikke så korrekt som den, der bestemmes med modellen af Østersøen, hvor der tages hensyn til omfordeling mellem Bælthavet og Øresund.

Den beregnede ændring ved Tårs er brugt til at skalere ændringerne, der er beregnet med modellen af Langelandsbælt, se afsnit 5.2.3.

Skaleres den beregnede ændring gennem Bælthavet, dvs. ved Darss tærsklen, til gennemstrømningen gennem de danske stræder, dvs. inklusive Øresund, er ændringen  $8/11 \cdot -0,40\% = -0,27\%$  for vandføringen. Detaljer omkring baggrunden for denne skalering kan findes Ekspertnotatet (Sund & Bælt, 2024C).

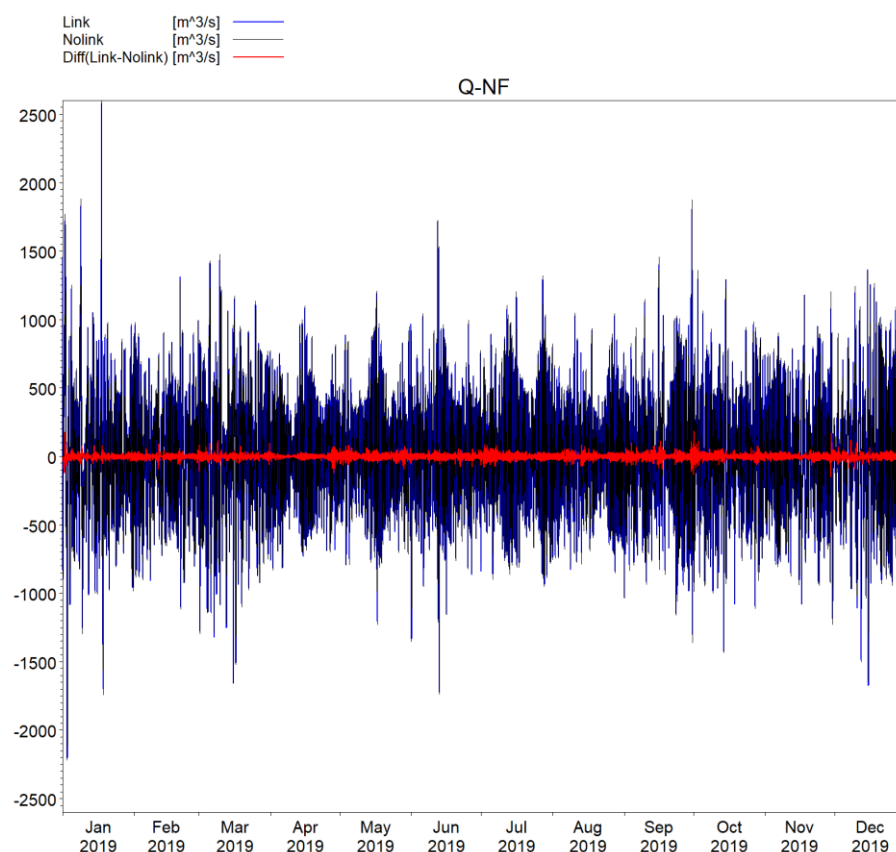
Tabel 6-1 Vandførings- og salttransportændringen (begge brutto) i tværsnit TS og DAT for udformning 6.

| Tværsnit       | $\Delta Q$<br>( $10^{10} \text{ m}^3$ )  | $Q_{\text{ref}}$<br>( $10^{12} \text{ m}^3$ ) | Ændring<br>(%) |
|----------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------|
| Tårs-Spodsberg | -1,16                                    | 2,36                                          | -0,49          |
| Darss tærsklen | -0,12                                    | 0,31                                          | -0,40          |
| Tværsnit       | $\Delta Q_s$<br>( $10^{10} \text{ kg}$ ) | $Q_{s\text{ref}}$<br>( $10^{12} \text{ kg}$ ) | Ændring<br>(%) |
| Tårs-Spodsberg | -1,20                                    | 4,35                                          | -0,27          |
| Darss tærsklen | -1,43                                    | 4,39                                          | -0,33          |

### 6.2.3 Nakskov Fjord

Påvirkningen fra havnen på Nakskov Fjord vurderes på baggrund af udveksling til fjorden (gennem transekt NF), og hvorledes den ændres.

I Figur 6-2 vises udvekslingen med og uden havn og ændringen i udvekslingen. Forskellen mellem udveksling med og uden havn er marginal. Det betyder, at havnen kun har en marginal påvirkning af fjorden.



Figur 6-2 Tidsserie af vandføring til Nakskov Fjord med og uden havn og ændringen i vandføring (gennem tværsnit NF positiv ind i fjorden).

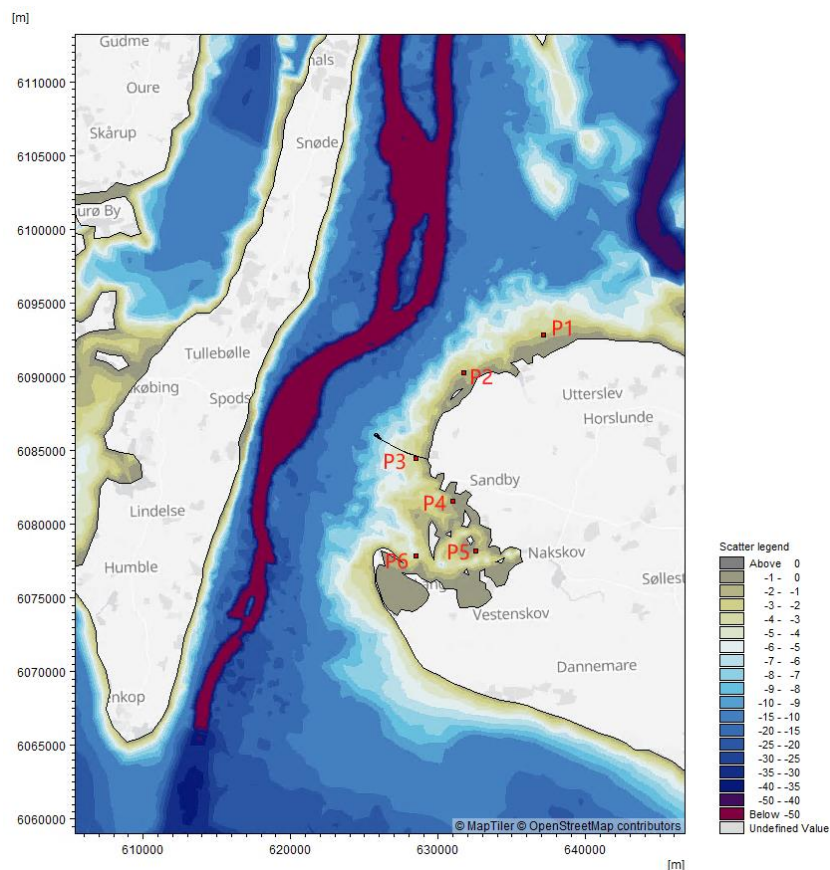
Vandføringsændring til Nakskov Fjord er vist i Tabel 6-2. Ændringen er marginal: -0,31% for vandføring og -0,24% for salttransport, hvilket ikke forventes at give anledning til betydende ændringer i Nakskov Fjord.

Tabel 6-2 Vandførings- og salttransportændring (begge brutto) i tværsnit NF for udformning 6.

| Tværsnit      | $\Delta Q$<br>( $10^6 \text{ m}^3$ )  | $Q_{\text{ref}}$<br>( $10^9 \text{ m}^3$ )    | Ændring<br>(%) |
|---------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------|
| Nakskov Fjord | -6,74                                 | 2,20                                          | -0,31          |
| Tværsnit      | $\Delta Q_s$<br>( $10^8 \text{ kg}$ ) | $Q_{\text{sref}}$<br>( $10^{10} \text{ kg}$ ) | Ændring<br>(%) |
| Nakskov Fjord | -9,20                                 | 3,87                                          | -0,24          |

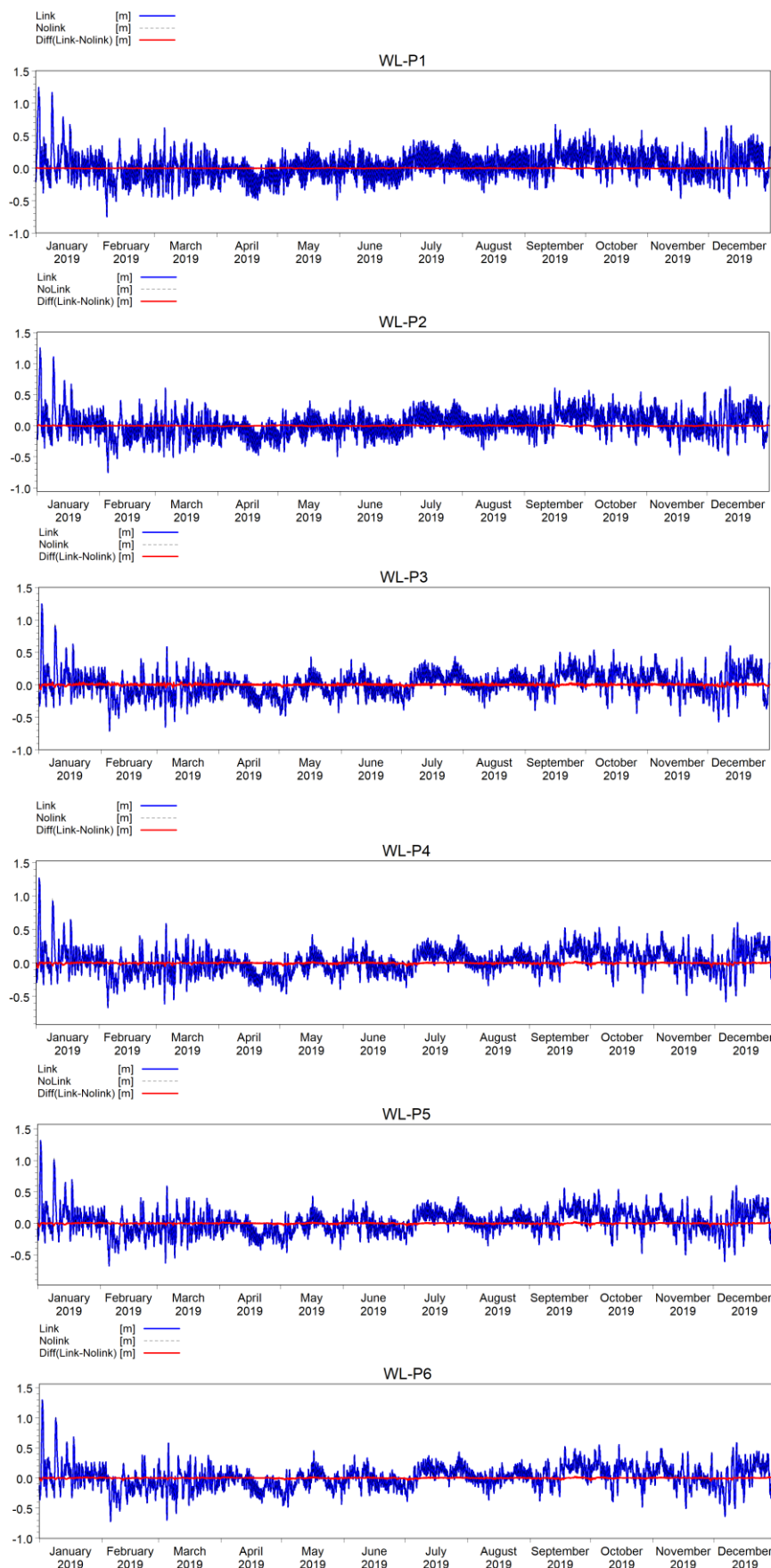
### 6.3 Vandstande langs kysten

Seks positioner langs kysten betragtes for at se havnens påvirkning af højvande, se Figur 6-3.



Figur 6-3 Betragtede vandstandspositioner langs kysten.

Tidsserier af vandstandene i de seks positioner med og uden havn samt forskellen mellem dem er vist i Figur 6-4 (også vist på kort i Figur 6-5). Betydelige udsving i vandstanden ses i løbet af året med variationer, der spænder fra ca. -1,0 m DVR90 til +1,5 m DVR90. Forskellen i vandstand med og uden havn er tæt på nul året igennem.



Figur 6-4 Tidsserier af vandstand (med reference til DVR90) langs kysten.



Tabel 6-3 viser, at middel vandstanden langs kysten er mindre end 4 cm, og ændringen i den pga. af havnen er marginal (mindre end +3 mm).

Tabel 6-4 viser, at den maksimale vandstand langs kysten er mindre end +1.4 m, og at den maksimale øgning er mindre end 6 mm, hvilket er en marginal øgning.

*Tabel 6-3 Middel vandstand med og uden havn.*

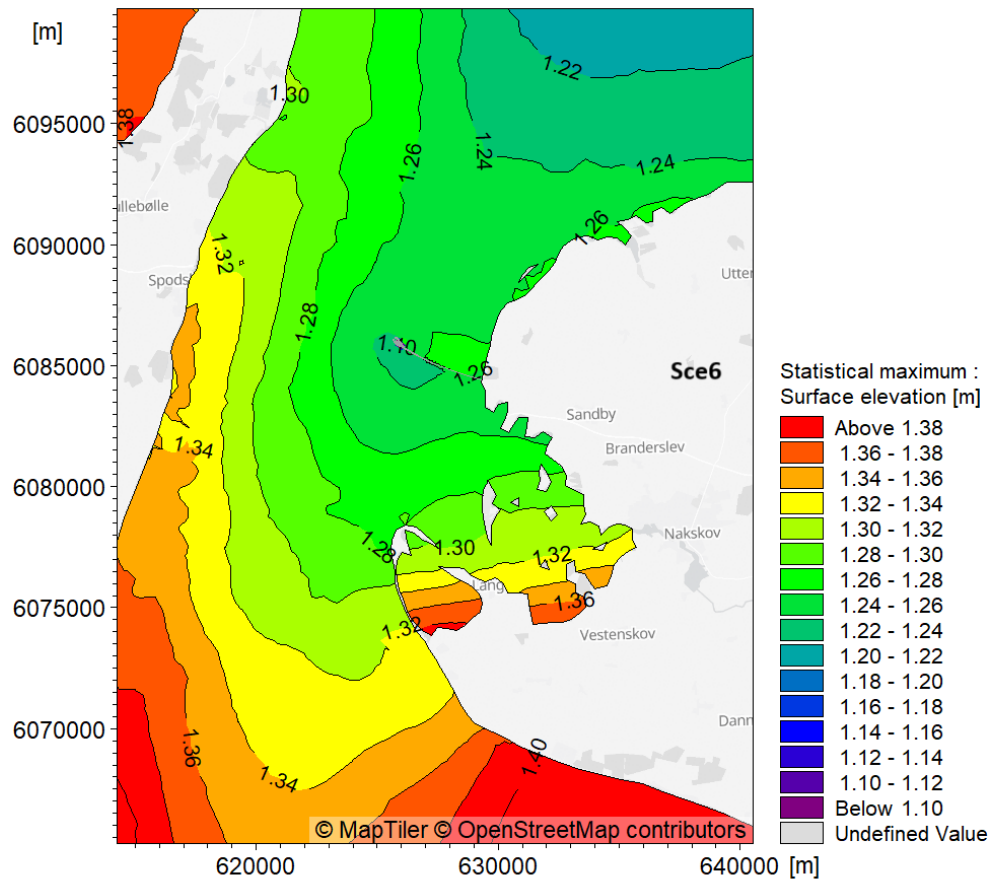
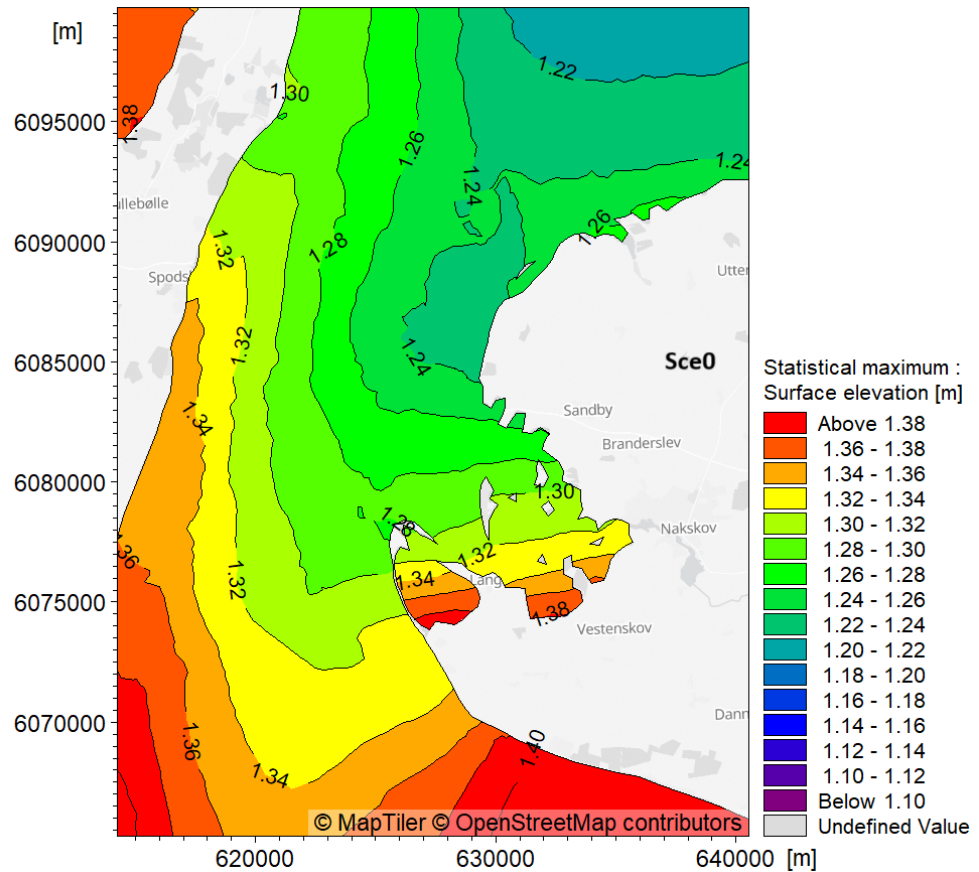
| Positioner | Reference (m) | Udformning 6 (m) | Øgning (m) |
|------------|---------------|------------------|------------|
| P1         | 0.0386        | 0.0381           | -0.0005    |
| P2         | 0.0289        | 0.0286           | -0.0003    |
| P3         | 0.0136        | 0.0161           | +0.0025    |
| P4         | 0.0230        | 0.0224           | -0.0006    |
| P5         | 0.0212        | 0.0209           | -0.0003    |
| P6         | 0.0127        | 0.0124           | -0.0003    |

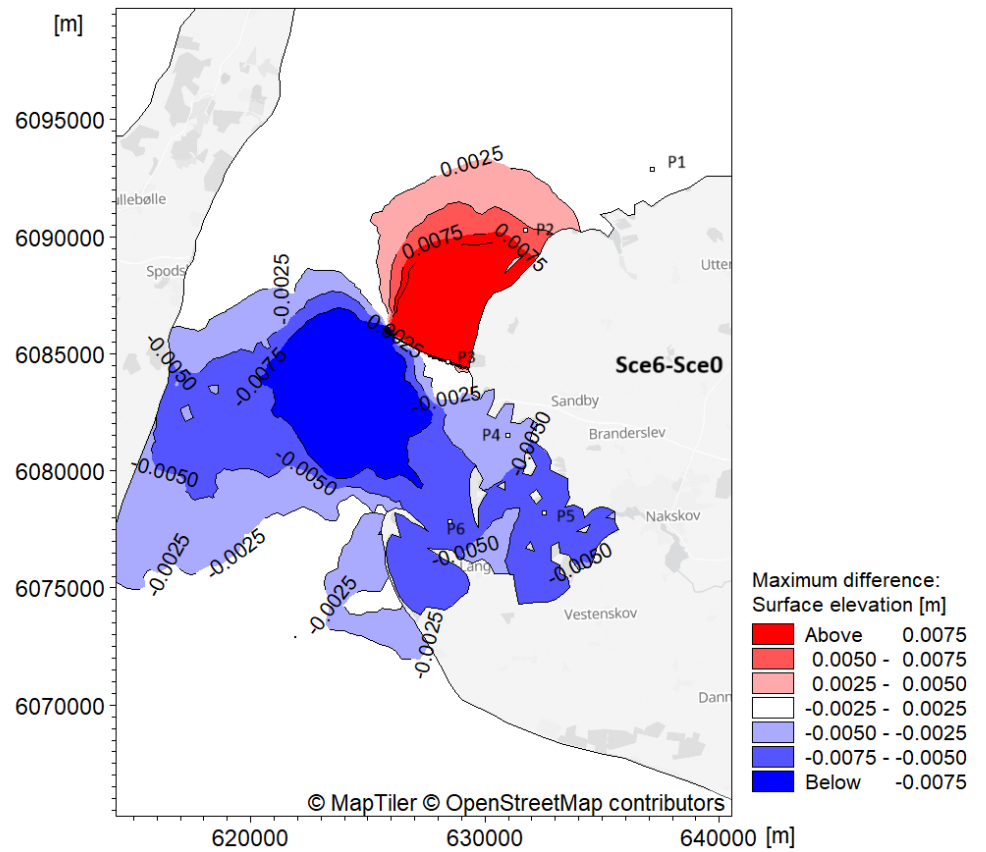
*Tabel 6-4 Maksimal vandstand med og uden havn.*

| Positioner | Reference (m) | Udformning 6 (m) | Øgning (m) |
|------------|---------------|------------------|------------|
| P1         | 1.2433        | 1.2448           | +0.0015    |
| P2         | 1.2449        | 1.2505           | +0.0056    |
| P3         | 1.2400        | 1.2451           | +0.0051    |
| P4         | 1.2722        | 1.2676           | -0.0046    |
| P5         | 1.3164        | 1.3109           | -0.0055    |
| P6         | 1.3032        | 1.2968           | -0.0064    |

I Figur 6-5 ses det, at der nogle steder langs kysten nord for havnen kan være en lokal øgning på op til 1 cm. Stadig en marginal øgning.

Ud fra ovenstående resultater kan det konkluderes, at havnen har en marginal effekt på vandstanden i de lavtliggende områder i nærheden af havnen (den er mindre end 1 cm).





Figur 6-5 Kort med maksimal vandstand med havn (øverst) og uden havn (i modten) og forskellen mellem dem (nederst). Vandstand er angivet med reference til DVR90.

## 7 Hydrografisk påvirkning af Østersøen

### 7.1 Baggrund

Den regionale model af Østersøen benyttes til vurdering af, hvorledes Østersøen påvirkes af (se evt. Afgrænsningsnotatet (Sund & Bælt, 2024D), afsnit 3.10, 3.11 og 3.12):

- Strømningsmodstand fra infrastrukturprojekter (se estimeret modstand fra dem i afsnit 3.3)
- Klimaændringer (se formodede klimaændringer i afsnit 4.3)

Den regionale model anvendes til at beskrive den kumulative effekt på Østersøen fra den fremskudte færgehavn ved Tårs og andre udvalgte besluttede eller undersøgte større infrastrukturprojekter og klimaændringerne i det valgte klimascenarie.

### 7.2 Overfladefordelinger

#### 7.2.1 Middel saltholdighed

Overfladesaltholdigheder er vist i Figur 7-1 (2019 uden forbindelser), Figur 7-2 (2019 med forbindelser), Figur 7-4 (2100 uden forbindelser) og Figur 7-5 (2100 med forbindelser), og ændringer i overfladesaltholdigheder i Figur 7-3 (2019 med og uden forbindelser), Figur 7-6 (2100 med og uden forbindelser) og Figur 7-7 (2019 og 2100 uden forbindelser).

Der ses ved sammenligning af fordelingerne i 2019 med og uden forbindelser (Figur 7-1 og Figur 7-2) og sammenligning af fordelingerne i 2100 med og uden forbindelser (Figur 7-4 og Figur 7-5) kun marginale forskelle i disse fordelinger forårsaget af forbindelserne. Klimaændringerne får overfladesaltholdigheden til at falde.

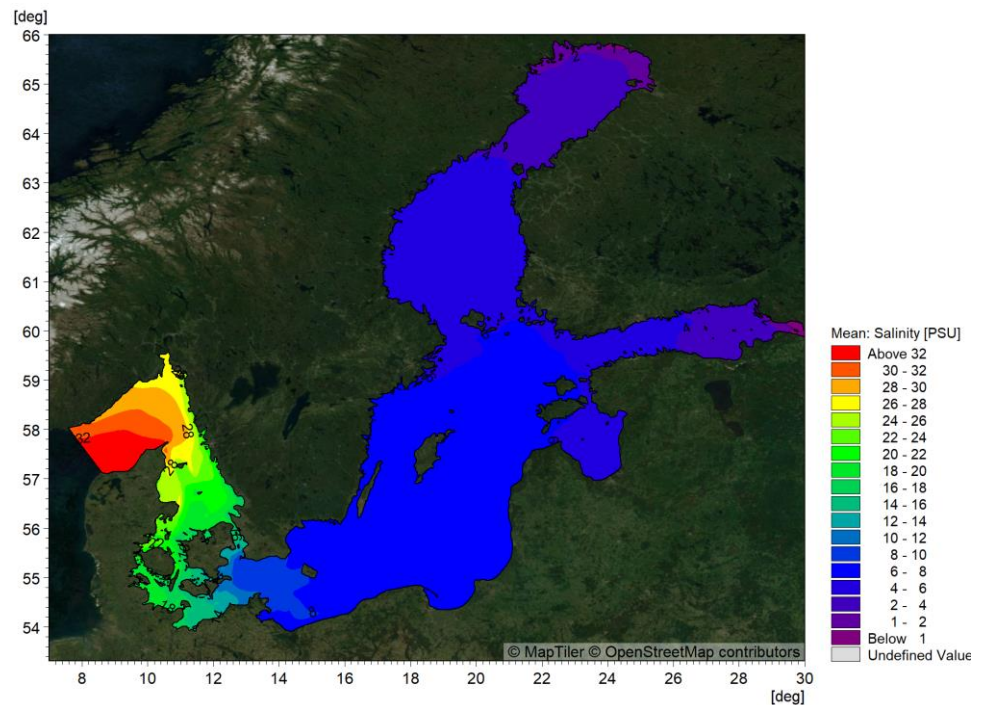
Fordelingerne af overfladesaltholdighederne er som forventet fra målinger og litteraturen, se for eksempel Pedersen & Møller (1981) og Møller & Sehested Hansen (1994). Gradienterne i overfladesaltholdighederne er mindre i den indre Østersø end i de Danske Stræder og Kattegat. Skagerrak fronten ses i overgangen mellem Kattegat og Skagerrak (se for eksempel Jakobsen et al., 1994).

Ændringen i overfladesaltholdigheden pga. forbindelserne er vist i Figur 7-3 og Figur 7-6, som begge viser en meget marginal stigning i saltholdigheden i indre Østersø (størrelsesorden er på +0,02 g/kg) og en lidt større stigning i Bælthavet og Kattegat (omkring +0,04 g/kg). Årsagen til den stigende saltholdighed i overfladen er en stigende saltholdighed lige under haloklinen i den indre Østersø, se Figur 7-18 og Figur 7-21. Disse ændringer er små.

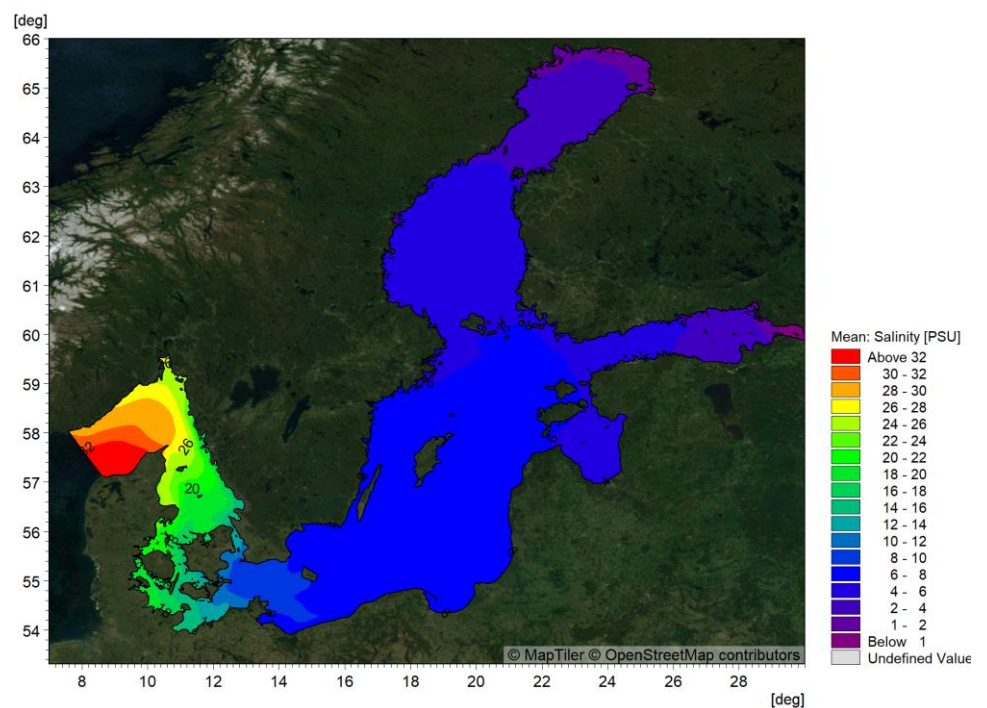
Ændringen i overfladesaltholdigheden pga. klimaændringer er vist i Figur 7-7, som viser et fald i saltholdigheden i indre Østersø (−0,6 - −0,4 g/kg), og et lidt

større fald i Bælthavet og Kattegat (omkring  $-0,8$  g/kg). Faldet skyldes øget nedbør og afstrømning.

Ændringen i overfladesaltholdighed forårsaget af henholdsvis forbindelserne (små stigninger i indre Østersø) og klimaændringer er modsatrettet, og ændringerne er en størrelsesorden større for klimaændringerne end for forbindelserne.

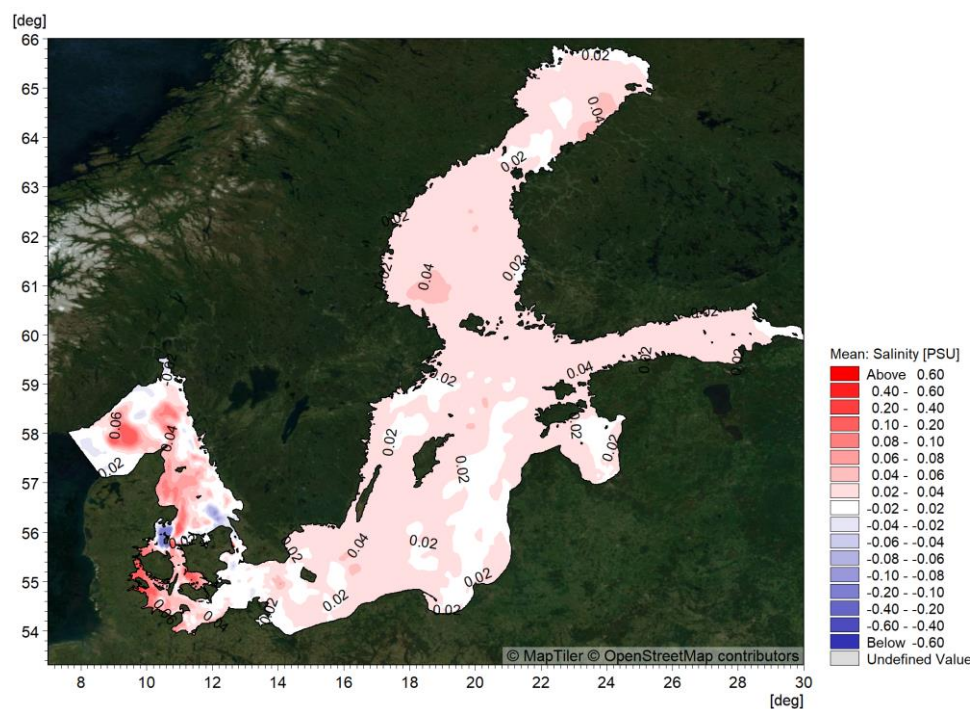


Figur 7-1 Middel overfladesaltholdighed i 2019 uden forbindelser.

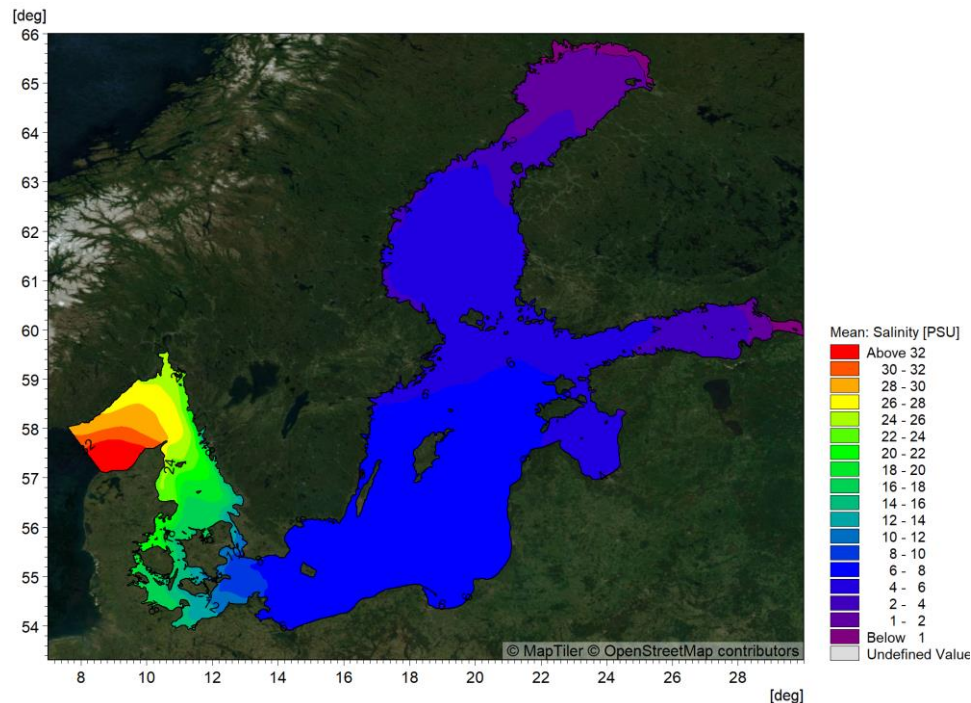


Figur 7-2 Middel overfladesaltholdighed i 2019 med forbindelser.



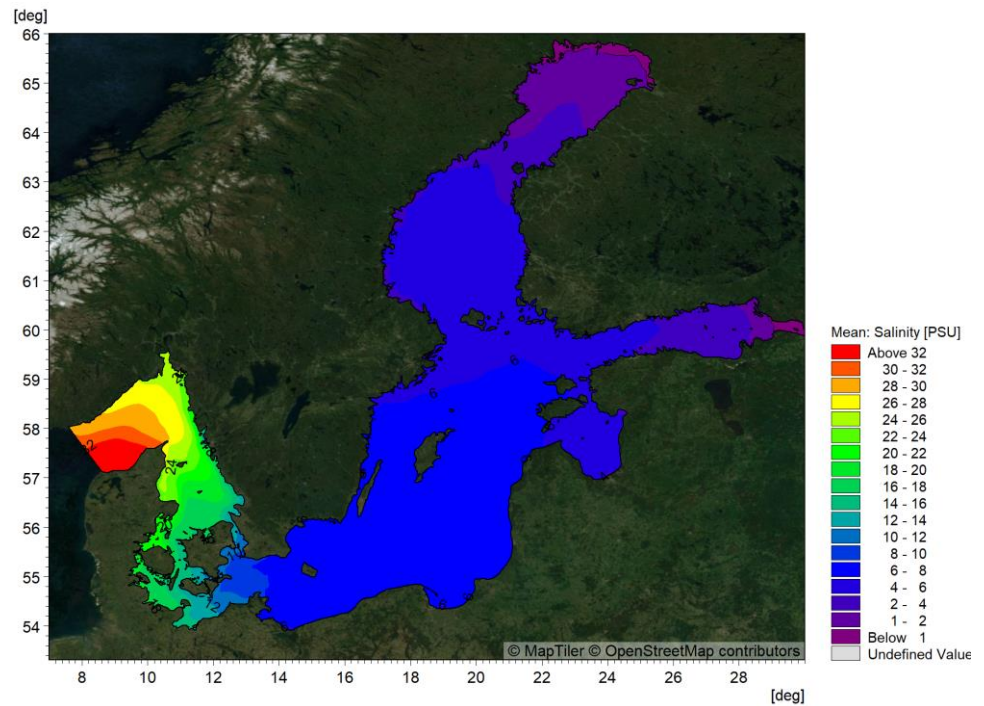


Figur 7-3 Ændring i overfladesaltholdighed i 2019 med og uden forbindelser (positive værdier angiver højere saltholdighed med forbindelser).

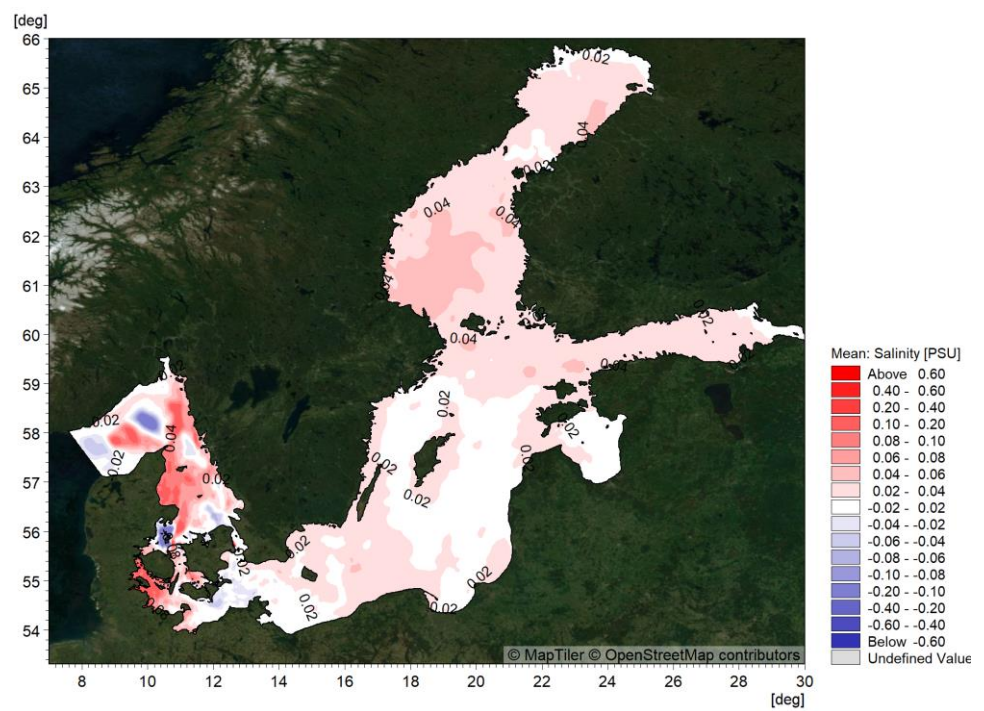


Figur 7-4 Middel overfladesaltholdighed i 2100 uden forbindelser.

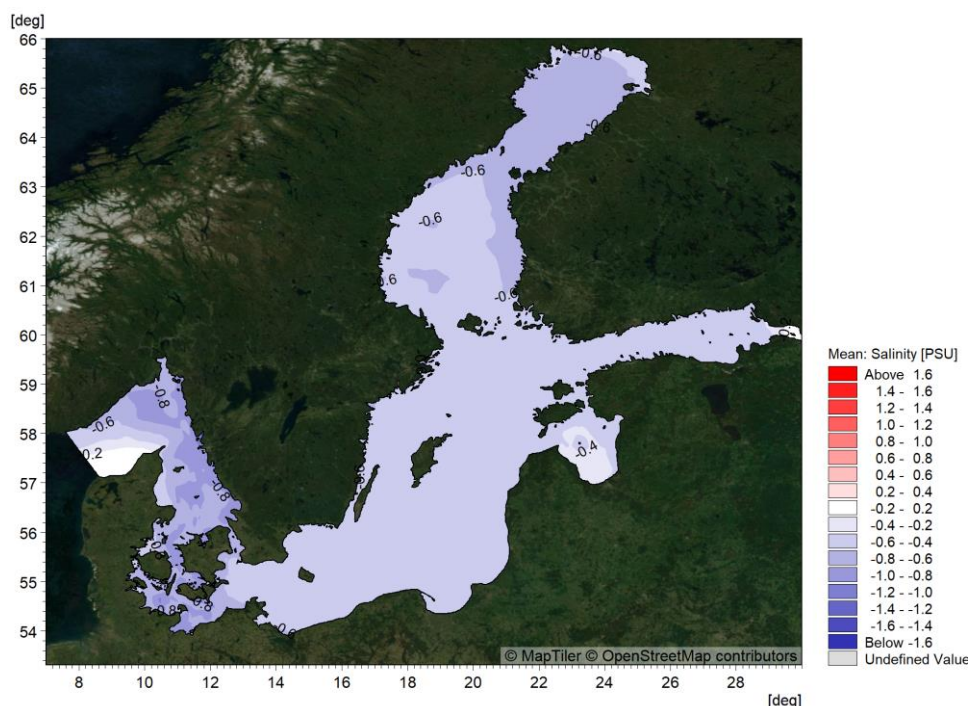




Figur 7-5 Middel overfladesaltholdighed i 2100 med forbindelser.



Figur 7-6 Ændring i middel overfladesaltholdighed i 2100 med og uden forbindelser (positive værdier angiver højere saltholdighed med forbindelser).



Figur 7-7 Ændring i middel overfladesaltholdighed i 2019 uden forbindelser og 2100 uden forbindelser (2100 minus 2019). Bemærk, at skalaen er anderledes end for de øvrige differensplot.

## 7.2.2 Middel temperatur

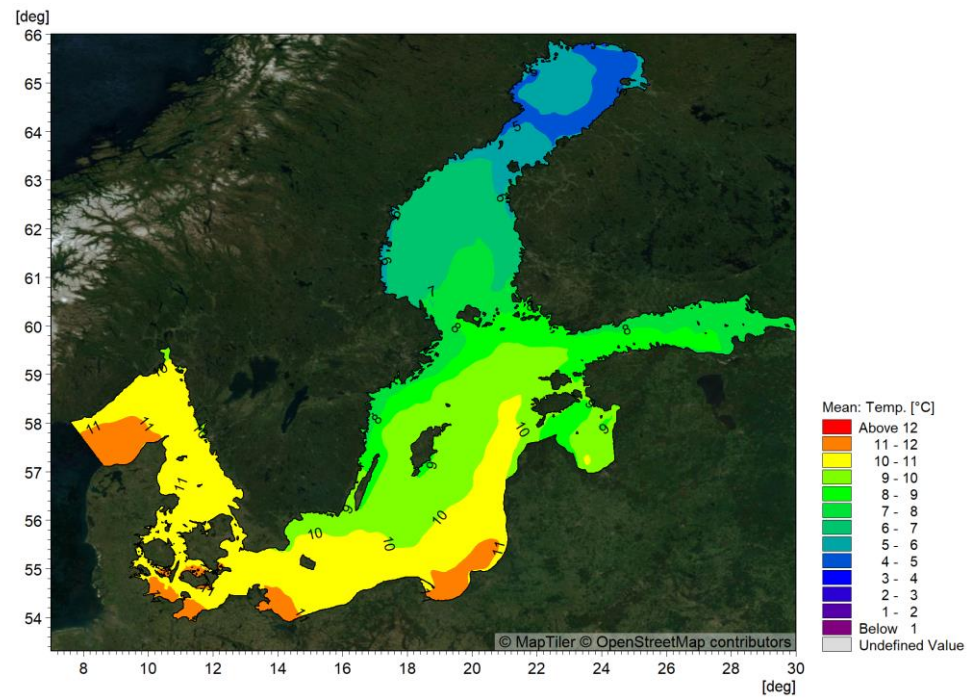
Temperaturfordelingerne er vist i samme rækkefølge som for saltholdighedsfordelingerne. Overfladetemperaturer er vist i Figur 7-8 (2019 uden forbindelser), Figur 7-9 (2019 med forbindelser), Figur 7-11 (2100 uden forbindelser) og Figur 7-12 (2100 med forbindelser), og ændringer i overfladesaltholdigheder i Figur 7-10 (2019 med og uden forbindelser), Figur 7-13 (2100 med og uden forbindelser) og Figur 7-14 (2019 og 2100 uden forbindelser).

Der ses ved sammenligning af fordelingerne i 2019 med og uden forbindelser (Figur 7-8 og Figur 7-9) og sammenligning af fordelingerne i 2100 med og uden forbindelser (Figur 7-11 og Figur 7-12) kun marginale forskelle i disse fordelinger forårsaget af forbindelserne. Klimaændringerne får overfladetemperaturen til at stige.

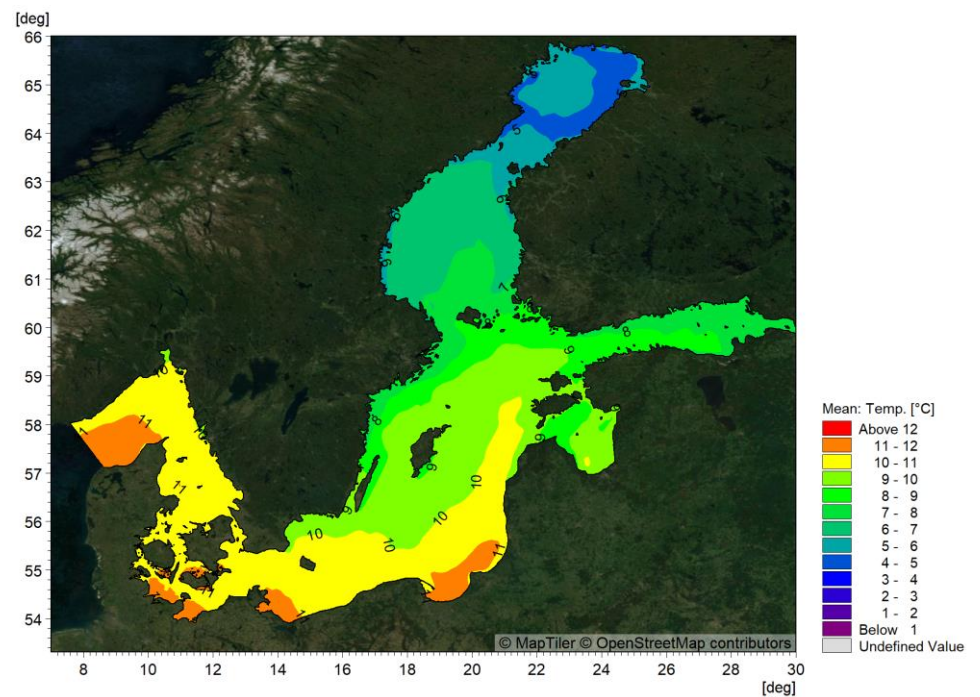
Ændringen i overfladetemperaturen pga. forbindelserne er vist i Figur 7-10 og Figur 7-13, der begge viser en meget marginal sporadisk ændring af temperaturen i indre Østersø og Skagerrak og ingen ændring i Bælthavet og Kattegat.

Ændringen i overfladetemperaturen pga. klimaændringer er vist i Figur 7-14, som viser en stigning i temperaturen fra +1.5 °C ved randen i Skagerrak, +2 °C i de Danske Stræder, +2 - +3 °C i indre Østersø. Det er en betydelig stigning i temperatur, som påvirker økosystemet i indre Østersø.

Ændringen i overfladetemperaturen forårsaget af henholdsvis forbindelserne og klimaændringer er flere størrelsesordener større for klimaændringerne end for forbindelserne.

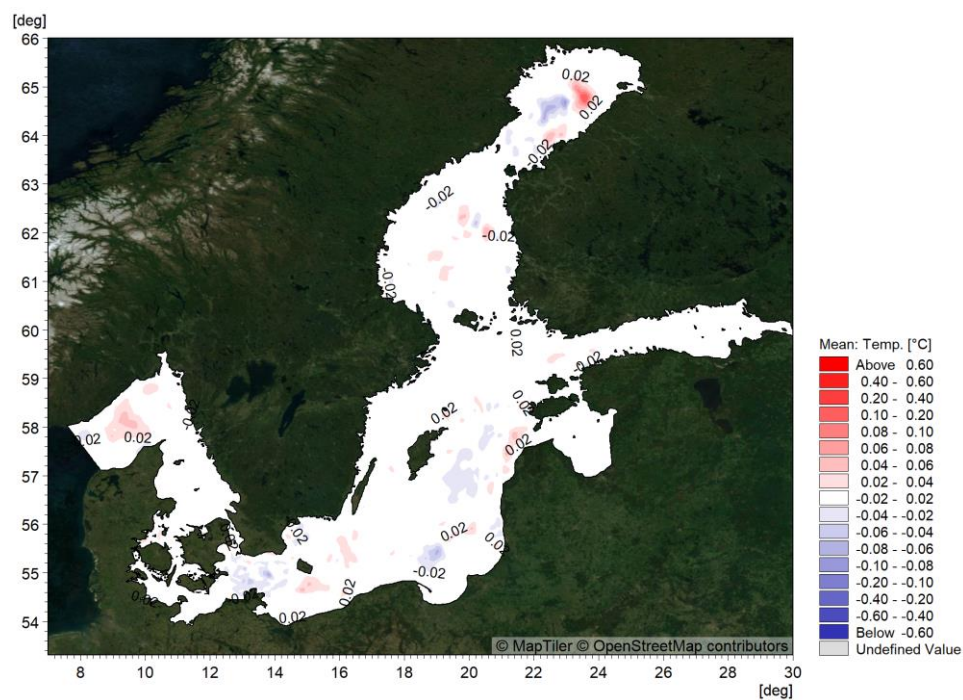


Figur 7-8 Middel overfladetemperatur i 2019 uden forbindelser.

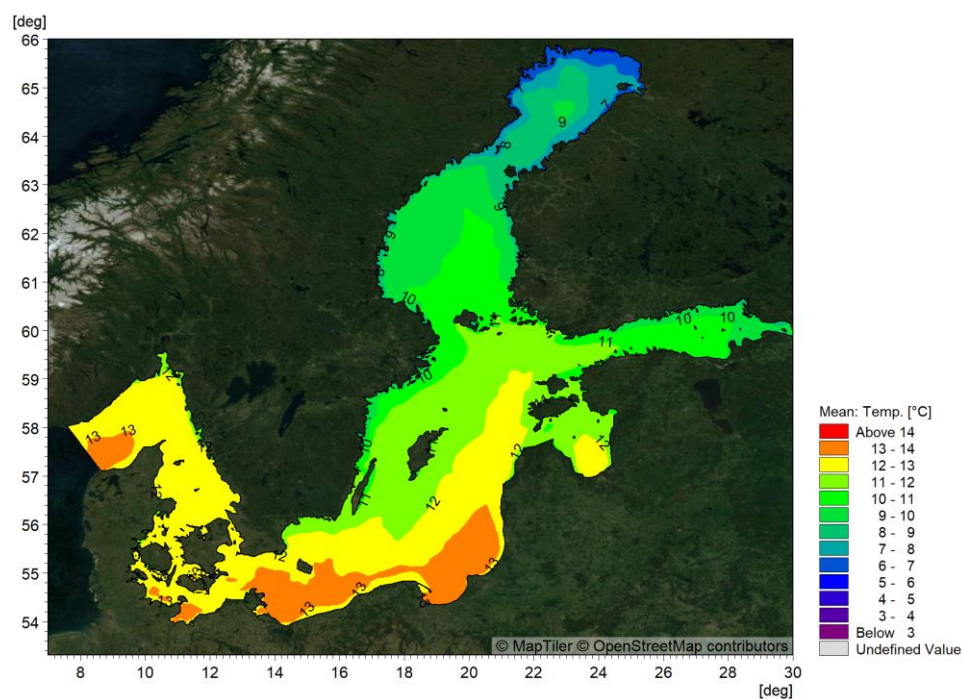


Figur 7-9 Middel overfladetemperatur i 2019 med forbindelser.

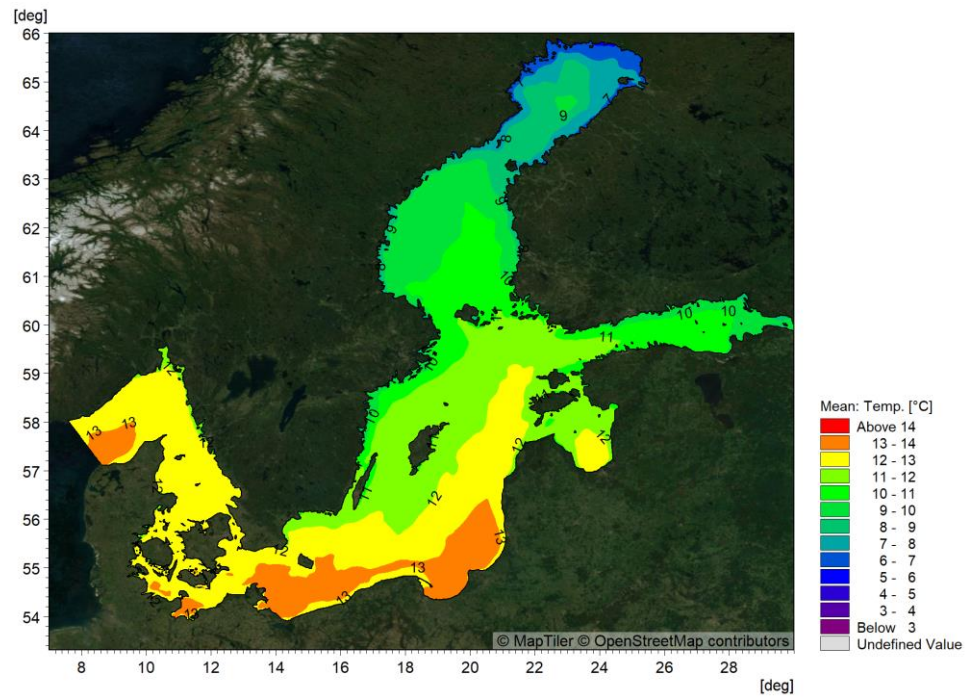




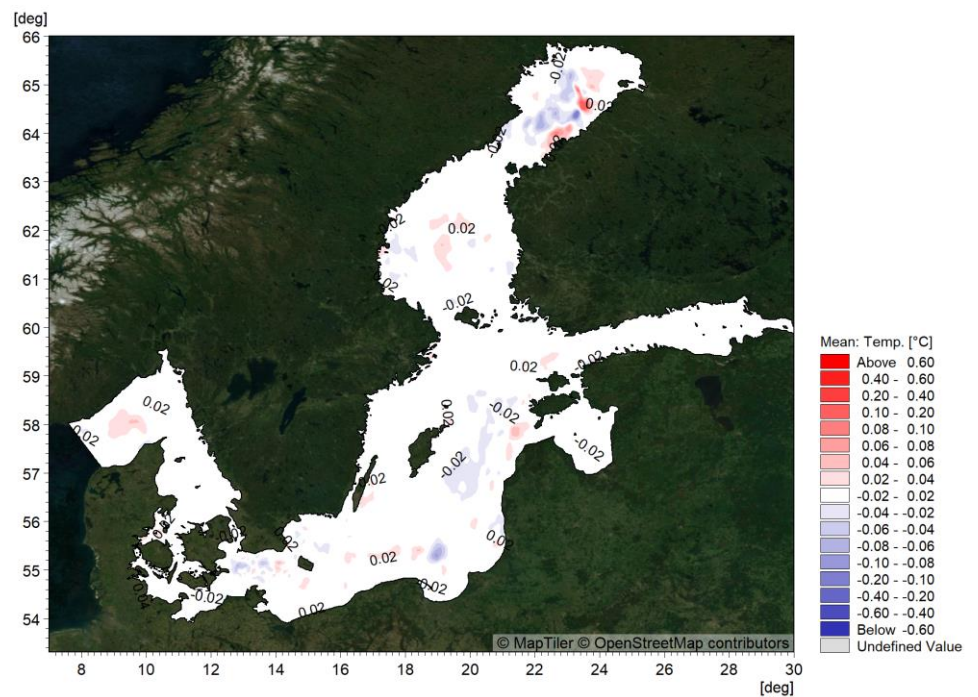
Figur 7-10 Ændring i overfladetemperatur i 2019 med og uden forbindelser (positive værdier angiver højere vandtemperatur med forbindelser).



Figur 7-11 Middel overfladetemperatur i 2100 uden forbindelser.

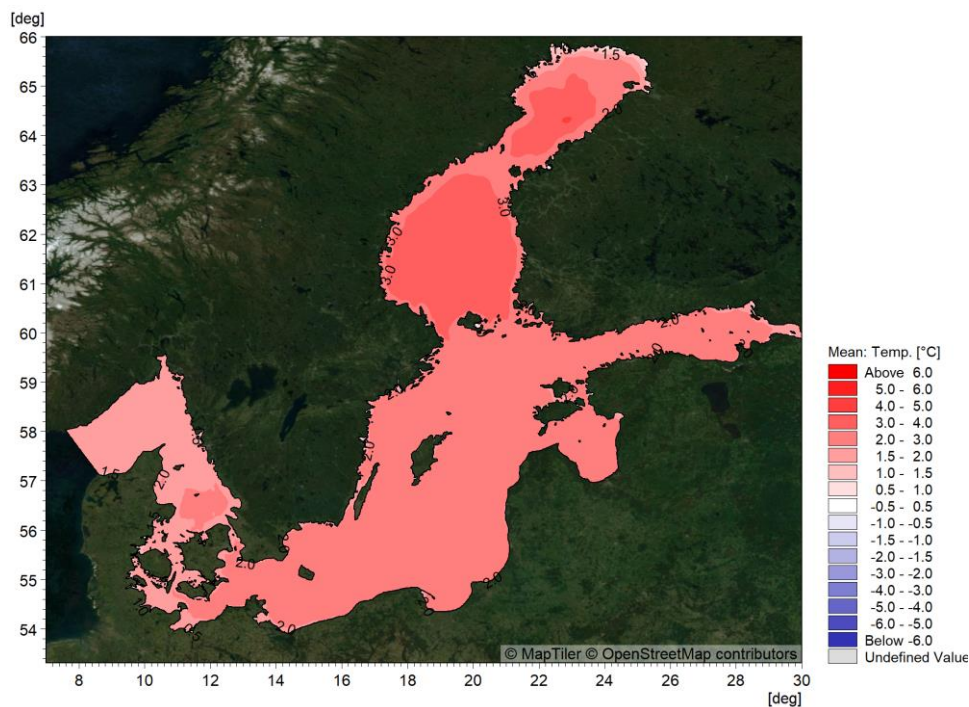


Figur 7-12 Middel overfladetemperatur i 2100 med forbindelser.



Figur 7-13 Ændring i middel overfladetemperatur i 2100 med og uden forbindelser (positive værdier angiver højere vandtemperaturer med forbindelser).



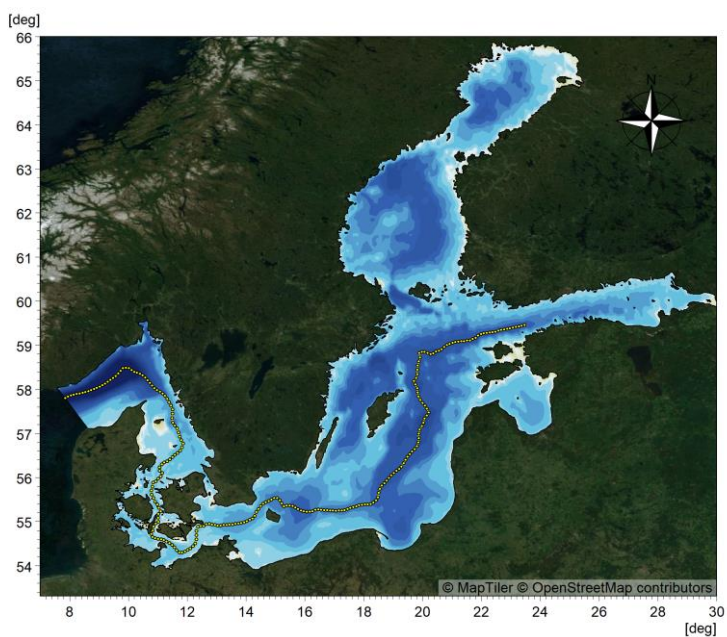


Figur 7-14 Ændring i middel overfladetemperatur i 2019 uden forbindelser og 2100 uden forbindelser (2100 minus 2019).

## 7.3 Fordeling langs transekt

### 7.3.1 Transekt

Fordeling af saltholdighed og temperatur er vist langs transektet markeret på Figur 7-15. Transektet er fra Skagerrak og ind i Østersøen langs de dybere dele.



Figur 7-15 Kort med batymetri og betragtet transekt.



### 7.3.2 Middel saltholdighed

Saltholdighedsfordelingerne er vist i samme rækkefølge som for de tidligere saltholdigheds- og temperaturfordelinger. Saltholdigheder langs transektet er vist i Figur 7-16 (2019 uden forbindelser), Figur 7-17 (2019 med forbindelser), Figur 7-19 (2100 uden forbindelser) og Figur 7-20 (2100 med forbindelser), og ændringer i saltholdigheder i Figur 7-18 (2019 med og uden forbindelser), Figur 7-21 (2100 med og uden forbindelser) og Figur 7-22 (2019 og 2100 uden forbindelser).

Der ses ved sammenligning af fordelingerne i 2019 med og uden forbindelser (Figur 7-16 og Figur 7-17) og sammenligning af fordelingerne i 2100 med og uden forbindelser (Figur 7-19 og Figur 7-20) kun marginale forskelle i disse fordelinger forårsaget af forbindelserne. Klimaændringerne får generelt saltholdigheden til at falde.

Fordelingerne af saltholdigheden langs transektet er som forventet fra målinger og litteraturen, se for eksempel Pedersen & Møller (1981), Ærtebjerg et al. (1991) og Møller & Sehested Hansen (1994). Gradienterne i overfladesaltholdighederne er mindre i indre Østersø end i de Danske Stræder og Kattegat. Skagerrak fronten ses i overgangen mellem Kattegat og Skagerrak, en saltvandskile, der trænger ind i Kattegat og de Danske Stræder langs bunden, og en overstrømning af Darss tærsklen, som fortsætter ind i de nedre lag i indre Østersø.

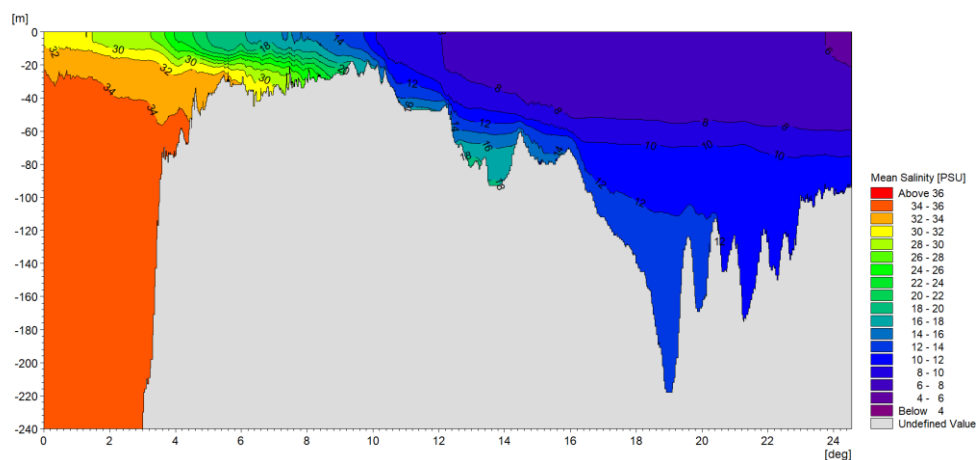
Ændringen i saltholdigheden pga. forbindelserne er vist i Figur 7-18 og Figur 7-21, der begge viser en stigning (mere mod bunden) i Kattegat og Bælthavet, marginale sporadiske ændringer i Arkona Bassinet, en dominerende stigning i bundlaget i Bornholmer Bassinet, og en stigning lige under haloklinen i Gotlands Bassinet (pga. stigningen i bundlaget i Kattegat). Der er sporadiske ændringer, som ikke er beskrevet i den korte oversigt af de væsentlige tendenser. Ændringerne er lidt større i år 2100 end i år 2019.

Stigningen i bundlaget i Kattegat i 2019 skyldes en øget opblanding fra nedre til øvre lag forårsaget af forbindelserne, som bevirker en større turbulensproduktion i øvre lag. Den øgede opblanding giver en tilsvarende øget indstrømning i nedre lag fra Skagerrak, og dermed stiger saltholdigheden i nedre lag. Dette medfører, at saltholdigheden af det indstrømmende saltvand i bundlagene i Østersøen stiger lidt, hvilket ses at resultere i en øget saltholdighed under haloklinen i Gotlands Bassinet. Dette er et resultat, som ikke har været betragtet i tidligere undersøgelser, og som kun kan belyses, idet der benyttes en model af hele Østersøsystemet. I 2100 øges saltholdigheden i bundlaget i Kattegat yderligere pga. af mindre turbulensproduktion i nedre lag (dokumenteret vha. modellens resultater), som mindsker nedblandingen fra øvre til nedre lag. I Sund & Bælt (2025A) er de øgede saliniteter i nedre lag ( $\sim 0,2$  g/kg fra forbindelser og  $\sim 0,2$  g/kg fra klimaændringer) også beregnet med den konceptuelle model.

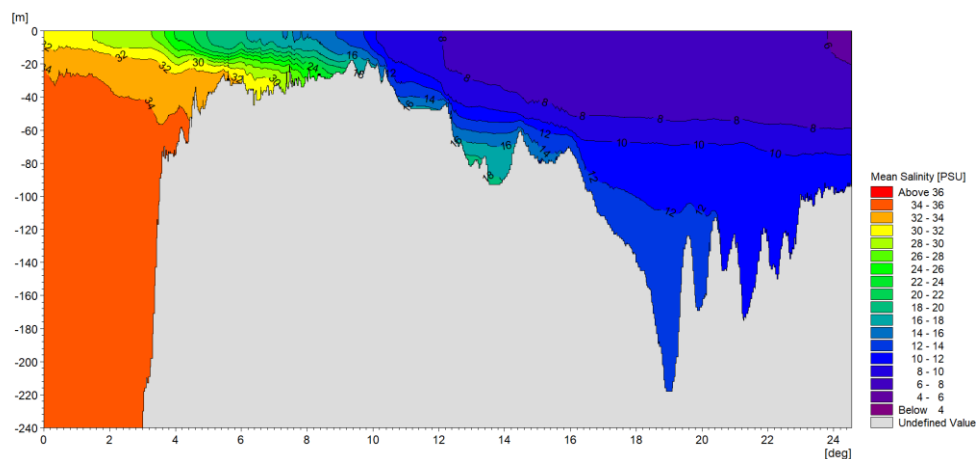
I Kattegat ses et meget lokalt fald i saltholdigheden under haloklinen. Dette skyldes Kattegatforbindelsen, hvor der indgår broløsninger både øst og vest for Samsø, som forårsager en meget lokal nedblanding af vand fra overfladelaget pga. Kattegatforbindelsens turbulensproduktion.

Ændringen i saltholdigheden pga. klimaændringer er vist i Figur 7-22, som viser et fald i saltholdigheden i indre Østersø og i øvre lag i Bælthavet og Kattegat og en stigning i bundlaget i Kattegat. Faldene skyldes øget nettonedbør og afstrømning. Stigningen i bundlaget i Kattegat skyldes mindre nedblanding fra øvre til nedre lag, hvilket øger saliniteten i nedre lag.

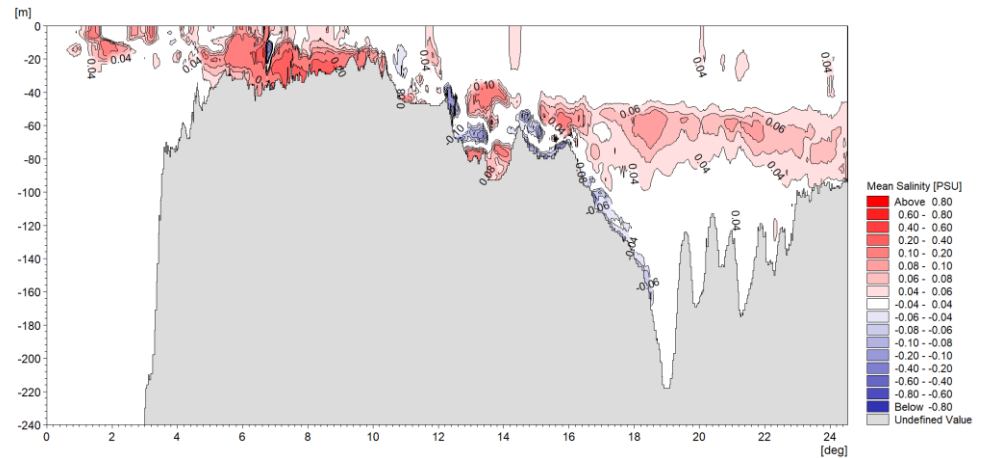
Ændringerne forårsaget af henholdsvis forbindelserne og klimaændringer er af forskellig størrelsesorden, hvor ændringer fra klimaændringer er betydelig større end for forbindelserne. For den indre Østersø er ændringerne fra forbindelserne små. I Bælthavet giver forbindelserne anledning til en lille øgning af saltholdigheden, mens påvirkningerne fra klimaændringerne fører til en tydelig reduceret saltholdighed.



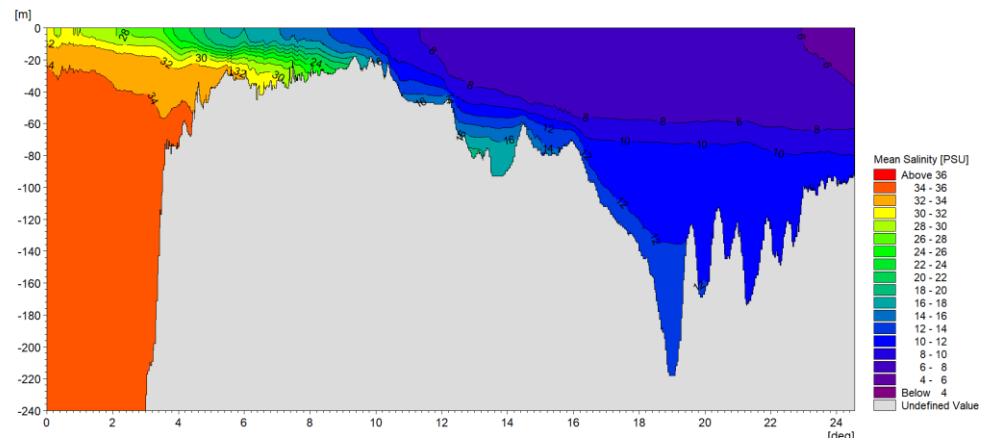
Figur 7-16 Middel saltholdighed langs transekt i 2019 uden forbindelser.



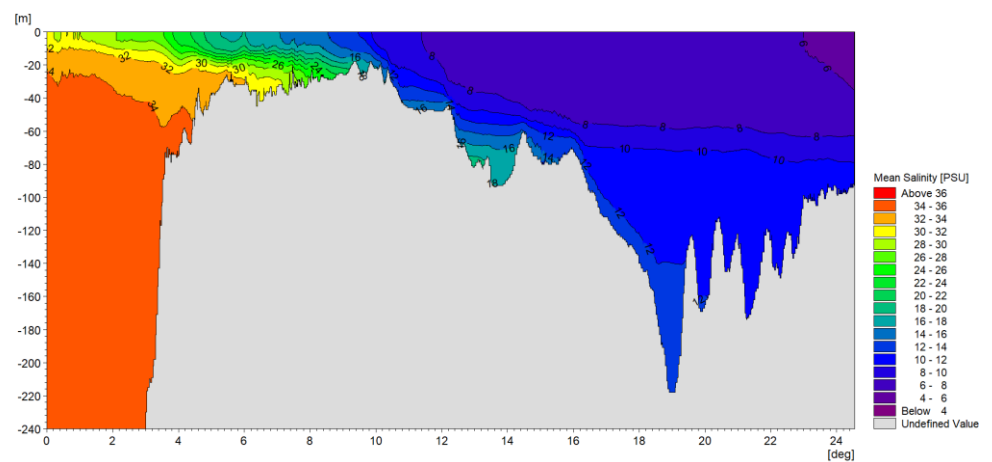
Figur 7-17 Middel saltholdighed langs transekt i 2019 med forbindelser.



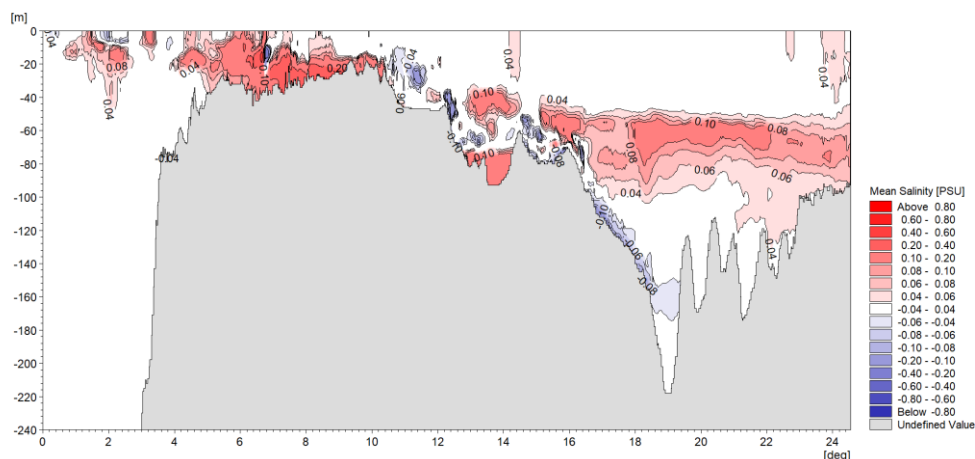
Figur 7-18 Ændring i middel saltholdighed langs transekt i 2019 med og uden forbindelser (positive værdier angiver højere saltholdighed med forbindelser).



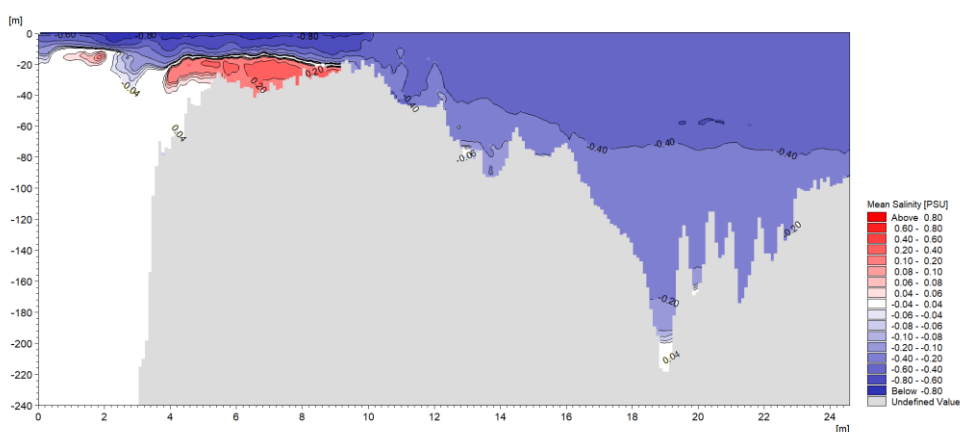
Figur 7-19 Middel saltholdighed langs transekt i 2100 uden forbindelser.



Figur 7-20 Middel saltholdighed langs transekt i 2100 med forbindelser.



Figur 7-21 Ændring i middel saltholdighed langs transekt i 2100 med og uden forbindelser (positive værdier angiver højere saltholdighed med forbindelser).



Figur 7-22 Ændring i middel saltholdighed langs transekt i 2019 uden forbindelser og 2100 uden forbindelser (2100 minus 2019).

### 7.3.3 Middel temperatur

Temperaturfordelingerne er igen vist i samme rækkefølge, som for de tidligere saltholdigheds- og temperaturfordelinger. Temperaturer langs transektet er vist i Figur 7-23 (2019 uden forbindelser), Figur 7-24 (2019 med forbindelser), Figur 7-26 (2100 uden forbindelser) og Figur 7-27 (2100 med forbindelser), og ændringer i temperaturer i Figur 7-25 (2019 med og uden forbindelser), Figur 7-28 (2100 med og uden forbindelser) og Figur 7-29 (2019 og 2100 uden forbindelser).

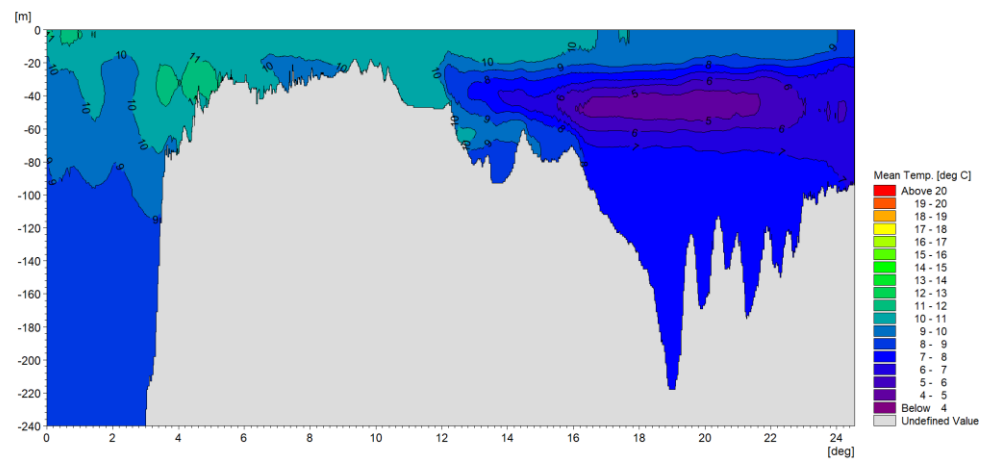
Der ses ved sammenligning af fordelingerne i 2019 med og uden forbindelser (Figur 7-23 og Figur 7-24) og sammenligning af fordelingerne i 2100 med og uden forbindelser (Figur 7-26 og Figur 7-27) kun marginale forskelle i disse fordelinger forårsaget af forbindelserne. Klimaændringerne får generelt temperaturen til at stige.

Ændringen i temperaturen pga. forbindelserne er vist i Figur 7-25 og Figur 7-28, som begge viser uændret temperatur i Kattegat og Bælthavet, fald i nedre lag i Arkona Bassinet, stigende temperatur under haloklinen og faldende temperatur

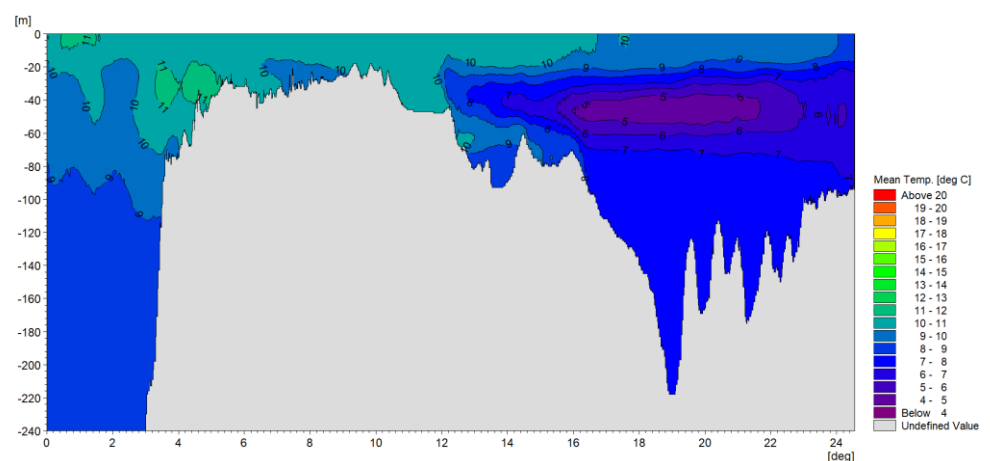
nærmere bunden i Bornholmer Bassinet, og en stigning i nedre lag i Gotlands Bassinet. Der er sporadiske ændringer, som ikke er beskrevet i den korte oversigt over de væsentlige tendenser. Stigningen i bundlaget i Gotlands Bassinet ses som et udtryk for, at betydningen af den regulære indstrømning til indre Østersø stiger, mens betydningen af den irregulære, sjældnere indstrømning bliver mindre. Ændringernes tendenser er forskellige for salt og temperatur, ikke mindst den faldende temperatur i de nedre lag i Gotlands Bassinet. Ændringerne er lidt større i år 2100 end i år 2019.

Ændringen i temperaturen pga. klimaændringer er vist i Figur 7-29, som viser en stigende temperatur i hele transektet og stigende ændringer ind i Østersøen. Denne stigning vil påvirke økosystemet i indre Østersø.

Ændringerne i temperaturen forårsaget af henholdsvis forbindelserne og klimaændringer er meget forskellige. Der er en betydningsfuld temperaturstigning for klimaændringerne, og kun marginale temperaturændringer fra forbindelserne.

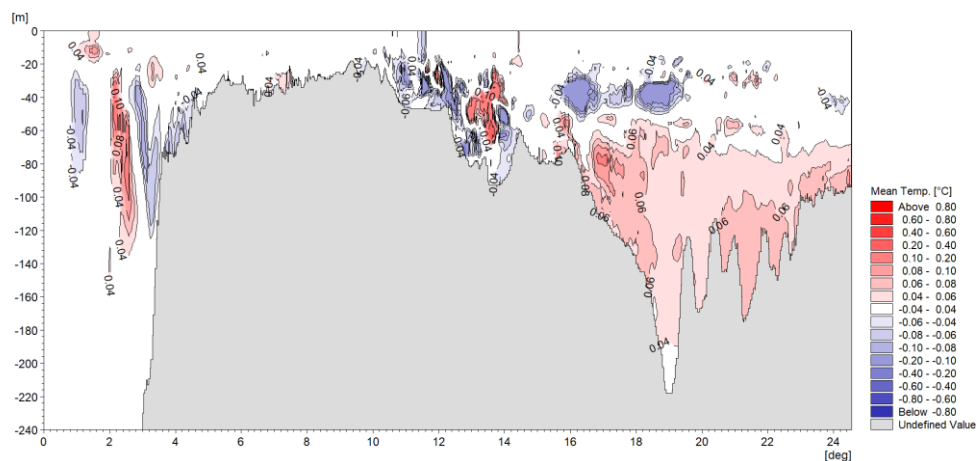


Figur 7-23 Middel temperatur langs transekt i 2019 uden forbindelser.

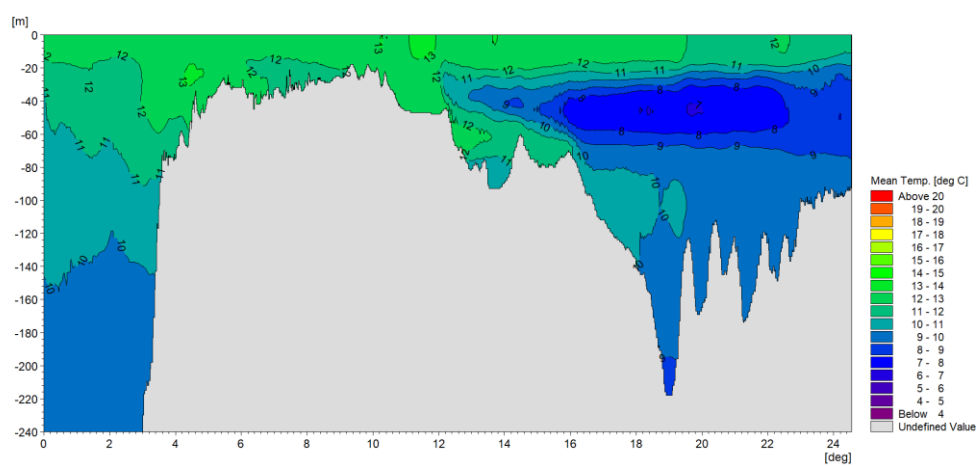


Figur 7-24 Middel temperatur langs transekt i 2019 med forbindelser.

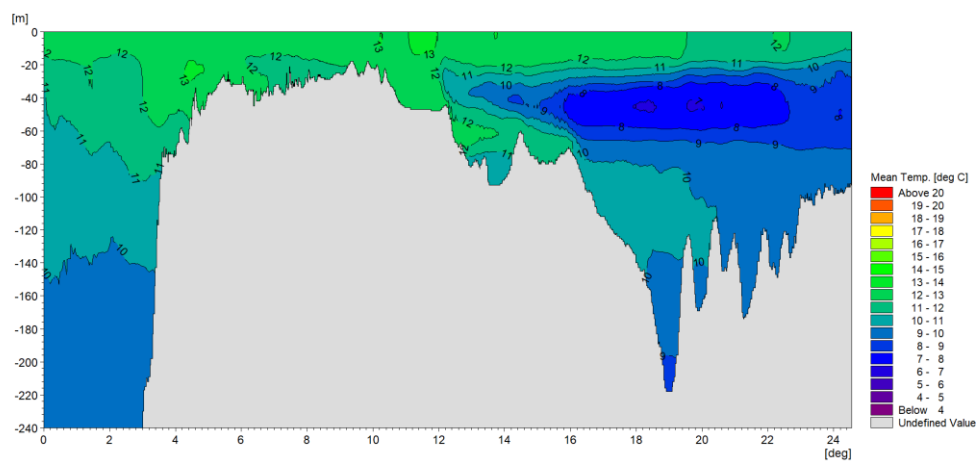




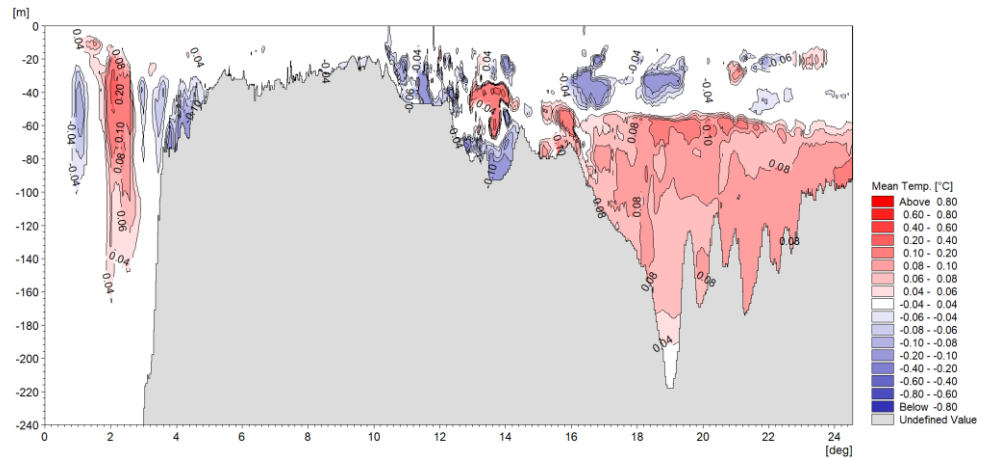
Figur 7-25 Ændring i middel temperatur langs transekt i 2019 med og uden forbindelser (positive værdier angiver højere vandtemperatur med forbindelser).



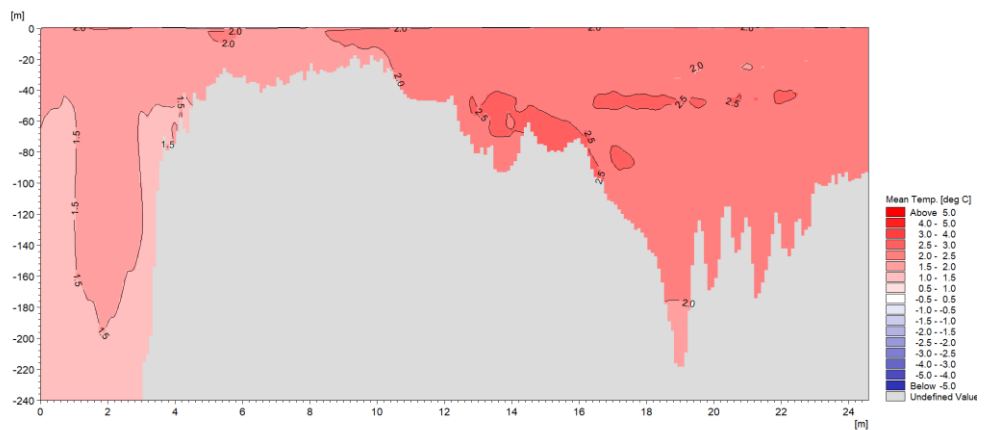
Figur 7-26 Middel temperatur langs transekt i 2100 uden forbindelser.



Figur 7-27 Middel temperatur langs transekt i 2100 med forbindelser.



Figur 7-28 Ændring i middel temperatur langs transekt i 2100 med og uden forbindelser (positive værdier angiver højere vandtemperatur med forbindelser).



Figur 7-29 Ændring i middel temperatur langs transekt i 2019 uden forbindelser og 2100 uden forbindelser (2100 minus 2019).

## 7.4 Fordeling over vertikale profiler

### 7.4.1 Positioner

Kort med de betragtede positioner / stationer er vist i Figur 7-30. Monitoringsdata er indhentet for disse stationer, som er vist i nogle af figurerne i afsnit 7.5.



Figur 7-30 Kort med de betragtede positioner / stationer.

### 7.4.2 Middel saltholdighed

Profiler af middel saltholdighed med og uden forbindelser og med og uden klimaændringer ved positionerne er vist i Figur 7-31 (Anholt i Kattegat), Figur 7-32 (Arkona Bassinet), Figur 7-33 (Bornholmer Bassinet) og Figur 7-34 (Gotlands Bassinet).

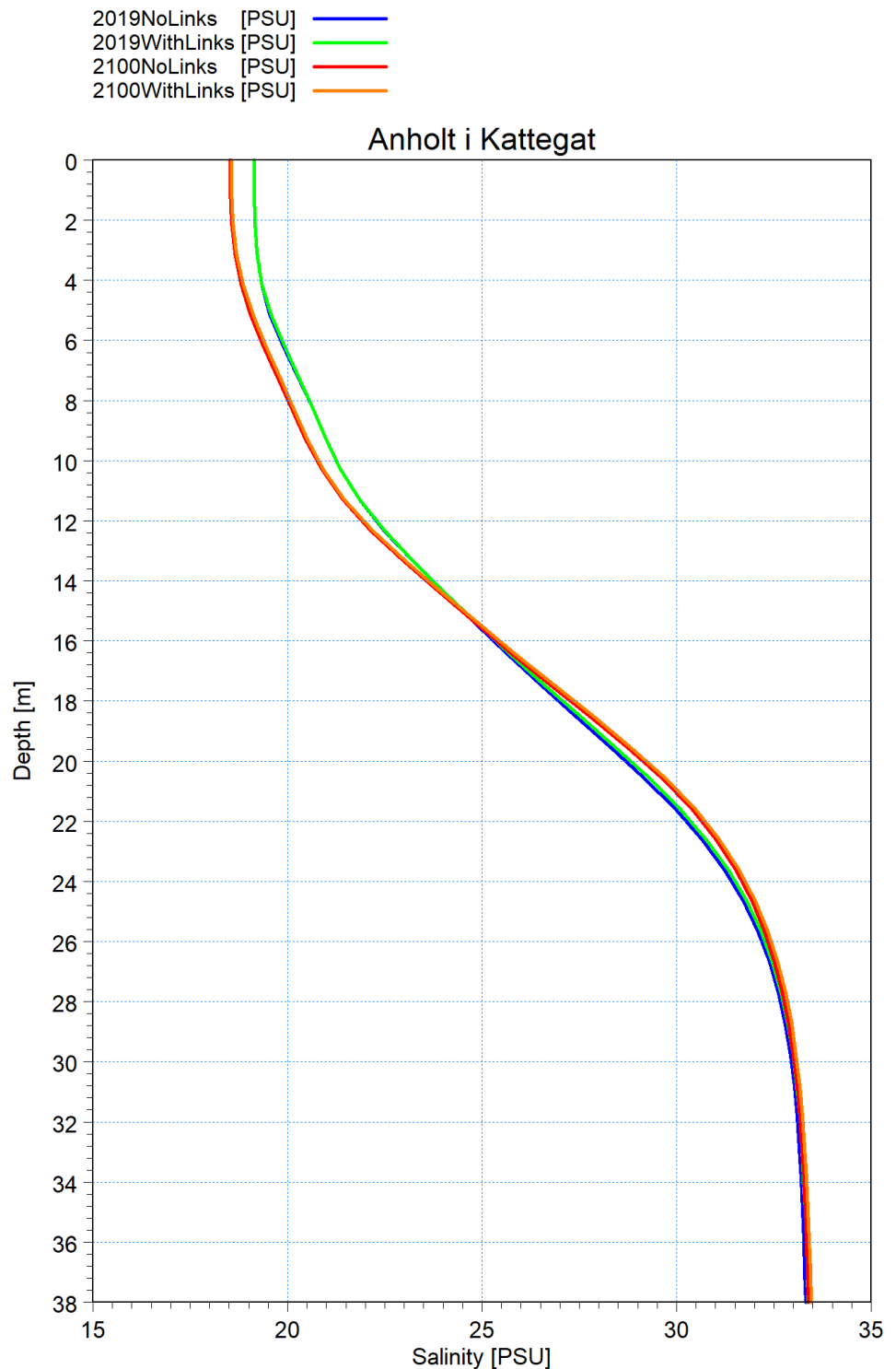
Ved Anholt ses en marginal ændring mellem 2019 med og uden forbindelser og mellem 2019 med og uden forbindelsen. Sammenlignes profilerne i 2019 og 2100 ses det, at klimaændringerne bevirker et fald i saltholdigheden ned til 15 m dybde (pga. øget nedbør og afstrømning) og en stigning fra 15 m til 30 m dybde (pga. øget stabilitet, som mindsker nedblanding). Ændringerne forårsaget af klimaændringer er betydeligt større end ændringerne forårsaget af forbindelserne.

I Arkona Bassinet ses igen en marginal ændring mellem 2019 med og uden forbindelser og mellem 2100 med og uden forbindelsen, og at klimaændringer bevirker et fald i saltholdigheden over hele vanddybden (pga. øget nedbør og afstrømning). Ændringerne forårsaget af klimaændringer er betydeligt større end ændringerne forårsaget af forbindelserne.

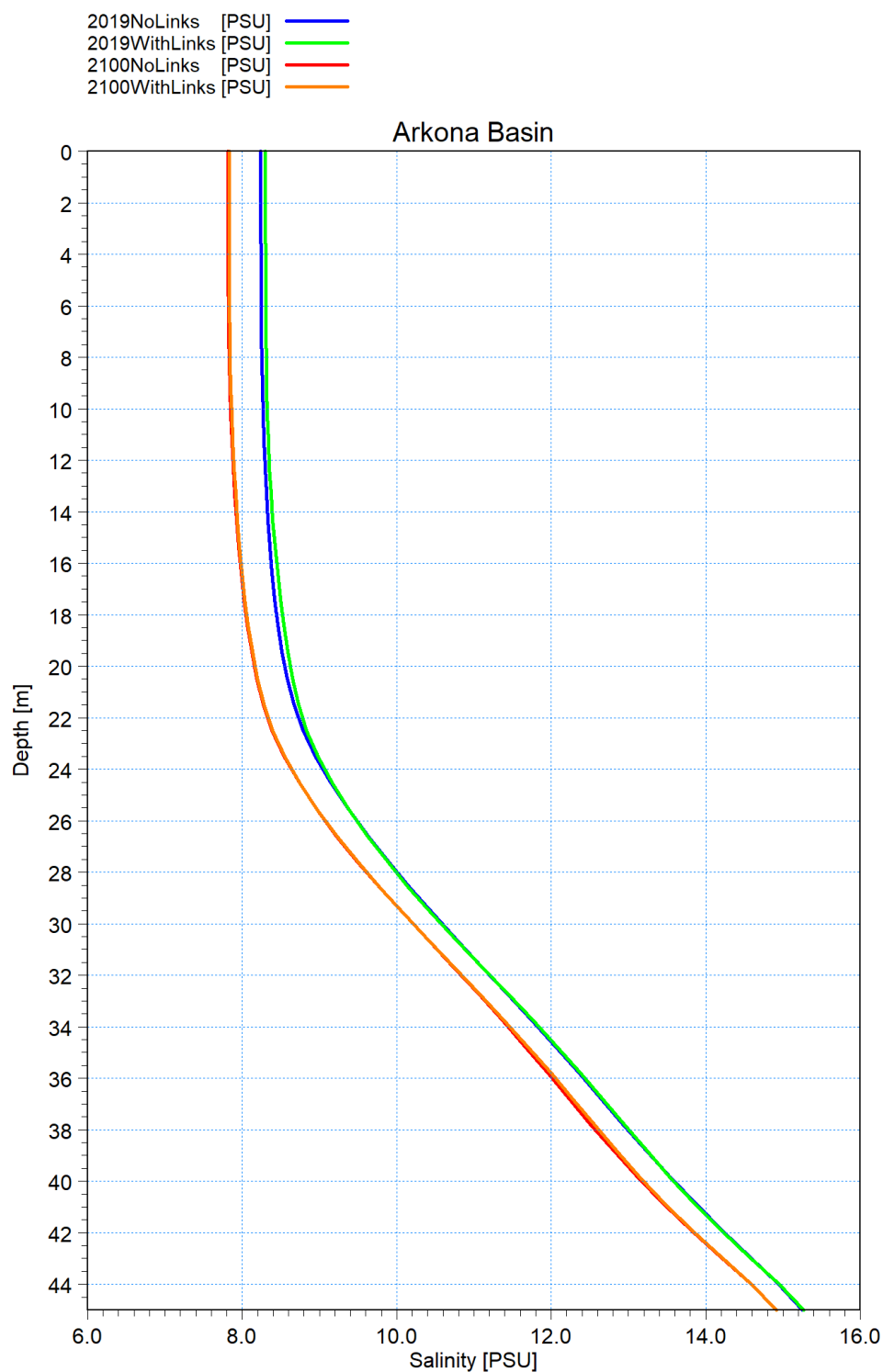
I Bornholmer Bassinet er der igen ikke meget forskel i saltholdighederne med og uden forbindelserne. Ændringen i saltholdighederne med og uden klimaændring viser et tydeligt fald ned til 40 m, derefter en aftagende ændring ned til 50 m, og derefter et mindre fald. Årsagen til den aftagende saltholdighed er den øgede nedbør og afstrømning forårsaget af klimaændringer.

I Gotlands Bassinet ses igen en ubetydelig forskel i ændringen med og uden forbindelser og en aftagende saltholdighed pga. klimaændringer.

Ændringerne forårsaget af henholdsvis forbindelserne og klimaændringer er af forskellig størrelsesorden, hvor ændringer fra klimaændringer er betydelig større end for forbindelserne. For den indre Østersø er ændringerne fra forbindelserne små. I Bælthavet giver forbindelserne anledning til en lille øgning af saltholdigheden, mens påvirkningerne fra klimaændringerne fører til en tydelig reduceret saltholdighed.

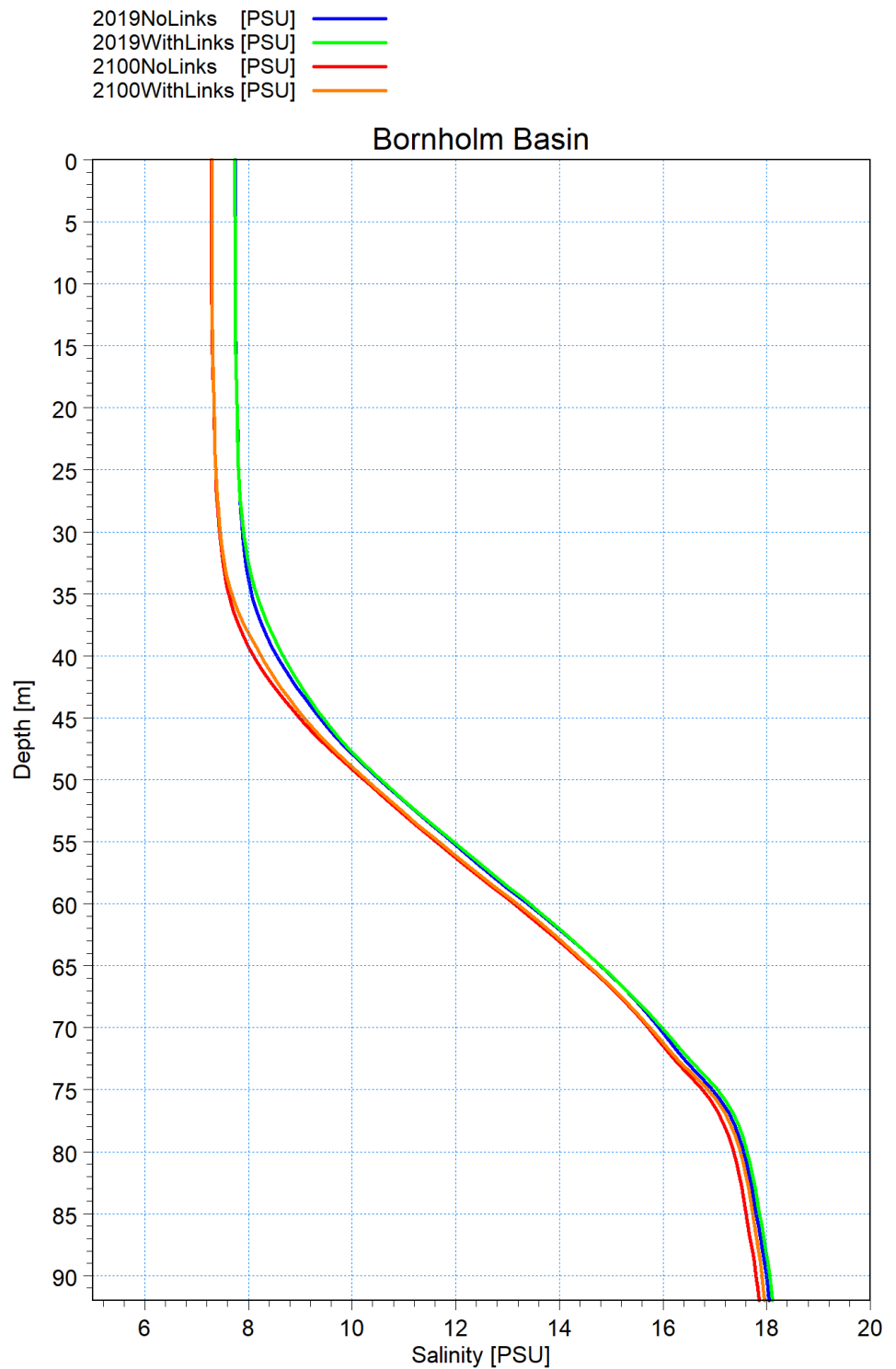


Figur 7-31 Vertikalt profil af middel saltholdighed ved Anholt i Kattegat (SMHIANHOLTE) i 2019 og 2100 med og uden forbindelser.

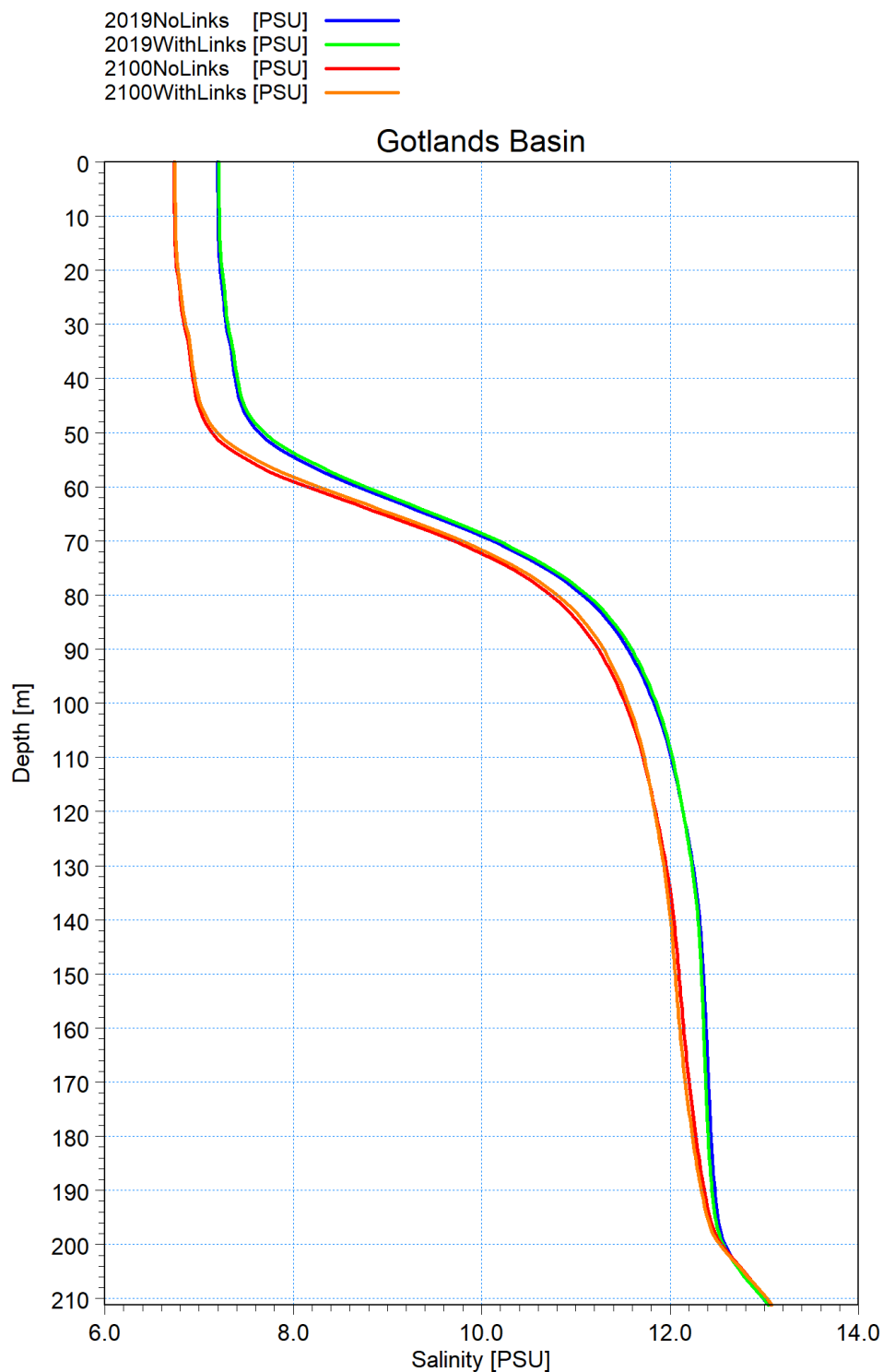


Figur 7-32 Vertikalt profil af middel saltholdighed i Arkona Bassinet (SMHIBY2) i 2019 og 2100 med og uden forbindelser.





Figur 7-33 Vertikalt profil af middel saltholdighed i Bornholmer Bassinet (SMHIBY5) i 2019 og 2100 med og uden forbindelser.



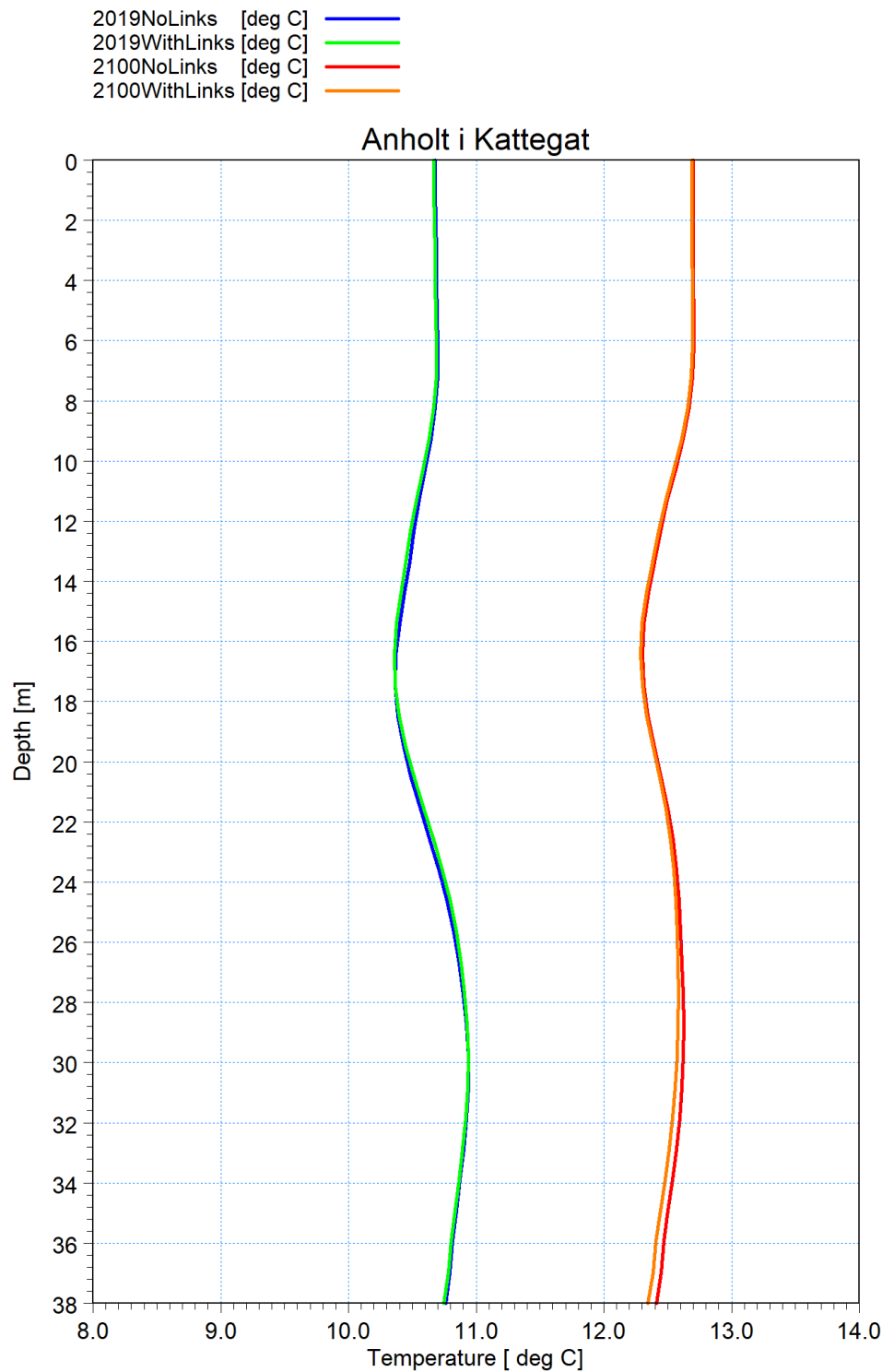
Figur 7-34 Vertikalt profil af middel saltholdighed i Gotlands Bassinet (SMHIBY15) i 2019 og 2100 med og uden forbindelser.

### 7.4.3 Middel temperatur

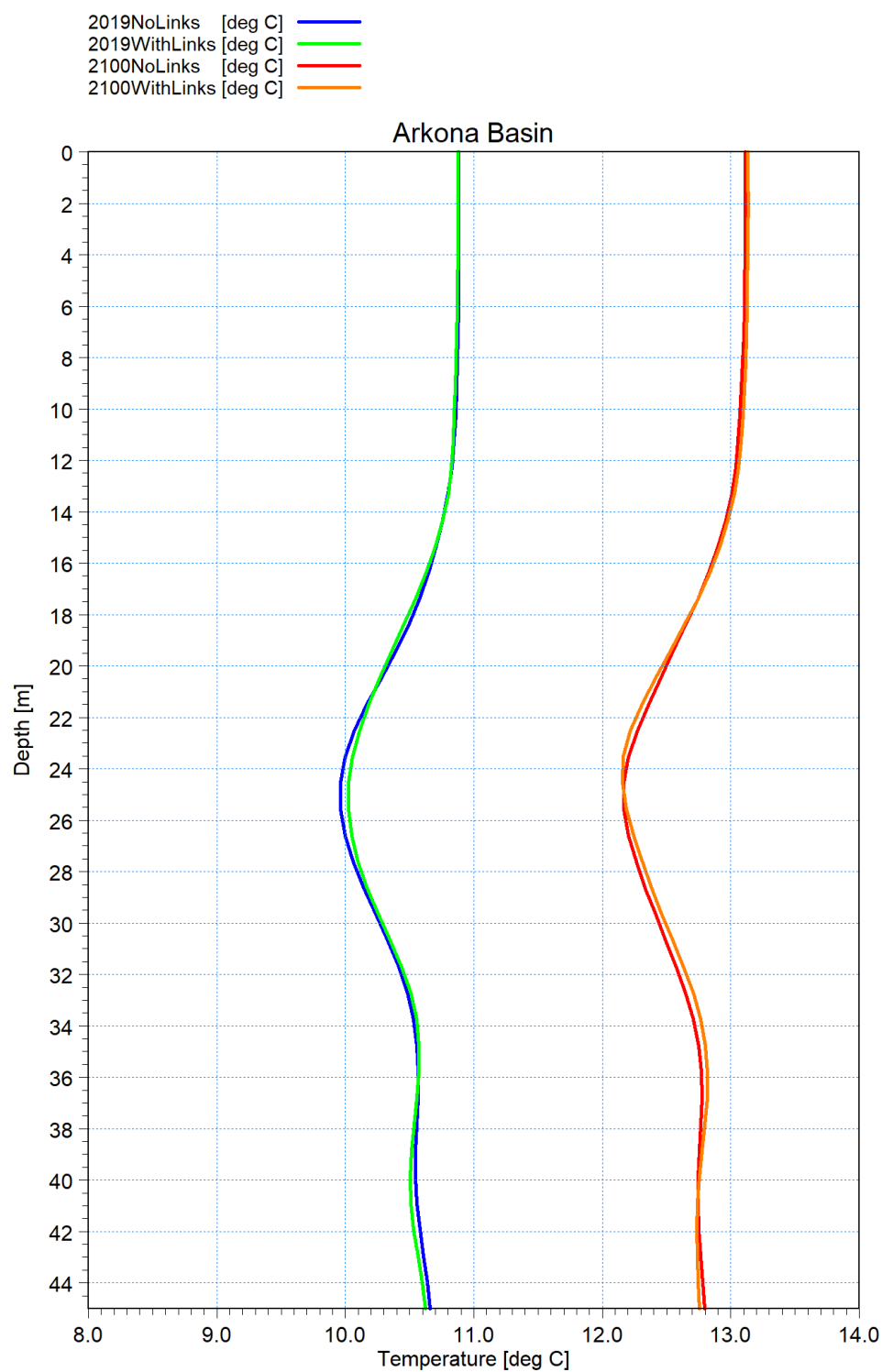
Profiler af middel temperatur ved positionerne (se Figur 7-30) er vist i Figur 7-35 (Anholt i Kattegat), Figur 7-36 (Arkona Bassinet), Figur 7-37 (Bornholmer Bassinet) og Figur 7-38 (Gotlands Bassinet).

Der er kun marginale forskelle i profilerne med og uden forbindelser og en tydelig forskel i middeltemperaturen med og uden klimaændringer på 1.5 – 2 °C.

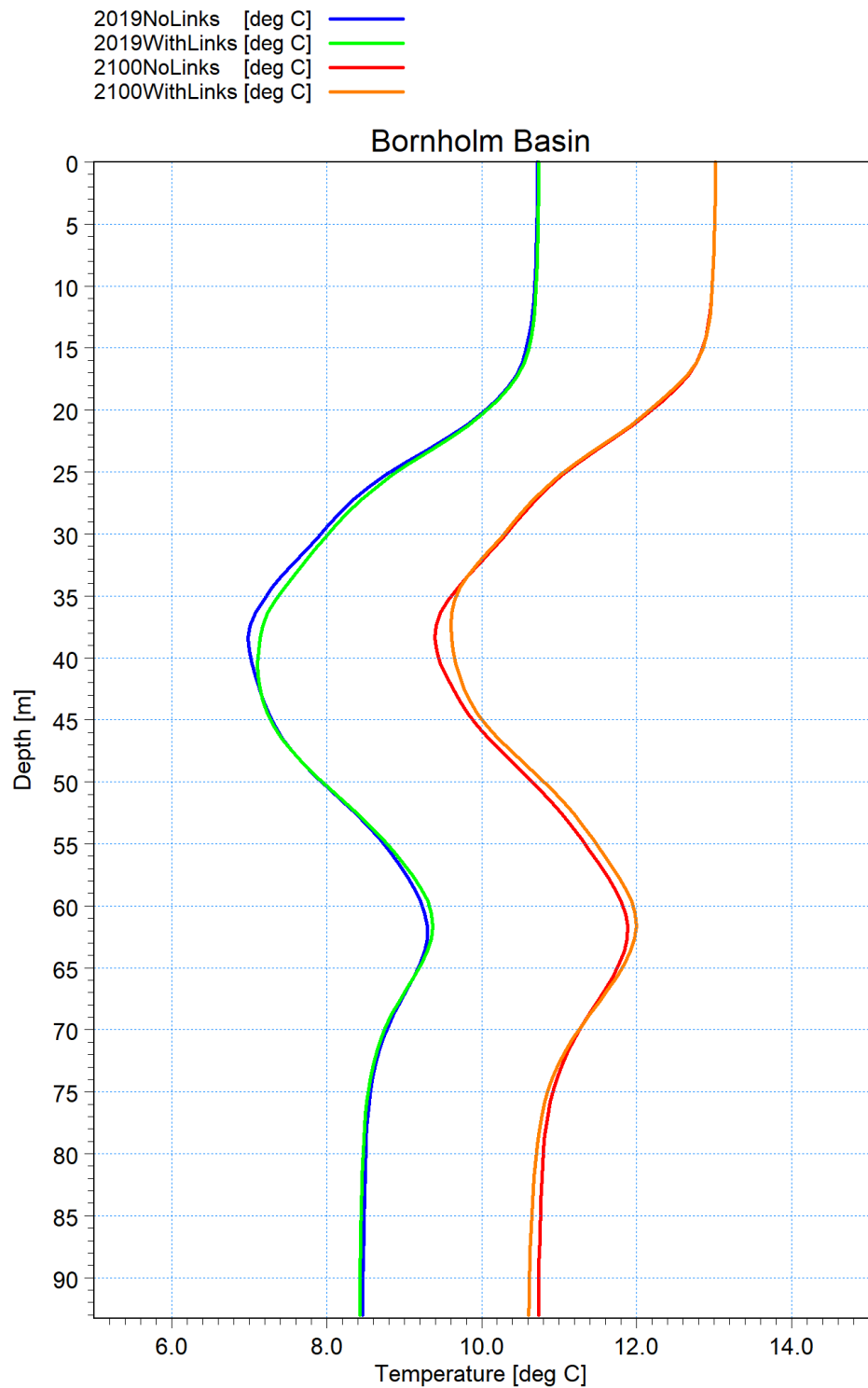
Stigningen i temperaturen fra klimaændringer vil påvirke økosystemet i Østersøen.



Figur 7-35 Vertikalt profil af middel temperatur ved Anholt i Kattegat (SMHIANHOLTE) i 2019 og 2100 med og uden forbindelser.



Figur 7-36 Vertikalt profil af middel temperatur i Arkona Bassinet (SMHIBY2) i 2019 og 2100 med og uden forbindelser.



Figur 7-37 Vertikalt profil af middel temperatur i Bornholmer Bassinet (SMHIBY5) i 2019 og 2100 med og uden forbindelser.





Figur 7-38 Vertikalt profil af middel temperatur i Gotlands Bassinet (SMHIBY15) i 2019 og 2100 med og uden forbindelser.

## 7.5 Tidslig variation i udvalgte dybder

### 7.5.1 Positioner

Tidslig variation af saltholdighed og temperatur er vist for øvre og nedre lag ved positionerne markeret i Figur 7-30.

Målt saltholdighed og temperatur i 2019 er også vist sammen med beregnede tidsserier. Da beregninger er gentaget 20 gange (dvs. 20 gange med 1 år), skal der ikke være overensstemmelse mellem målinger og beregninger.

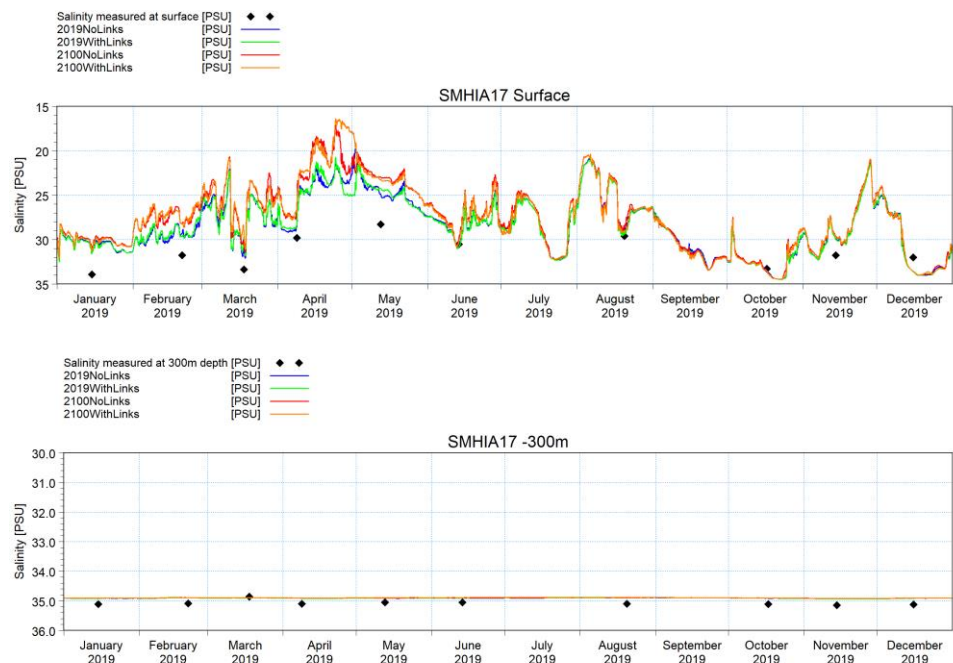
### 7.5.2 Skagerrak

Beregnet og målt saltholdighed og temperatur i Skagerrak er vist i Figur 7-39 og Figur 7-40.

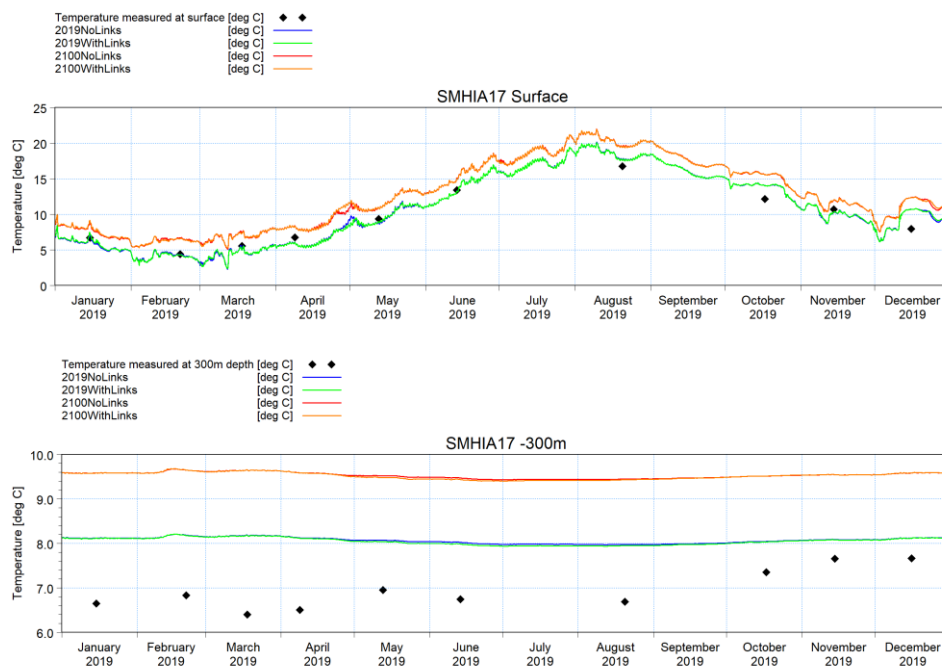
Saltholdighedsforskellen i øvre lag for: A) 2019 med og uden forbindelser og B) 2100 med og uden forbindelser er i begge tilfælde marginal og mindre end forskellen forårsaget af klimaændringer. Forskellene forårsaget af både forbindelser og klimaændringer ses fra februar til juni og er i de øvrige måneder næsten ikke til at få øje på. Den naturlige variationsstørrelse i øvre lag er betydeligt større end ændringerne fra både klimaændringer og forbindelser.

Der ses ikke nævneværdige saltholdighedsændringer i nedre lag.

For temperaturen er den helt dominerende ændring den fra klimaændringer.



Figur 7-39 Tidsserier af overfladesaltholdighed og dybere (–300 m) saltholdighed i Skagerrak (SMHIA17) i 2019 og 2100 med og uden forbindelser.



Figur 7-40 Tidsserier af overflade- og dybere (–300 m) temperatur i Skagerrak (SMHIA17) i 2019 og 2100 med og uden forbindelser.

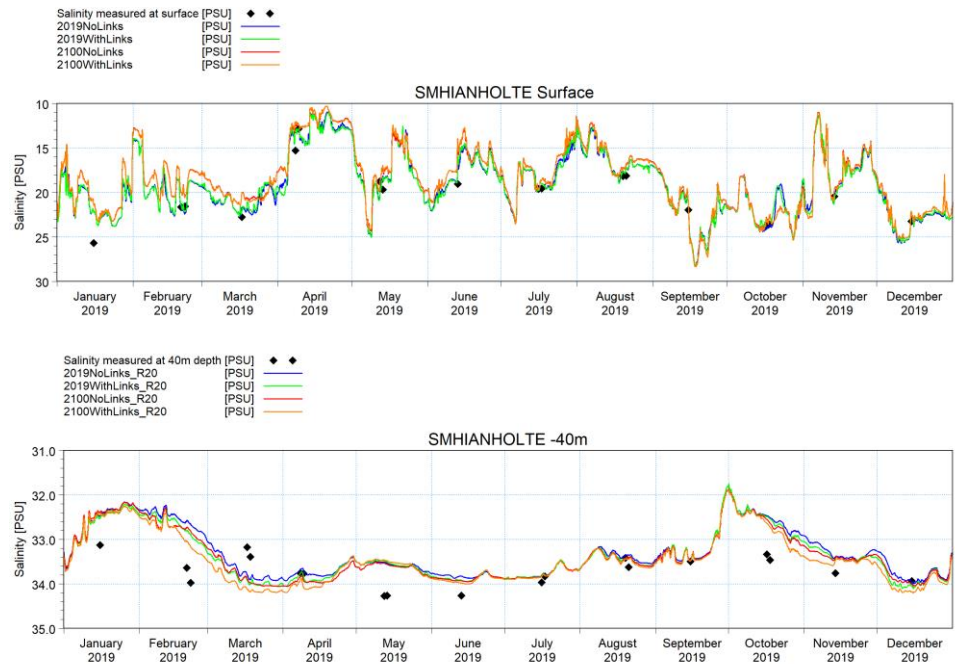
### 7.5.3 Kattegat

Beregnet og målt saltholdighed og temperatur i Kattegat nær Anholt er vist i Figur 7-41 og Figur 7-42.

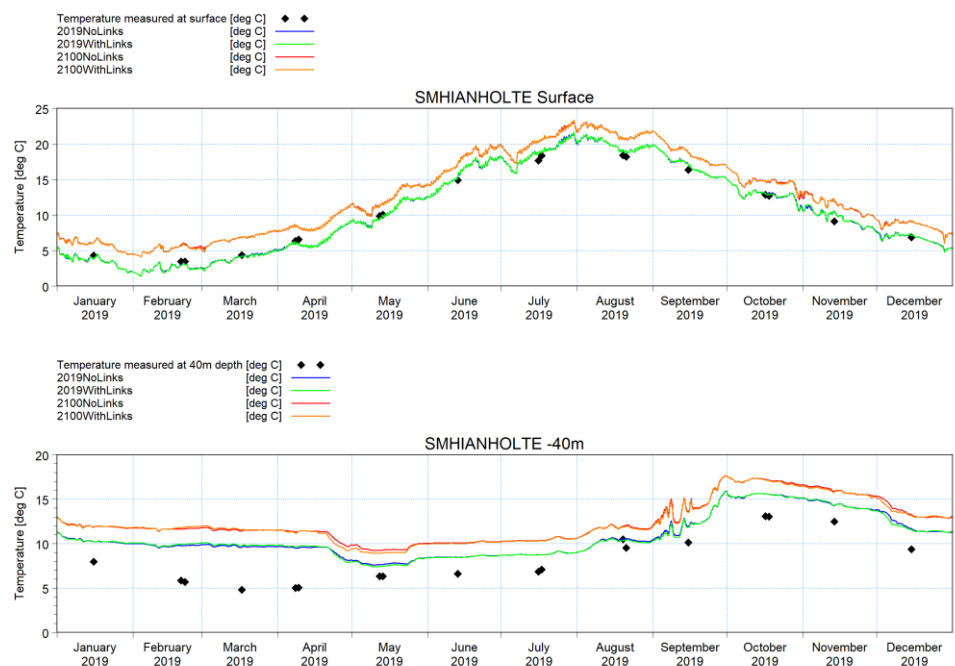
Saltholdighedsforskellen i øvre lag for: A) 2019 med og uden forbindelser og B) 2100 med og uden forbindelser er i begge tilfælde marginal og mindre end forskellen forårsaget af klimaændringer. Forskellene forårsaget af klimaændringer ses tydeligst i februar, marts og april, mens forskellen forårsaget af forbindelserne er lille og svær at se. Den naturlige variationsstørrelse i øvre lag er betydeligt større end ændringerne fra både klimaændringer og forbindelser.

Forskelle i saltholdighed i nedre lag forårsaget af både klimaændringer og forbindelser er synlige og i samme størrelsesorden. Ændringerne er synlige på grund af den anvendte fine skala, men er marginale. Den årlige variation er dominerende.

For temperaturen er den dominerende ændring den fra klimaændringer.



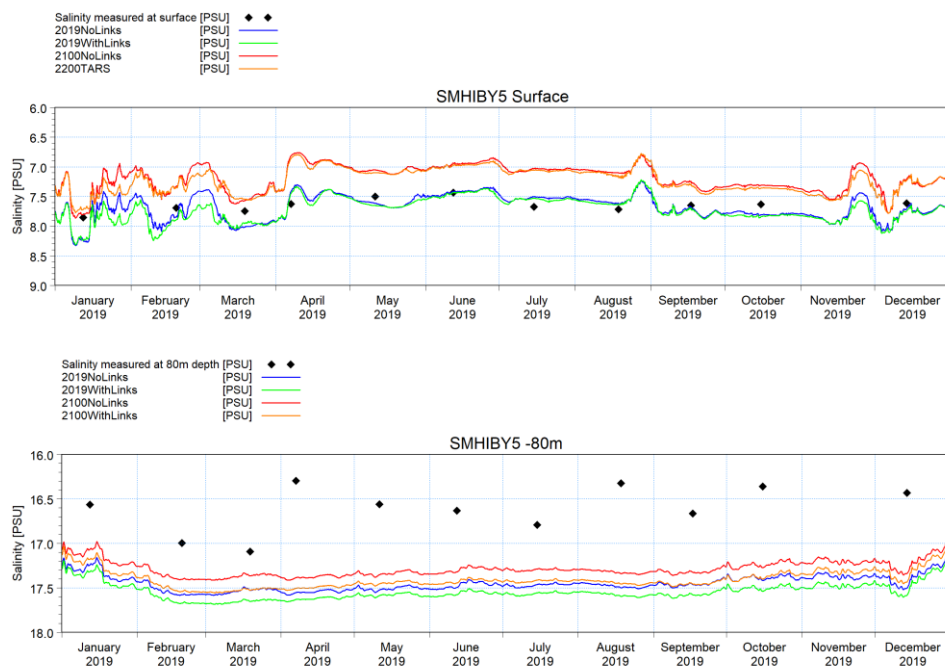
Figur 7-41 Tidsserier af overfladesaltholdighed og dybere (–40 m) saltholdighed ved Anholt i Kattegat (SMHIANHOLTE) i 2019 og 2100 med og uden forbindelser.



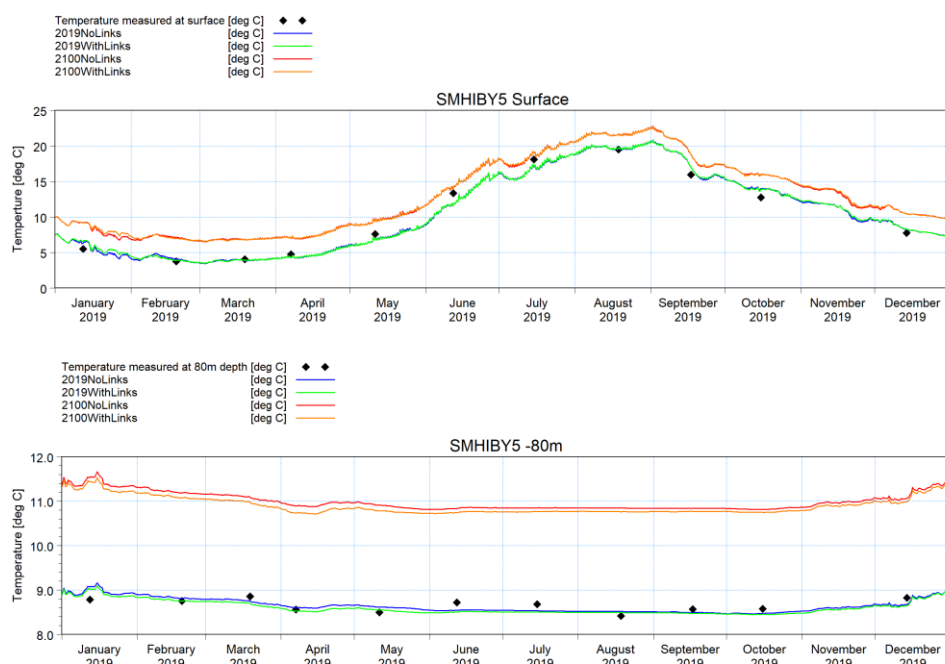
Figur 7-42 Tidsserier af overfladetemperatur og dybere (–40 m) temperatur ved Anholt i Kattegat (SMHIANHOLTE) i 2019 og 2100 med og uden forbindelser.

## 7.5.4 Bornholmer Bassinet

Beregnet og målt saltholdighed og temperatur i Bornholmer Bassinet er vist i Figur 7-43 og Figur 7-44.



Figur 7-43 Tidsserier af overfladesaltholdighed og dybere (–80 m) saltholdighed i Bornholmer Bassinet (SMHIBY5) i 2019 og 2100 med og uden forbindelser.



Figur 7-44 Tidsserier af overfladetemperatur og dybere (–80 m) temperatur i Bornholmer Bassinet (SMHIBY5) i 2019 og 2100 med og uden forbindelser.

Saltholdighedsforskellen i øvre lag for: A) 2019 med og uden forbindelser og B) 2100 med og uden forbindelser er i begge tilfælde marginal og mindre end forskellen forårsaget af klimaændringer. Forskellene forårsaget af forbindelserne ses tydeligst i anden halvdel af januar, februar, starten af marts og anden halvdel af november, mens forskellene forårsaget af klimaændringer ses gennem hele året. Den naturlige variationsstørrelse i øvre lag og forskellene forårsaget af

klimaændringer er sammenlignelige, mens forskellene forårsaget af forbindelserne er mindre end begge disse.

Ændringerne i saltholdighed i nedre lag er synlige på grund af den anvendte fine skala, men er marginal, se også afsnit 7.4 og 7.6. Saltholdigheden i det nedre lag er omkring 1 g/kg højere end i målingerne, hvilket den også er i den oprindelige beregning, så årsagen til denne forskel er ikke gentagelsen af 2019.

For temperaturen er den dominerende ændring den fra klimaændringer.

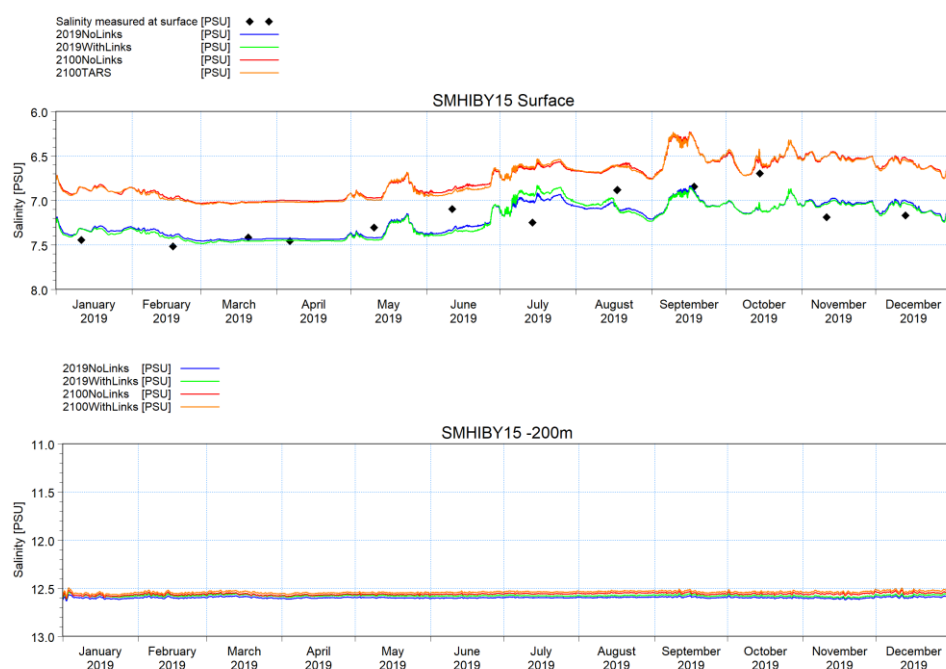
### 7.5.5 Gotlands Bassinet

Beregnet og målt saltholdighed og temperatur i Gotlands Bassinet er vist i Figur 7-45 og Figur 7-46.

Saltholdighedsforskellen i øvre lag for: A) 2019 med og uden forbindelser og B) 2100 med og uden forbindelser er i begge tilfælde marginal og mindre end forskellen forårsaget af klimaændringer. Forskellene forårsaget af forbindelserne ses tydeligst i juni og juli, mens forskellene forårsaget af klimaændringer ses gennem hele året. Den naturlige variationsstørrelse i øvre lag og forskellene forårsaget af klimaændringer er sammenlignelige, mens forskellene forårsaget af forbindelserne er meget mindre end begge disse.

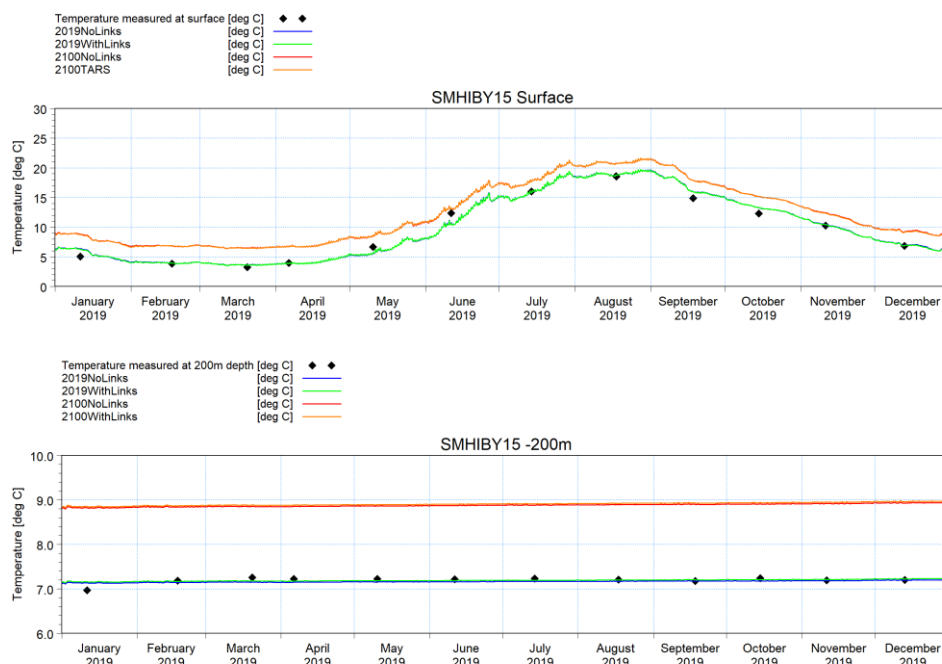
Ændringerne i saltholdighed i nedre lag er ikke synlige og er marginal.

For temperaturen er den dominerende ændring fra klimaændringer. Temperaturændringen vil påvirke økosystemet.



Figur 7-45 Tidsserier af overflade- og dybere saltholdighed i Gotlands Bassinet (SMHIBY15) i 2019 og 2100 med og uden forbindelser.

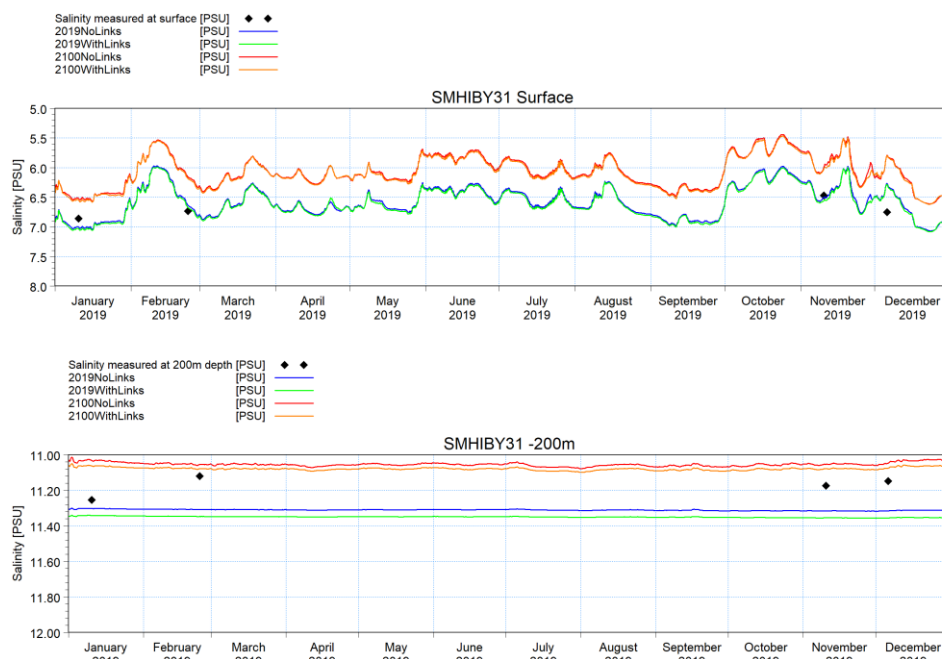




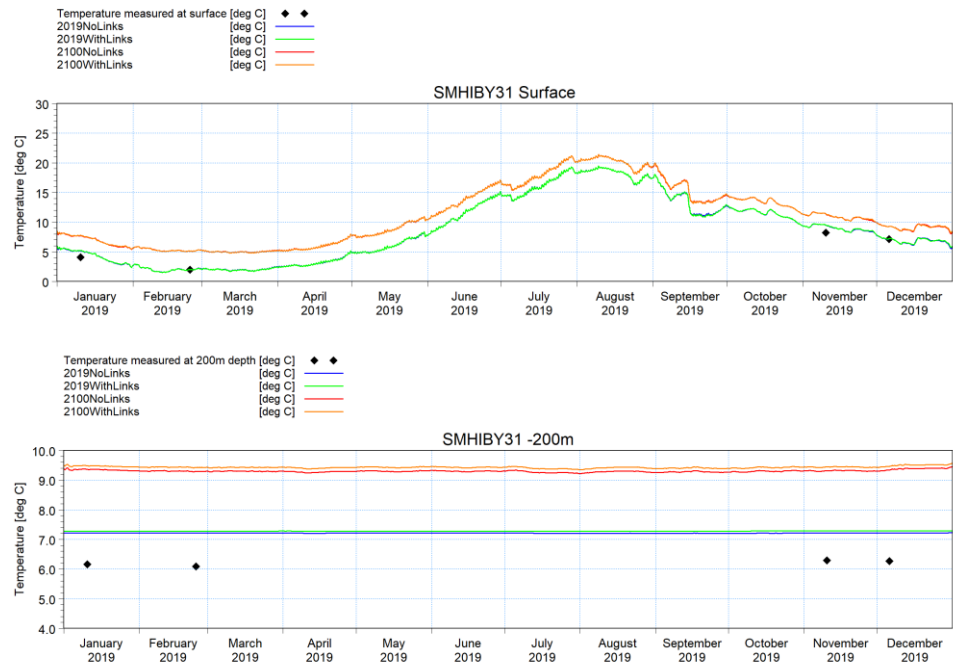
Figur 7-46 Tidsserier af overflade- og dybere temperatur i Gotlands Bassinet (SMHIBY15) i 2019 og 2100 med og uden forbindelser.

### 7.5.6 Landsort Dybet

Beregnet og målt saltholdighed og temperatur i Landsort Dybet er vist i Figur 7-47 og Figur 7-48.



Figur 7-47 Tidsserier af overfladesaltholdighed og dybere (–200 m) saltholdighed i Landsort Dybet (SMHIBY31) i 2019 og 2100 med og uden forbindelser.



Figur 7-48 Tidsserier af overfladetemperatur og dybere (–200 m) temperatur i Land-sort Dybet (SMHIBY31) i 2019 og 2100 med og uden forbindelser.

Saltholdighedsforskellen i øvre lag for: A) 2019 med og uden forbindelser og B) 2100 med og uden forbindelser er i begge tilfælde marginal og mindre end forskellen forårsaget af klimaændringer. Forskellene forårsaget af klimaændringer ses gennem hele året, mens forskellene forårsaget af forbindelserne er små og svære at få øje på. Den naturlige variationsstørrelse i øvre lag og forskellene forårsaget af klimaændringer er sammenlignelige, mens forskellene forårsaget af forbindelserne er meget mindre end begge disse.

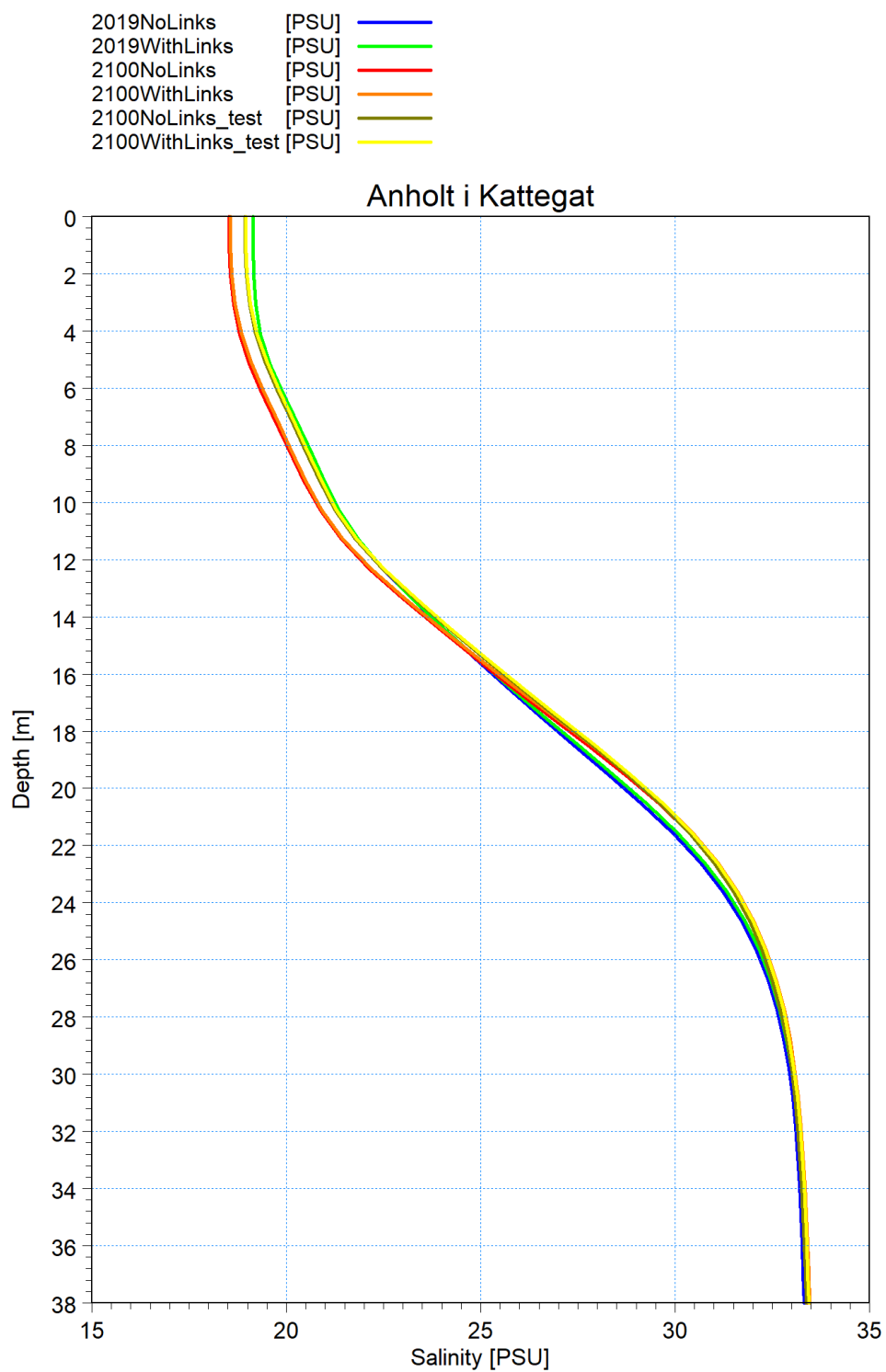
Ændringerne i saltholdighed i nedre lag forårsaget af både klimaændringer og forbindelser er synlige. Ændringer forårsaget af klimaændringerne er større end den naturlige variationsstørrelse. Ændringer forårsaget af forbindelser er marginal og er mindre end den naturlige variationsstørrelse.

For temperaturen er den dominerende ændring den fra klimaændringer.

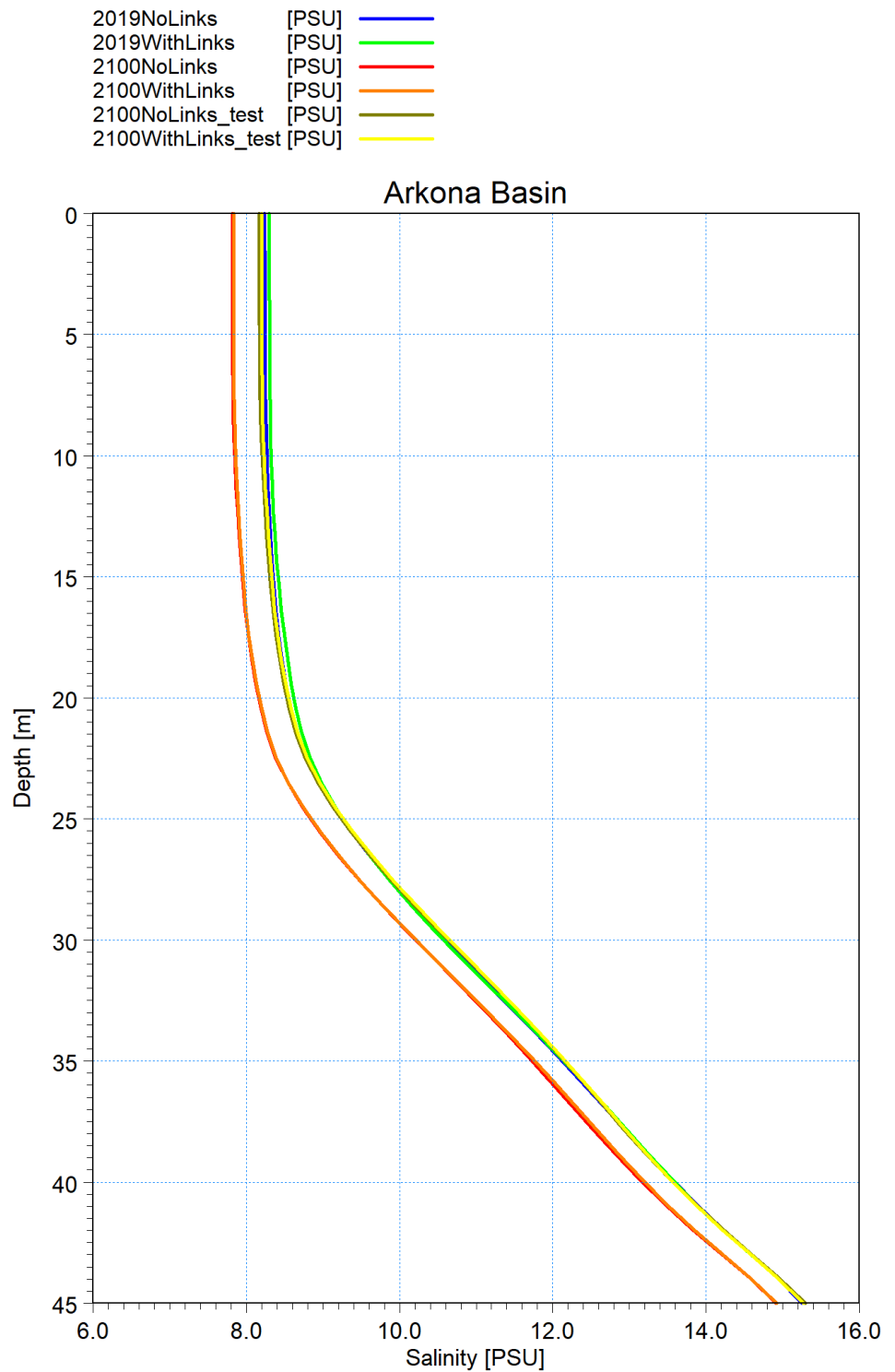
## 7.6 Sensitivitetstest

Fordampningen fra land (evapotranspiration) kan variere en del i fremtiden, for eksempel pga. ændret arealudnyttelse, hvilket ledte til en sensitivitetstest af afstrømningen fra land. En højere fordampning fra land mindsker afstrømningen til Østersøen. I sensitivitetstesten halveres øgningen i afstrømning. Med den Globale Hydrologiske Model er øgning i afstrømning beregnet til 18,7%, hvilket i sensitivitetstesten mindskes til 9,4%.

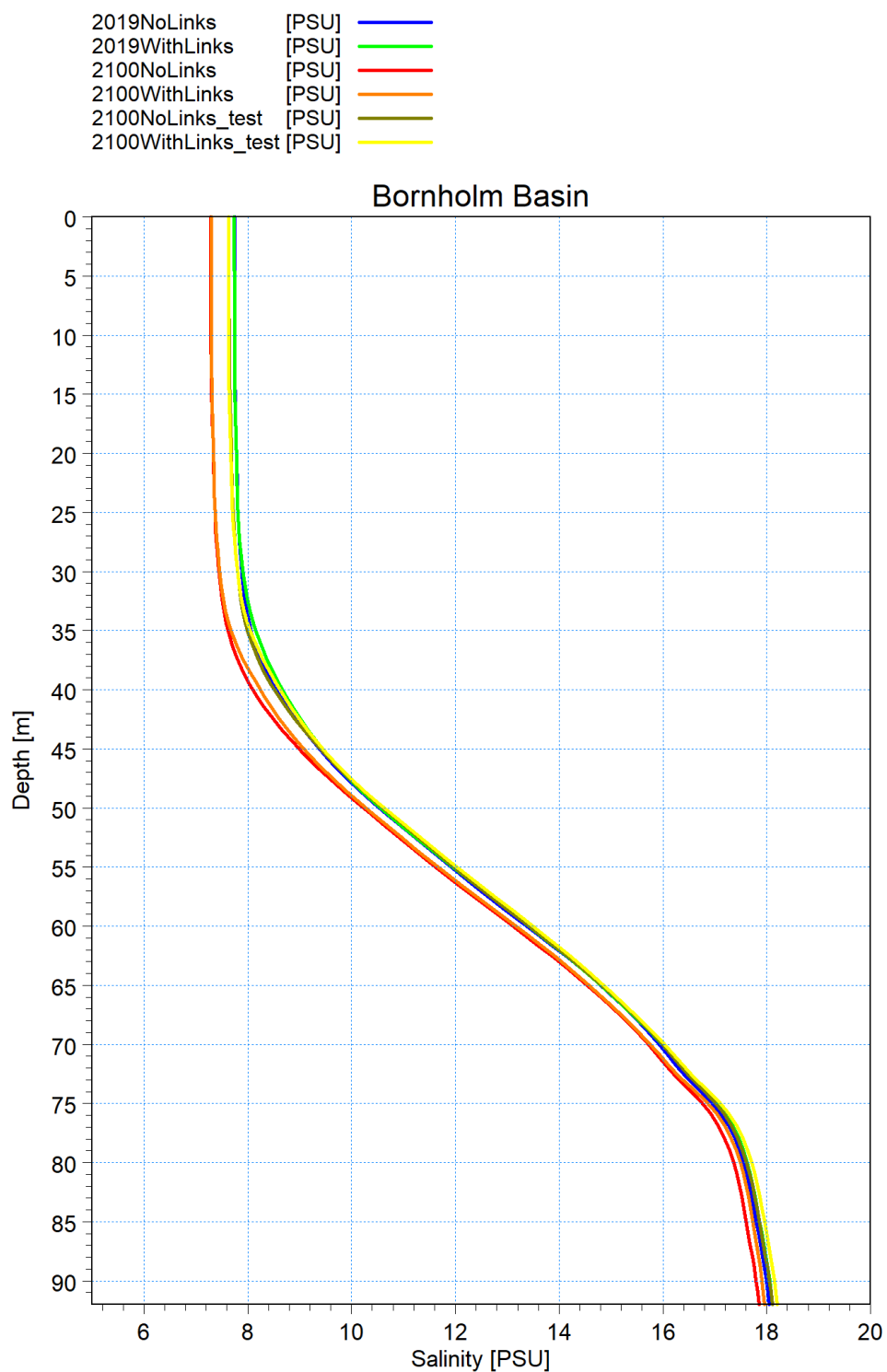
Profiler af middel saltholdighed ved positionerne vist i Figur 7-30 er vist i Figur 7-49 (Anholt i Kattegat), Figur 7-50 (Arkona Bassinet), Figur 7-51 (Bornholmer Bassinet) og Figur 7-52 (Gotlands Bassinet).



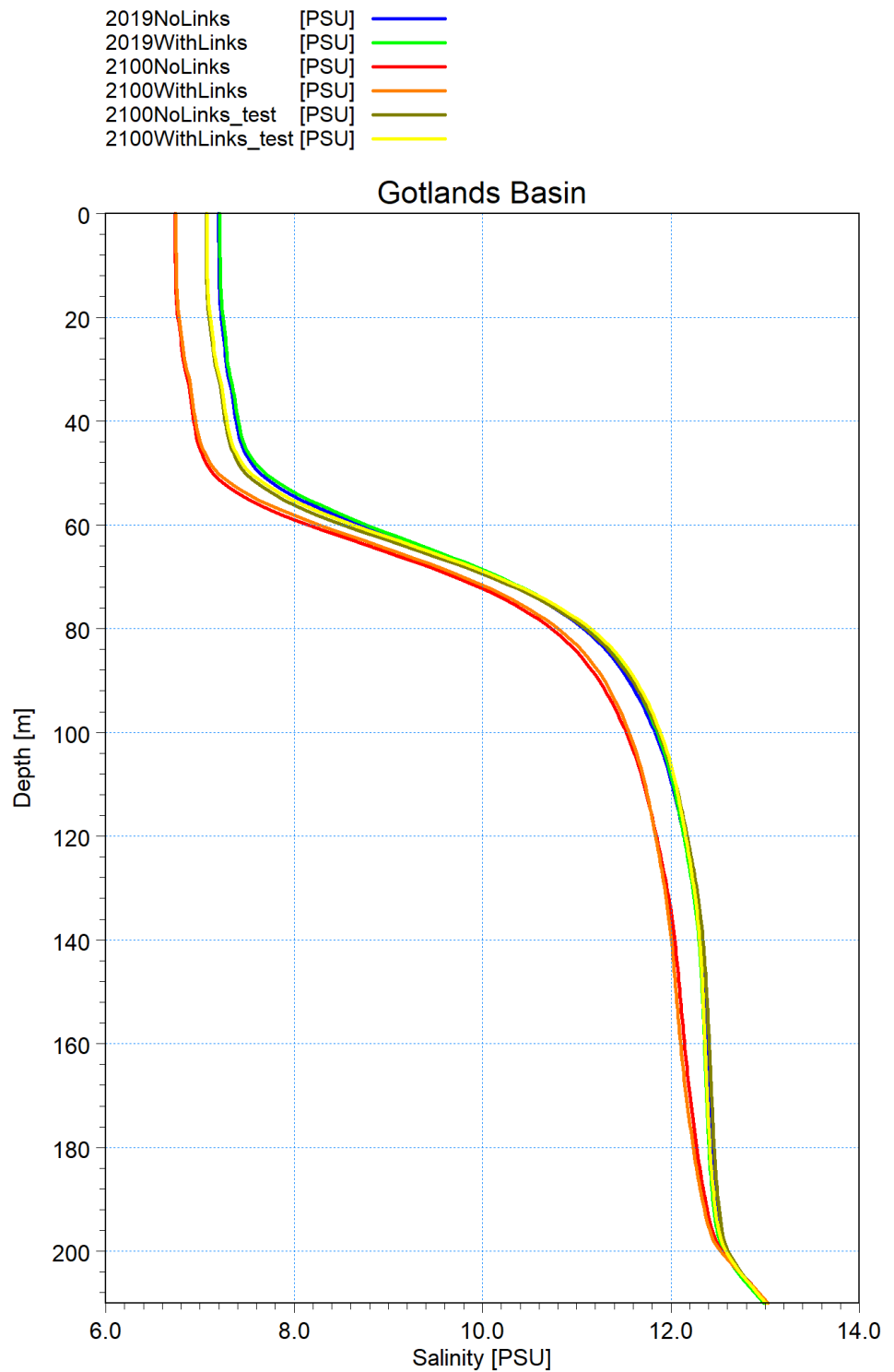
Figur 7-49 Vertikalt profil af middel saltholdighed ved Anholt i Kattegat (SMHIANHOLTE) i 2019, 2100 og 2100-sensitivitetstest med og uden forbindelser.



*Figur 7-50 Vertikalt profil af middel saltholdighed i Arkona Bassinet (SMHIBY2) i 2019, 2100 og 2100-sensitivitetstest med og uden forbindelser.*



Figur 7-51 Vertikalt profil af middel saltholdighed i Bornholmer Bassinet (SMHIBY5) i 2019, 2100 og 2100-sensitivitetstest med og uden forbindelser.



Figur 7-52 Vertikalt profil af middel saltholdighed i Gotlands Bassinet (SMHIBY15) i 2019, 2100 og 2100-sensitivitetstest med og uden forbindelser.

Profilerne er i dette tilfælde vist for 2019, 2100 og 2100-sensitivitetstest. 2100-sensitivitetstesten er med alle de bestemte klimæændringer, men afstrømningen fra land er kun øget med det halve af den beregnede øgning i afstrømning. Forøgelsen i afstrømning til Østersøen er bestemt til +19%, se Tabel 3-2, og den er således i sensitivitetstesten kun +9,5%.



Nedbørens øgning pga. klimaændringer er ikke halveret. Sensitivitetstestens fokus er den beregnede fordampning over land og dens betydning for afstrømningen, og derfor er det kun afstrømningen, som mindskes i sensitivitetstesten.

Sensitivitetstesten viser, at de beregnede saltholdighedsprofiler i sensitivitetstesten er meget lig dem, der er beregnet i 2019. Dvs. at en vandstandsstigning på +0,5 m og en afstrømningsøgning på +10% har modsatrettet effekt på saltholdighedsprofilerne og er af samme størrelsesorden. Påføres begge, fås omtrentligt de oprindelige profiler i 2019.

Saltholdigheder for en dybde i øvre og nedre lag er vist i Tabel 7-1.

Tabel 7-1 Saltholdighed i øvre og nedre lag ved Anholt i Kattegat (SMHIANHOLTE), Arkona Bassinet (SMHIBY2), Bornholmer Bassinet (SMHIBY5) og Gotlands Bassinet (SMHIBY15).

|                      | Kattegat<br>(g/kg) |       | Arkona<br>(g/kg)  |        |
|----------------------|--------------------|-------|-------------------|--------|
| Østersø Model        | -2 m               | -34 m | -2 m              | -4 2m  |
| 2019 uden forb.      | 19,15              | 33,21 | 8,24              | 14,25  |
| 2019 med forb.       | 19,15              | 33,26 | 8,30              | 14,24  |
| 2100 uden forb.      | 18,56              | 33,27 | 7,82              | 13,85  |
| 2100 med forb.       | 18,60              | 33,34 | 7,83              | 13,86  |
| 2100 uden forb. test | 18,98              | 33,26 | 8,17              | 14,23  |
| 2100 med forb. test  | 18,99              | 33,32 | 8,20              | 14,22  |
|                      | Bornholm<br>(g/kg) |       | Gotland<br>(g/kg) |        |
| Østersø Model        | -2 m               | -85 m | -2 m              | -140 m |
| 2019 uden forb.      | 7,68               | 17,45 | 7,21              | 12,31  |
| 2019 med forb.       | 7,72               | 17,54 | 7,22              | 12,29  |
| 2100 uden forb.      | 7,19               | 17,28 | 6,75              | 12,03  |
| 2100 med forb.       | 7,23               | 17,40 | 6,76              | 12,00  |
| 2100 uden forb. test | 7,54               | 17,54 | 7,08              | 12,34  |
| 2100 med forb. test  | 7,57               | 17,64 | 7,08              | 12,30  |

## 7.7 Netto transporter

### 7.7.1 Tværsnit

Syv tværsnit i de Danske Stræder (eller i Arkona Bassinet) er betragtet, se Figur 7-53.

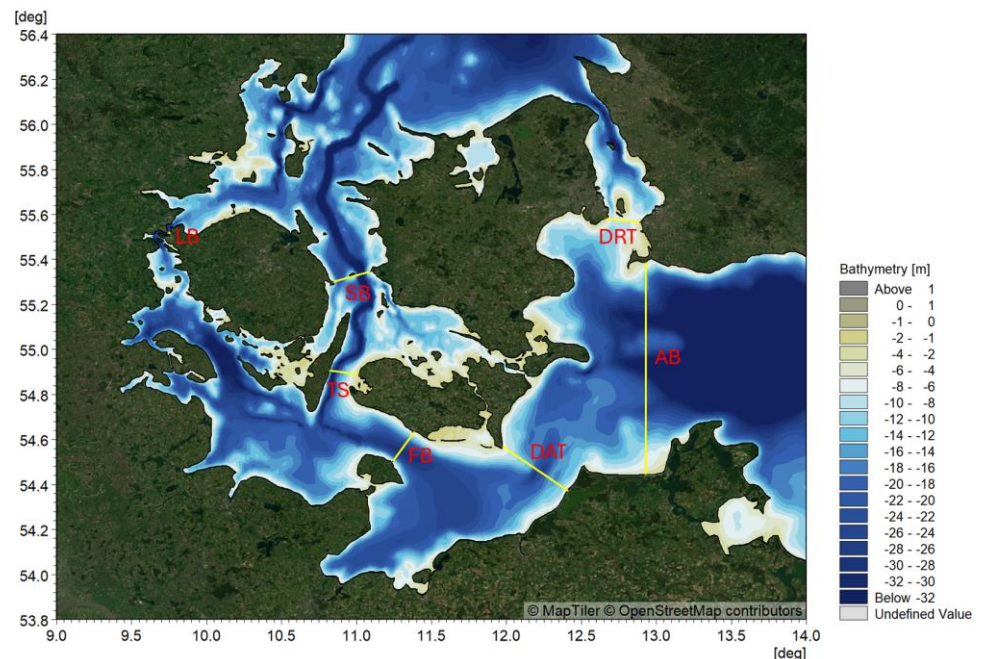
Vandføringer og salttransporter gennem tre af disse tværsnit er beregnet. Det er ved Darss og Drogden Tærsklerne og i Arkona Bassinet. Salttransporten er vandføringen multipliceret med vandets densitet multipliceret med vandets saltholdighed og giver transporten i kg salt per sekund eller tilsvarende enhed.

Positiv vandføring og salttransport er ud af Østersøen, og negativ vandføring og salttransport er ind i Østersøen.

Vandføringerne og salttransporterne er integreret over 2019 eller 2100 og således angivet i volumen vand eller kg salt i 2019 eller 2100 (og kan således også opfattes som per år).

Vandføringsændring i alle syv tværnsnit er beregnet.

Resultater for sensitivitetstesten er også beregnet og vist.



Figur 7-53 Kort af de Danske Stræder med de syv betragtede tværnsnit.

## 7.7.2 Netto vandføringer

Netto vandføring ved Drogden tærsklen (DRT), Darss tærsklen (DAT) og i Arkona Bassinet er givet i Tabel 7-2, Tabel 7-3 og Tabel 7-4.

Det følgende kan aflæses fra analyserne af de tre tværnsnit:

Summen af netto vandføringerne over Drogden og Darss tærsklerne er meget nær lig netto vandføringen gennem Arkona Bassinet. Dette er som forventet, da der kun kan være en mindre forskel på grund af Storstrømmen og opmagasinerings mellem tværnsnittene.

62% strømmer ud over Darss tærsklen, og 38% strømmer ud over Drogden tærsklen. Fra 7:3:1-relationen for bruttotransporter fra Jacobsen (1980) er bruttotransportforholdet 73% og 27%, således ikke så langt fra de fundne netto-transport forhold, hvor det bemærkes, at netto- og bruttoforhold ikke behøver at være ens.

Netto transporten ved Darss og Drogden tærsklerne stiger fra  $+4,20 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$  i 2019 til  $+4,94 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$  i 2100, en øgning på  $+0,74 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$  eller +17,6%. I sensitivitetstesten med den halve øgning i afstrømning stiger vandføringen til  $+4,57 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$ , en øgning på  $+0,37 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$  eller +8,8%. Øgningen er som forventet det halve af den fundne øgning i 2100.

Netto transporten over Drogden tærsklen stiger fra 2019 uden forbindelser til 2019 med forbindelser, og over Darss tærsklen falder den fra 2019 uden

forbindelser til 2019 med forbindelsen. Der sker en omfordeling fra Darss tærsklen til Drogden tærsklen, mindre ud over Darss tærsklen og mere ud over Drogden tærsklen. Dette skyldes den øgede modstand fra forbindelser i Bælthavet (Kattegat, Tårs og Als-Fyn), mens øgningen er mindre i Øresund (Lynetteholm), se Tabel 3-1.

Netto transporten gennem Arkona Bassinet stiger fra  $+4,22 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$  i 2019 til  $+5,00 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$  i 2100, en øgning på  $+0,78 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$  eller +18,5% (tættere på øgningen i afstrømning på +18,7%). I sensitivitetstesten med den halve øgning i afstrømning stiger vandføringen til  $+4,63 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$ , en øgning på  $+0,41 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$  eller +9,7%. Øgningen er som forventet det halve af den fundne øgning i 2100.

Der ses af disse tal, at der sker en omfordeling mellem Bælthavet og Øresund, som er væsentlig for de beregnede ændringer, og som har en betydning for forståelsen af ændringernes påvirkning på gennemstrømningen. Derfor er den ændring, der beregnes, når en forbindelse betragtes alene i dens lokalområde ikke generelt dækkende for påvirkningen på Østersøen (men giver stadig mening at bruge til opnåelse af en kompenseret forbindelse vha. afgravninger, som for eksempel benyttet ved Storebælts- og Øresundsforbindelsen).

Tabel 7-2 Netto vandføring (volumen) over Drogden tærsklen (DRT) i 2019 og 2100 (positivt ud af Østersøen).

| Østersø Model        | Pos. transport<br>( $10^{11} \text{ m}^3$ ) | Neg. transport<br>( $10^{11} \text{ m}^3$ ) | Netto transport<br>( $10^{11} \text{ m}^3$ ) |
|----------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 2019 uden forb.      | +6,92                                       | -5,33                                       | +1,59                                        |
| 2019 med forb.       | +6,96                                       | -5,32                                       | +1,64                                        |
| 2100 uden forb.      | +7,43                                       | -5,57                                       | +1,86                                        |
| 2100 med forb.       | +7,47                                       | -5,57                                       | +1,91                                        |
| 2100 uden forb. test | +7,36                                       | -5,61                                       | +1,75                                        |
| 2100 med forb. test  | +7,40                                       | -5,60                                       | +1,80                                        |

Tabel 7-3 Netto vandføring (volumen) over Darss tærsklen (DAT) i 2019 og 2100 (positivt ud af Østersøen).

| Østersø Model        | Pos. transport<br>( $10^{11} \text{ m}^3$ ) | Neg. transport<br>( $10^{11} \text{ m}^3$ ) | Netto transport<br>( $10^{11} \text{ m}^3$ ) |
|----------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 2019 uden forb.      | +15,93                                      | -13,32                                      | +2,61                                        |
| 2019 med forb.       | +15,89                                      | -13,34                                      | +2,55                                        |
| 2100 uden forb.      | +16,90                                      | -13,82                                      | +3,08                                        |
| 2100 med forb.       | +16,87                                      | -13,83                                      | +3,03                                        |
| 2100 uden forb. test | +16,66                                      | -13,84                                      | +2,82                                        |
| 2100 med forb. test  | +16,63                                      | -13,86                                      | +2,77                                        |

Tabel 7-4 Netto vandføring (volumen) gennem Arkona Bassinet (AB) i 2019 og 2100 (positivt ud af Østersøen).

| Østersø Model        | Pos. transport<br>( $10^{11} \text{ m}^3$ ) | Neg. transport<br>( $10^{11} \text{ m}^3$ ) | Netto transport<br>( $10^{11} \text{ m}^3$ ) |
|----------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 2019 uden forb.      | +34,78                                      | -30,56                                      | +4,22                                        |
| 2019 med forb.       | +34,90                                      | -30,68                                      | +4,22                                        |
| 2100 uden forb.      | +36,27                                      | -31,27                                      | +5,00                                        |
| 2100 med forb.       | +36,30                                      | -31,29                                      | +5,00                                        |
| 2100 uden forb. test | +36,08                                      | -31,45                                      | +4,63                                        |
| 2100 med forb. test  | +36,06                                      | -31,44                                      | +4,62                                        |

### 7.7.3 Netto salttransport

Netto salttransporterne ved Drogden tærsklen (DRT), Darss tærsklen (DAT) og i Arkona Bassinet (AB) er givet i Tabel 7-5, Tabel 7-6 og Tabel 7-7.

Det følgende kan aflæses fra analyserne af de tre tværsnit:

Der er en netto salttransport ind i Østersøen over Drogden tærsklen og en netto salttransport ud af Østersøen over Darss tærsklen. Dette er også fundet i målinger over flere år (se Lintrup & Jakobsen, 1999).

Netto salttransporterne påvirkes af både forbindelserne og klimaændringerne. Påvirkningen fra klimaændringerne er større end fra forbindelserne.

Netto salttransporterne i 2019 og 2100-sensitivitetstest er nær hinanden. Ved en vandstandsstigning på +0,5 m og en afstrømningsøgning på +10% ophæver de to påvirkninger næsten hinanden.

*Tabel 7-5 Netto salttransport over Drogden tærsklen (DRT) i 2019 og 2100 (positivt ud af Østersøen).*

| Østersø Model        | Pos. transport<br>(10 <sup>11</sup> kg) | Neg. transport<br>(10 <sup>11</sup> kg) | Netto transport<br>(10 <sup>11</sup> kg) |
|----------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| 2019 uden forb.      | +73,91                                  | -78,43                                  | -4,51                                    |
| 2019 med forb.       | +74,36                                  | -78,53                                  | -4,17                                    |
| 2100 uden forb.      | +75,05                                  | -78,71                                  | -3,66                                    |
| 2100 med forb.       | +75,52                                  | -79,04                                  | -3,52                                    |
| 2100 uden forb. test | +77,21                                  | -81,62                                  | -4,40                                    |
| 2100 med forb. test  | +77,20                                  | -81,82                                  | -4,12                                    |

*Tabel 7-6 Netto salttransport over Darss tærsklen (DAT) i 2019 og 2100 (positivt ud af Østersøen).*

| Østersø Model        | Pos. transport<br>(10 <sup>11</sup> kg) | Neg. transport<br>(10 <sup>11</sup> kg) | Netto transport<br>(10 <sup>11</sup> kg) |
|----------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| 2019 uden forb.      | +201,71                                 | -198,39                                 | +3,32                                    |
| 2019 med forb.       | +201,84                                 | -199,29                                 | +2,56                                    |
| 2100 uden forb.      | +202,71                                 | -197,99                                 | +4,72                                    |
| 2100 med forb.       | +202,33                                 | -198,26                                 | +4,07                                    |
| 2100 uden forb. test | +207,14                                 | -203,57                                 | +3,57                                    |
| 2100 med forb. test  | +207,22                                 | -204,37                                 | +2,85                                    |

*Tabel 7-7 Netto salttransport gennem Arkona Bassinet (AB) i 2019 og 2100 (positivt ud af Østersøen).*

| Østersø Model        | Pos. transport<br>(10 <sup>11</sup> kg) | Neg. transport<br>(10 <sup>11</sup> kg) | Netto transport<br>(10 <sup>11</sup> kg) |
|----------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| 2019 uden forb.      | +340,02                                 | -341,62                                 | -1,60                                    |
| 2019 med forb.       | +341,49                                 | -343,57                                 | -2,07                                    |
| 2100 uden forb.      | +336,11                                 | -335,12                                 | +0,99                                    |
| 2100 med forb.       | +336,26                                 | -335,74                                 | +0,52                                    |
| 2100 uden forb. test | +347,72                                 | -348,71                                 | -0,99                                    |
| 2100 med forb. test  | +347,92                                 | -349,32                                 | -1,40                                    |

Det ses i Tabel 7-7, at netto salttransporterne gennem Arkona Bassinet ikke er 0. Dvs. at der (stadig – efter 20 gentagelser) sker en mindre ændring af saltmængden i den indre Østersø, som dog er lille i forhold til de positive og negative transporter. I 2019 og 2100-sensitivitetstest er der en mindre netto

salttransport ind i indre Østersø, og dermed stiger saltmængden (stadig) lidt i de inderste dele i indre Østersø. I 2100 er der en mindre netto salttransport ud af indre Østersø, og dermed falder saltmængden (stadig) lidt i de inderste dele i indre Østersø.

## 7.8 Vandførings- og salttransportændring (brutto)

Vandførings- og salttransportændring (brutto) er beregnet med formlerne vist i afsnit 5.2.3.

De er begge beregnet i de syv tværsnit vist i Figur 7-53.

De beregnede vandføringsændringer er givet i Tabel 7-8, og de beregnede salttransportændringer givet i Tabel 7-9.

Tabel 7-8 Vandføringsændring i de Danske Stræder (i de syv tværsnit).

| Scenarie                                | Tværsnit        | $\Delta Q$<br>( $10^{10} \text{ m}^3$ ) | $Q_{\text{ref}}$<br>( $10^{12} \text{ m}^3$ ) | Ændring<br>(%) |
|-----------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------|
| 2019 uden forb.<br>&<br>2019 med forb   | Lillebælt       | +0,65                                   | 0,36                                          | +1,80          |
|                                         | Drogden T.      | +0,28                                   | 1,19                                          | +0,24          |
|                                         | Storebælt       | -1,83                                   | 2,51                                          | -0,73          |
|                                         | Tårs-Spødsbjerg | -1,87                                   | 2,40                                          | -0,78          |
|                                         | Femern Bælt     | -0,97                                   | 2,40                                          | -0,40          |
|                                         | Darss tærsklen  | -0,95                                   | 2,49                                          | -0,38          |
|                                         | Arkona Basin    | -0,54                                   | 3,69                                          | -0,15          |
|                                         | Drogden+Darss   | -0,63                                   | 3,48                                          | -0,18          |
| Scenarie                                | Tværsnit        | $\Delta Q$<br>( $10^{10} \text{ m}^3$ ) | $Q_{\text{ref}}$<br>( $10^{12} \text{ m}^3$ ) | Ændring<br>(%) |
| 2100 uden forb.<br>&<br>2100 med forb   | Lillebælt       | +0,62                                   | 0,36                                          | +1,71          |
|                                         | Drogden T.      | +0,38                                   | 1,19                                          | +0,32          |
|                                         | Storebælt       | -1,97                                   | 2,51                                          | -0,78          |
|                                         | Tårs-Spødsbjerg | -1,96                                   | 2,40                                          | -0,82          |
|                                         | Femern Bælt     | -1,09                                   | 2,40                                          | -0,45          |
|                                         | Darss tærsklen  | -1,01                                   | 2,49                                          | -0,41          |
|                                         | Arkona Basin    | -0,62                                   | 3,69                                          | -0,17          |
|                                         | Drogden+Darss   | -0,60                                   | 3,48                                          | -0,17          |
| Scenarie                                | Tværsnit        | $\Delta Q$<br>( $10^{10} \text{ m}^3$ ) | $Q_{\text{ref}}$<br>( $10^{12} \text{ m}^3$ ) | Ændring<br>(%) |
| 2019 uden forb.<br>&<br>2100 uden forb. | Lillebælt       | +1,46                                   | 0,36                                          | +4,03          |
|                                         | Drogden T.      | +7,39                                   | 1,19                                          | +6,23          |
|                                         | Storebælt       | +11,74                                  | 2,51                                          | +4,68          |
|                                         | Tårs-Spødsbjerg | +9,67                                   | 2,40                                          | +4,03          |
|                                         | Femern Bælt     | +10,32                                  | 2,40                                          | +4,31          |
|                                         | Darss tærsklen  | +10,65                                  | 2,49                                          | +4,28          |
|                                         | Arkona Basin    | +16,42                                  | 3,69                                          | +4,45          |
|                                         | Drogden+Darss   | +17,31                                  | 3,48                                          | +4,98          |
| Scenarie                                | Tværsnit        | $\Delta Q$<br>( $10^{10} \text{ m}^3$ ) | $Q_{\text{ref}}$<br>( $10^{12} \text{ m}^3$ ) | Ændring<br>(%) |
| 2019 uden forb.<br>&<br>2100 med forb.  | Lillebælt       | +2,08                                   | 0,36                                          | +5,74          |
|                                         | Drogden T.      | +7,78                                   | 1,19                                          | +6,56          |
|                                         | Storebælt       | +9,77                                   | 2,51                                          | +3,89          |
|                                         | Tårs-Spødsbjerg | +7,71                                   | 2,40                                          | +3,21          |
|                                         | Femern Bælt     | +9,23                                   | 2,40                                          | +3,85          |
|                                         | Darss tærsklen  | +9,64                                   | 2,49                                          | +3,87          |
|                                         | Arkona Basin    | +1,58                                   | 3,69                                          | +4,28          |
|                                         | Drogden+Darss   | +1,67                                   | 3,48                                          | +4,81          |

Tabel 7-9 Salttransportændring i de Danske Stræder (i de syv tværsnit).

| Scenarie                                | Tværsnit        | $\Delta Q_s$<br>( $10^{10}$ kg) | $Q_{sref}$<br>( $10^{12}$ kg) | Ændring<br>(%) |
|-----------------------------------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------|
| 2019 uden forb.<br>&<br>2019 med forb.  | Lillebælt       | +20,60                          | 7,67                          | +2,69          |
|                                         | Drogden T.      | +5,33                           | 14,80                         | +0,36          |
|                                         | Storebælt       | -11,02                          | 47,51                         | -0,23          |
|                                         | Tårs-Spødsbjerg | -13,29                          | 42,76                         | -0,31          |
|                                         | Femern Bælt     | -1,05                           | 38,68                         | -0,03          |
|                                         | Darss tærsklen  | -0,75                           | 34,25                         | -0,02          |
|                                         | Arkona Basin    | +3,79                           | 38,26                         | +0,10          |
|                                         | Drogden+Darss   | +4,55                           | 46,49                         | +0,10          |
| Scenarie                                | Tværsnit        | $\Delta Q_s$<br>( $10^{10}$ kg) | $Q_{sref}$<br>( $10^{12}$ kg) | Ændring<br>(%) |
| 2100 uden forb.<br>&<br>2100 med forb.  | Lillebælt       | +18,82                          | 7,67                          | +2,39          |
|                                         | Drogden T.      | +7,66                           | 14,80                         | +0,52          |
|                                         | Storebælt       | -13,74                          | 47,51                         | -0,29          |
|                                         | Tårs-Spødsbjerg | -15,26                          | 42,76                         | -0,36          |
|                                         | Femern Bælt     | -5,31                           | 38,68                         | -0,14          |
|                                         | Darss tærsklen  | -9,35                           | 34,25                         | -0,27          |
|                                         | Arkona Basin    | -2,01                           | 38,26                         | -0,05          |
|                                         | Drogden+Darss   | -2,47                           | 46,49                         | -0,05          |
| Scenarie                                | Tværsnit        | $\Delta Q_s$<br>( $10^{10}$ kg) | $Q_{sref}$<br>( $10^{12}$ kg) | Ændring<br>(%) |
| 2019 uden forb.<br>&<br>2100 uden forb. | Lillebælt       | +16,98                          | 7,67                          | +2,22          |
|                                         | Drogden T.      | +14,45                          | 14,45                         | +0,98          |
|                                         | Storebælt       | +55,41                          | 47,51                         | +1,17          |
|                                         | Tårs-Spødsbjerg | +16,59                          | 42,76                         | +0,39          |
|                                         | Femern Bælt     | -1,93                           | 38,68                         | -0,05          |
|                                         | Darss tærsklen  | -20,69                          | 34,25                         | -0,60          |
|                                         | Arkona Basin    | -16,14                          | 38,26                         | -0,42          |
|                                         | Drogden+Darss   | -0,43                           | 46,49                         | -0,01          |
| Scenarie                                | Tværsnit        | $\Delta Q_s$<br>( $10^{10}$ kg) | $Q_{sref}$<br>( $10^{12}$ kg) | Ændring<br>(%) |
| 2019 uden forb.<br>&<br>2100 med forb.  | Lillebælt       | +35,30                          | 7,66                          | +4,61          |
|                                         | Drogden T.      | +22,12                          | 14,79                         | +1,50          |
|                                         | Storebælt       | +41,67                          | 47,51                         | +0,88          |
|                                         | Tårs-Spødsbjerg | +1,33                           | 42,76                         | +0,03          |
|                                         | Femern Bælt     | -7,24                           | 38,68                         | -0,19          |
|                                         | Darss tærsklen  | -30,05                          | 34,25                         | -0,88          |
|                                         | Arkona Basin    | -18,14                          | 38,25                         | -0,47          |
|                                         | Drogden+Darss   | -2,90                           | 46,48                         | -0,06          |

Det følgende kan ses fra de syv tværsnit, se Tabel 7-8:

I 2019 og 2100 med og uden forbindelser er der en positiv vandføringsændring i Lillebælt og Øresund (over Drogden tærsklen). Dette sker pga. omfordeling fra Storebælt til Øresund og Lillebælt (se afsnit 7.7.2). Således er omfordeling mellem stræderne af betydning, som kun findes, hvis en integreret og holistisk metode benyttes som i dette projekt, hvor flere forbindelser og hele Østersøen betragtes samlet.

Det ses også i 2019 og 2100 med og uden forbindelser, at vandføringsændringerne bliver mindre fra Kattegat til Arkona Bassinet gennem Storebælt, dvs. fra Storebælt og Tårs-Spødsbjerg, til Femern Bælt og Darss tærsklen, til Arkona og samlet Darss- og Drogden tærsklerne (og således er det lokale ændringsmål svært at sammenligne med ændringen i andre tværsnit). Dette skyldes aftagende tidevand, aftagende kompleksitet af densitetsstrømmene, og at omfordelingen tages i betragtning i Arkona Bassinet og samlet i Darss- og Drogden tærsklerne.



Det væsentligste mål for ændringen fås samlet ved Darss- og Drogden tærsklerne, som udtrykker forbindelsernes potentielle påvirkning på Østersøen, som er det, der har den største interesse.

Ændringen i vandføringen (brutto) for forbindelserne er således bestemt til  $-0,18\%$  og fra klimaændringer til  $+5.0\%$ . Ændringen på  $-0,18\%$  fra forbindelserne er inden for det forventede interval baseret på analytiske beregninger vist i Tabel 3-1, og som forventet mindre end den beregnede ændring med lokalmodellen, se afsnit 6.2.2. Det bemærkes, at allerede i Jakobsen et al. (1996) blev ændringen fra klimaændringer ved simple analyser vurderet til at være  $+6.0\%$  (den vurdering havde ikke den samme pålidelighed, som er opnået i dette arbejde).

Sammenlignes ændringerne med og uden klimaændringer, findes det, at påvirkningen fra klimaændringer generelt er langt større og med modsat fortegn end påvirkningen fra forbindelser. Vandstandsstigningen fra klimaændringerne giver en åbning af de Danske Stræder, og dermed mindre modstand i dem.

Salttransportændringerne i Tabel 7-9 viser også en omfordeling fra Storebælt til Øresund og Lillebælt. Ændringerne er positive i Lillebælt og Øresund (over Drogden tærsklen).

Ligeledes ses der i 2019 og 2100 med og uden forbindelser (som for vandføringsændringen) en tendens til en aftagende salttransportændring fra Kattegat til Arkona Bassinet gennem Storebælt.

Påvirkningen fra klimaændringer er ikke tilsvarende større end påvirkningerne fra forbindelserne, som fundet for vandføringsændringen. Dette skyldes, at afstrømning ikke bringer salt til Østersøen, og der skal også med klimaændringer være en saltbalance for den indre Østersø (Knudsens relationer).

## 7.9 Samlet betragtning

Det findes generelt, at:

Påvirkningen fra klimaændringer på hydrografien er betydelig - de ændrede hydrografiske forhold er af en størrelse, der vil kunne måles og dokumenteres i fremtidige monitoreringsprogrammer. En væsentlig hydrografisk ændring er ikke mindst vandtemperaturstigningen.

En sensitivitetstest med den halve øgning af afstrømningen fra klimaændringer viser, at de beregnede saltholdighedsprofiler i år 2100 er meget lig dem, der er beregnet for 2019. Dvs. at en vandstandsstigning på  $+0,5$  m og en afstrømningssøgning på  $+10\%$  har modsatrettet effekt på saltholdighedsprofilerne og er af samme størrelsesorden. Påføres begge samtidig fås omtrentligt de oprindelige profiler i 2019. Således kan der forekomme klimaændringer med kombinationer af vandstandsstigning og afstrømning, som kun giver en begrænset ændring af saltholdighedsforholdene, og også kombinationer, hvor saltholdigheden stiger. Temperaturen vil dog stadig ændres betydeligt.

Påvirkningen af hydrografien fra forbindelserne er marginal - de ændrede hydrografiske forhold er af en størrelse, der ikke vil kunne måles og dokumenteres i fremtidige monitoreringsprogrammer.

Det findes, at påvirkningen fra forbindelserne på de hydrografiske forhold (saltholdighed, temperatur og udveksling), både med og uden klimaændringer, er marginale, og med de samme fordelinger af ændringerne (stigninger og fald i saltholdigheden ses i de samme områder og dybder). Påvirkningen fra forbindelserne på de hydrografiske forhold er lidt større i scenariet med klimaændringer end i scenariet uden klimaændringer, men stadig marginale for begge scenarier. Dette illustrerer, at påvirkningerne fra forbindelserne er robuste i den forstand, at de er nær de samme med og uden klimaændringer.

## 8 Diskussion

### 8.1 Infrastrukturprojekter og klimaændring

I beregninger og analyser er der benyttet:

- Fem infrastrukturprojekter (forbindelser); for hvert projekt er valgt en udformning, der giver den største modstand af de optimerede udformninger, som forventes at blive undersøgt i det videre arbejde; og
- Et median klimascenarie med dette scenarios median ændringer.

Alle fem infrastrukturprojekter er blevet eller aktuelt bliver undersøgt, men der er ikke truffet beslutning om gennemførelse. Hvis der arbejdes videre med et eller flere af de betragtede infrastrukturprojekter, kan strømningsmodstanden ændres i forhold til dem anvendt i de foreliggende analyser.

Ligeledes vil de betragtede klimaændringer i de foreliggende analyser sandsynligvis afvige fra dem, der udvikles i fremtiden.

Uanset disse mulige afvigelser for infrastrukturprojekter og klimaændringer, der er benyttet i de foreliggende analyser, forventes den overordnede konklusion fra dette arbejde ikke at ændres:

- En optimering af infrastrukturprojekterne kan, og vil sandsynligvis, mindske deres modstand på gennemstrømningerne.
- Der er allerede tydelige tegn på klimaændringer.

Og således forbliver den overordnede konklusion:

- Påvirkningen fra klimaændringer af de hydrografiske forhold er betydelig og vil kunne måles.
- Påvirkningen fra forbindelserne af de hydrografiske forhold er marginal og vil ikke kunne måles.
- Påvirkningen fra klimaændringer af de hydrografiske forhold er overordnet betydeligt større end påvirkningen fra forbindelserne.
- Påvirkningen fra forbindelserne af de hydrografiske forhold er nær det samme med og uden klimaændringer.

Påvirkningen fra klimaændringer på hydrografien er behæftet med stor spredning (Sund & Bælt, 2025A), især på grund af spredningerne for klimaændringerne. Den tilsvarende spredning på infrastrukturprojekternes påvirkninger er væsentlig mindre og overskygges af klimaændringernes spredning.

### 8.2 Påvirkning af økologien

De hydrografiske ændringer påvirker økosystemet i Østersøen, se Sund & Bælt (2025B):

- De betydeligt ændrede hydrografiske forhold forårsaget af klimaændringerne og øget næringssalttilførsel giver en betydelig afledt påvirkning af økologien i Østersøen.
- De marginalt ændrede hydrografiske forhold forårsaget af forbindelserne giver tilsvarende kun en marginal påvirkning af økologien i Østersøen.

### 8.3 Vurdering af infrastrukturprojekter

I Afgrænsningsnotat (Sund & Bælt, 2024D) og Forudsætningsnotat (Sund & Bælt, 2024E) er det foreslået, at det fremtidige miljøkrav til store marine infrastrukturprojekter kan være, at 'et infrastrukturprojekt ikke alene eller kumulativt med andre planer og projekter påvirker hydrografien og vandudvekslingen på en sådan måde, at det står i vejen for langsigtet at opnå eller opretholde en god miljøtilstand i Østersøen'.

Langsigtet betyder i denne sammenhæng, at infrastrukturprojekterne skal analyseres både med og uden klimaændringer.

Nærværende projekt er ikke en miljøkonsekvensvurdering, og således skal projektet ikke frembringe et fyldestgørende grundlag for en sådan vurdering.

Det er fundet, at infrastrukturprojekternes påvirkning af hydrografien er marginal, både med og uden klimaændringer. Tilsvarende findes det i de økologiske analyser (Sund & Bælt, 2025B), at infrastrukturernes påvirkning af økologien er marginal, både med og uden klimaændringer.

Hvorvidt resultaterne af en senere miljøkonsekvensvurdering leder til, at infrastrukturprojekterne vurderes 'ikke alene eller kumulativt med andre planer og projekter at påvirke hydrografien og vandudvekslingen på en sådan måde, at det står i vejen for langsigtet at opnå eller opretholde en god miljøtilstand i Østersøen' er uvist, og kan ikke besvares fyldestgørende på baggrund af dette projekt.

Men påvirkningerne fra infrastrukturprojekterne på hydrografien er i dette projekt fundet at være marginale, hvormed menes, at ændringerne er så små, at de ikke vil kunne måles og dokumenteres i fremtidige monitoreringsprogrammer, og forventes ikke i sig selv at stå 'i vejen for langsigtet at opnå eller opretholde en god miljøtilstand i Østersøen'. En vurdering af afledte påvirkninger på økologien skal ikke foretages i denne rapport.

### 8.4 Hydrografiske tidsskalaer

Hydrografien i Østersøen varierer på både kort og lang tidsskala, herunder vandføring, salttransport, og lagdeling, se Ekspertnotat (Sund & Bælt, 2024C), afsnit 3.4 og 3.5. I de sidste omkring 25 år har der for eksempel været færre kraftige indstrømninger (herunder også af de såkaldte store indstrømninger) pga. af mildere atmosfæriske forhold og vejrsystemer, se Figur 4-2 (en beskrivelse af den store indstrømning i 1993 kan findes i Jakobsen (1995)). Dette giver en langperiodisk variation af alle de parametre der betragtes i dette arbejde, for eksempel vandføring, salttransport, og lagdeling.

Grundlæggende vurderes effekten af forbindelserne kun at afhænge ganske lidt af det enkelte års hydrografi. Hvis forbindelserne reducerer vandgennemstrømningen, så gør forbindelserne det både i milde og kraftige hydrografiske år. Således vurderes det heller ikke som meget væsentligt at have meget forskellige hydrografiske år inkluderet. I denne sammenhæng bemærkes det, at 2019 er et rimeligt repræsentativt år.

Store indstrømninger er analyseret i tidligere infrastrukturprojekter og der havde infrastrukturprojekterne stort set denne samme påvirkning for de store indstrømninger, som for typiske forhold.

## 8.5 Opholdstid i Østersøen og forsinkelse i signal

På grund af den lange opholdstid i Østersøen, i runde tal 5 - 30 år, vil påvirkningen fra klimaændringer af de hydrografiske forhold være forsinket. Groft sagt, så vil klimaændringernes påvirkning af hydrografien først være fuldt udviklet med en forsinkelse på 5 - 30 år.

Denne tidsforsinkelse er i en vis udstrækning fjernet ved at gentage beregningen af 2019 og 2100 tyve gange. Således er det beregnede hydrografiske signal i 2100 uden hele denne forsinkelse (og variationer fra år til år, som vil 'drukne' signalet).

De benyttede klimaændringer er for perioden 1981 til 2100, dvs. tidligt før 2100, og derfor antages de fundne resultater for hydrografien samlet omtrentligt at repræsenterer forholdene i 2100.

Således vil denne forsinkelse heller ikke samlet ændre den overordnede konklusion.

## 8.6 Saltbalance for Østersøen

Der skal være vand- og saltbalance i indre Østersø. Dette kaldes også Knudsens relationer. Således skal netto vandføringen ved Darss- og Drogden Tærsklerne være lig afstrømningen (og et mindre bidrag fra nettonedbør). Og salttransporten være nul.

Salttransporten består af to dele:

- lavsalint overfladevand, der strømmer ud af Østersøen (saltholdigheden er cirka 8 g/kg); og
- højsalint bundvand, der strømmer ind i Østersøen.

Det højsaline bundvand, der strømmer ind i indre Østersø, kan kun forlade indre Østersø igen ved at blive blandet op i øvre lag og strømme ud igen som en del af overfladevandet i indre Østersø.

Således kræves det, at det højsaline bundvand, der strømmer ind i Østersøen, skal blandes op i øvre lag og strømme ud igen. Stiger indstrømningen af

højsalint bundvand, skal opblandingen stige tilsvarende, og falder indstrømningen, skal opblandingen falde tilsvarende.

Dette sker på følgende vis, hvis indstrømningen af højsalint bundvand stiger:

- Umiddelbart er opblandingen uændret, da skillefladen er i samme niveau og er derfor mindre end indstrømningen.
- Dette får nedre lags volumen til at vokse, hvilket kommer til udtryk ved, at skillefladen bevæges opad til højere niveauer.
- Dette får opblandingen (medrivningen) af nedre lag op i øvre lag til at stige.
- Skillefladen fortsætter sin bevægelse opad til højere niveauer, indtil der igen er balance mellem indstrømmende højsalint bundvand og opblanding.
- I denne nye situation, hvor skillefladen nu er i et højere niveau, er der igen balance mellem en større indstrømning og en større opblanding.

På tilsvarende vis opnås balancen ved aftagende indstrømning ved, at skillefladen bevæges til et lavere niveau, hvor der igen er balance mellem indstrømning og opblanding.

Indstrømning og opblanding skal på længere tidsskala være i balance.

Denne dynamik er inkluderet i den numeriske model af Østersøen og opløst i beregningerne.



## 9 Referenceliste

- By & Havn, 2020: Anlæg af Lynetteholm. VVM – Teknisk Baggrundsrapport nr. 1. Hydrauliske undersøgelser. Udarbejdet for Udviklingsselskabet By og Havn I/S af DHI.
- Cappelen, J., 2024: Hvordan opførte vejret sig egentlig i 2023 – set i klimatisk perspektiv? Vejret 177, side 1 – 21.
- DHI, 2018: DKBS2. Hydrodynamic model setup and validation. Teknisk note udarbejdet af DHI (projekt nummer 11091910).
- DHI & COWI, 2024: Ingeniørvurdering af layout.
- Farmer, D. & J.S. Møller, 1990: Measurements and Modelling in the Great Belt: A Unique Opportunity for Model Verification. The Physical Oceanography of Sea Straits. L. Pratt (ed.) NATO ASI series C. Vol. 318. Kluwer 1990.
- HELCOM, 2021: Baltic Sea Action Plan, 2021 update. Baltic Marine Environment Protection Commission. Link: <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2021/10/Baltic-Sea-Action-Plan-2021-update.pdf>
- Jacobsen, T.S., 1980: The Belt Project. Sea water exchange of the Baltic. Measurements and methods. The National Agency of Environmental Protection, Denmark. ISBN 87-503-3532-4.
- Jakobsen, Fl., 1991: Bornholmer Dybets hydrografi. Havforskning fra Miljøstyrelsen, Nr. 8. Link: [87-503-9346-4.pdf](https://www.miljostyrelsen.dk/publikationer/87-503-9346-4.pdf)
- Jakobsen, Fl., 1995: The Major Inflow to the Baltic Sea during January 1993. Journal of Marine Systems, Vol. 6, No. 3, pp. 227-240.
- Jakobsen, Fl., I.S. Hansen, N.-E.O. Hansen & F. Østrup-Rasmussen, 2010: Flow resistance in the Great Belt, the biggest strait between the North Sea and the Baltic Sea. Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 87, 325-332.
- Jakobsen, Fl., N.H. Petersen, H.M. Petersen, J.S. Møller, T. Schmidt, T. Siefert, 1996: Hydrographic investigations in the Fehmarn Belt in connection with the planning of the Fehmarn Belt link. Proceedings of the Baltic Marine Science Conference 1996 (Rønne, Denmark), 10 pp. Published in ICES Cooperative Research Report 257, 2003, 179-189. Link: <https://www.vliz.be/imisdocs/publications/257009.pdf>
- Jakobsen, Fl., G. Ærtebjerg, C.T. Agger, N.K. Højerslev, N. Holt, J. Heilmann & K. Richardson, 1994: Hydrografisk og biologisk beskrivelse af Skagerrak-fronten (In Danish). Havforskning fra Miljøstyrelsen, Nr. 49, 112 pp. Link: [87-7810-205-7.pdf](https://www.miljostyrelsen.dk/publikationer/87-7810-205-7.pdf)
- KDI, 2024: Højvandsstatistikker 2024. Udarbejdet af Kystdirektoratet, Miljøministeriet i juli 2024 og revideret 5. november 2024.

- KK & KDI, 2009: Udvidelse af Københavns Nordhavn og ny krydstogststerminal, VVM – Teknisk baggrundsrapport nr. 3, Marine miljøkonsekvensvurderinger, marts 2009. Udarbejdet for Københavns Kommune og Kystdirektoratet af DHI.
- Lintrup, M.J. & Fl. Jakobsen, 1999: The importance of Öresund and the Drogden Sill for Baltic inflow. *Journal of Marine Systems*, Vol. 18, No. 4, pp. 345-354.
- Murray, A.M., G.H. Jørgensen, P.N. Godiksen, J. Anthonj & H. Madsen, 2023: DHI-GHM: Real-time and forecasted hydrology for the entire planet. *Journal of Hydrology*, 620, Part A, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129431>.
- Møller, J.S. & I. Sehested Hansen, 1994: Hydrographical Processes and Changes in the Baltic Sea. Dana: Special issue fish and fisheries in the Baltic.
- Møller, J.S. & N-E. Ottesen Hansen, 1988: The Great Belt Link Compensations dredging design. *Dredging and Port Construction*, 1988:15:7.
- Ottesen Hansen, N.E. & J.S. Møller, 1990: Zero Blocking Solution for the Great Belt Link. *The Physical Oceanography of Sea Straits*. L. Pratt (ed.) NATO ASI series C. Vol. 318. Kluwer 1990.
- Pedersen, Fl. Bo & J.S. Møller, 1981: Diversion of the River Neva. How will it Influence the Baltic Sea, the Belts and Kattegat. *Nordic Hydrology* 12, pp. 1-20, 1981.
- Sund & Bælt, 2018: Undersøgelse af fremskudt færgehavn ved Tårs. Udarbejdet for Sund & Bælt Holding A/S af COWI.
- Sund & Bælt, 2022: Forundersøgelse af en Kattegatforbindelse, kyst-kyst. Miljøundersøgelser - vej. Udarbejdet for Sund & Bælt Holding A/S af Rambøll.
- Sund & Bælt, 2024A: Hydrografi, kyst og vandkvalitet. Modellering af forholdene i Øresund og i nærområde af Østlig Ringvej. Fastlæggelse af designperiode for Østlig Ringvej. Udarbejdet for Sund & Bælt Holding A/S af COWI og DHI.
- Sund & Bælt, 2024B: Hydrografisk undersøgelse af Als-Fyn forbindelsen. Beregning af gennemstrømningsmindskelsen for en bro- og for en bro-ø-tunnel løsning. Udarbejdet for Sund & Bælt Holding A/S af DHI.
- Sund & Bælt, 2024C: Undersøgelse af fremskudt færgehavn ved Tårs. Ekspertnotat. Udarbejdet for Sund & Bælt Holding A/S af COWI og DHI.
- Sund & Bælt, 2024D: Undersøgelse af fremskudt færgehavn ved Tårs. Afgrænsningsnotat. Udarbejdet for Sund & Bælt Holding A/S af COWI og DHI.

Sund & Bælt, 2024E: Undersøgelse af fremskudt færgehavn ved Tårs. Forudsætningsnotat. Udarbejdet for Sund & Bælt Holding A/S af COWI og DHI.

Sund & Bælt, 2024F: Undersøgelse af fremskudt færgehavn ved Tårs. Konceptuel model for cirkulation i Østersøen. Udarbejdet for Sund & Bælt Holding A/S af COWI og DHI.

Sund & Bælt, 2025A: Undersøgelse af fremskudt færgehavn ved Tårs. Modellering af cirkulation i Østersøen med konceptuel model. Udarbejdet for Sund & Bælt Holding A/S af COWI og DHI.

Sund & Bælt, 2025B: Undersøgelse af fremskudt færgehavn ved Tårs. Økologisk modellering. Udarbejdet for Sund & Bælt Holding A/S af COWI og DHI.

Sund & Bælt, 2025C: Undersøgelse af fremskudt færgehavn ved Tårs. Sammenfattende rapport. Udarbejdet for Sund & Bælt Holding A/S af COWI og DHI.

Ærtebjerg, G., P. Sandbeck, S. Lundøer, Fl. Jakobsen, B. Løkkegaard, J.N. Jensen, O.L. Jensen & P.B. Christensen (1991). Marine Områder - Fjorde, kyster og åbent hav (In Danish). Faglig rapport fra DMU, No. 40, 132 pp. Link: [fr40.pdf](#)

## Bilag A    Udvalgte resultater

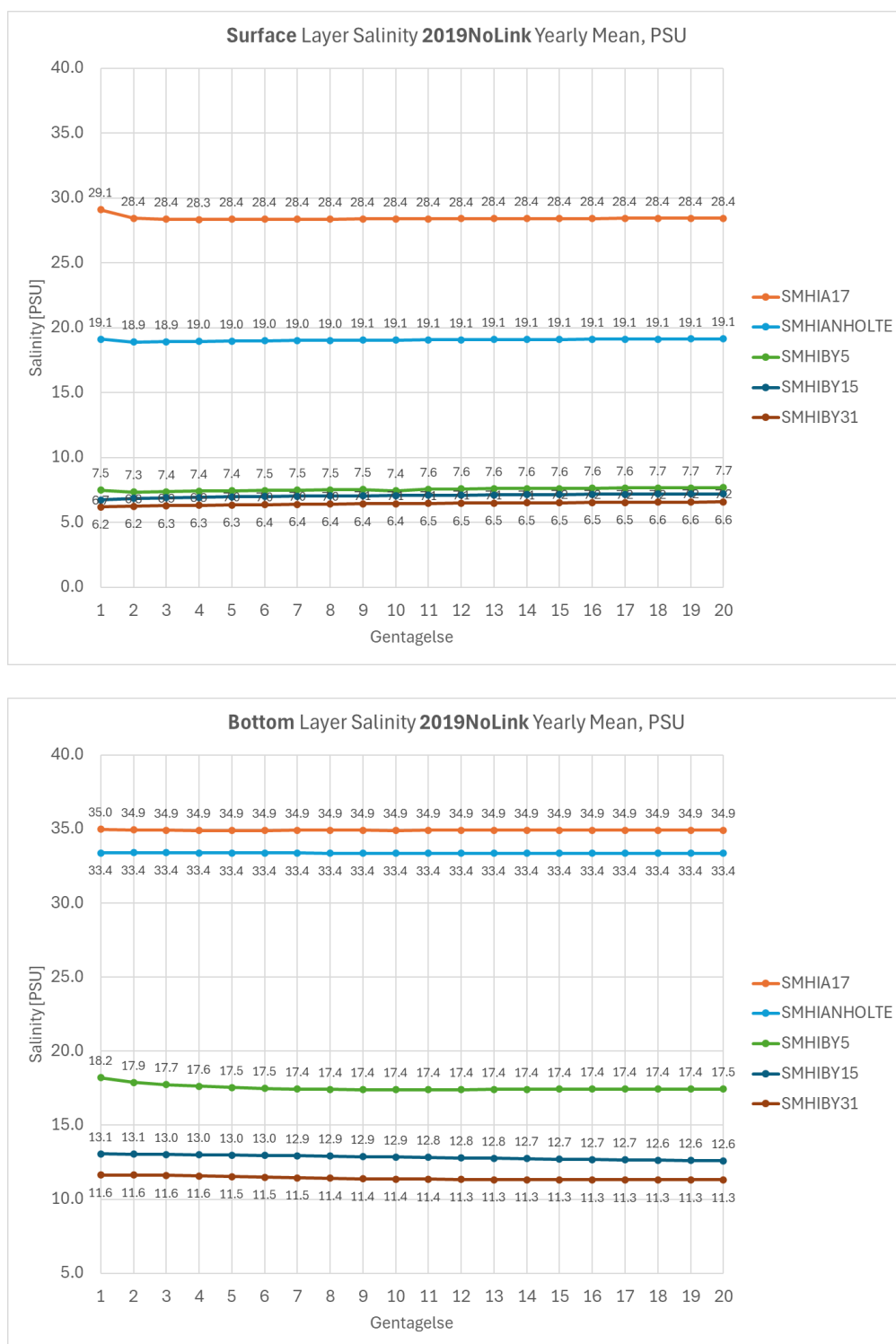
### A.1    Cyklisk udvikling af resultater

I det følgende vises det, hvorledes saltholdighed og temperatur ændres i de 20 gentagelser af år 2019 og 2100.

Resultaterne viser, at der i de sidste cykliske gentagelser er opnået en tilstand, hvor middel saltholdighed og middel temperatur ikke ændres meget fra gentagelse til gentagelse.

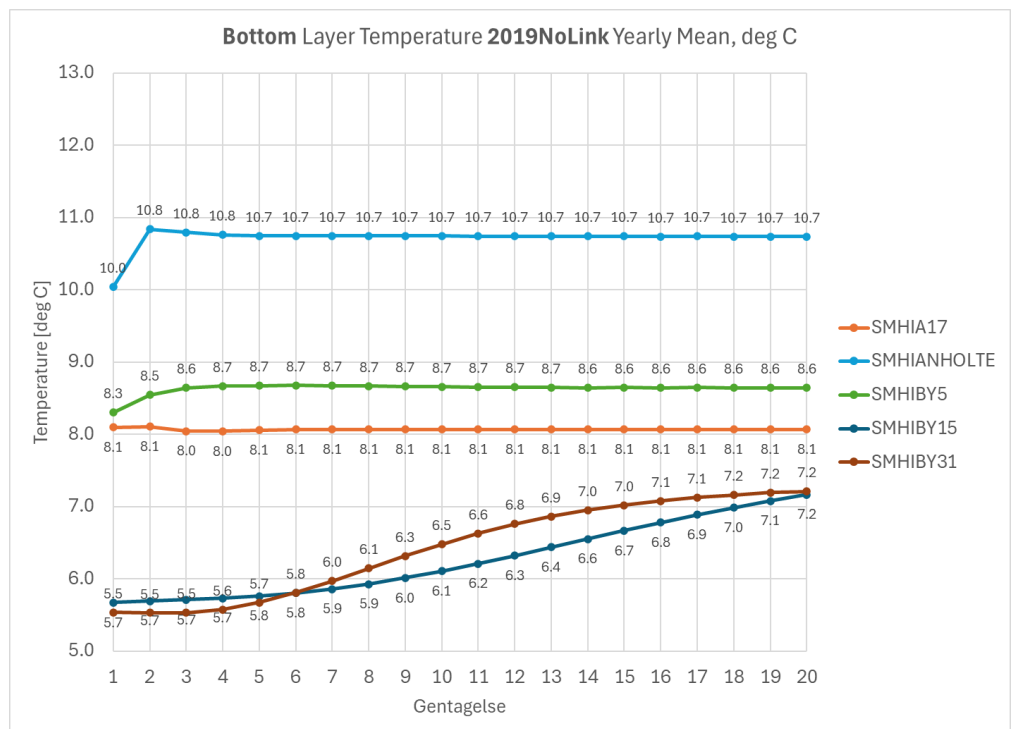
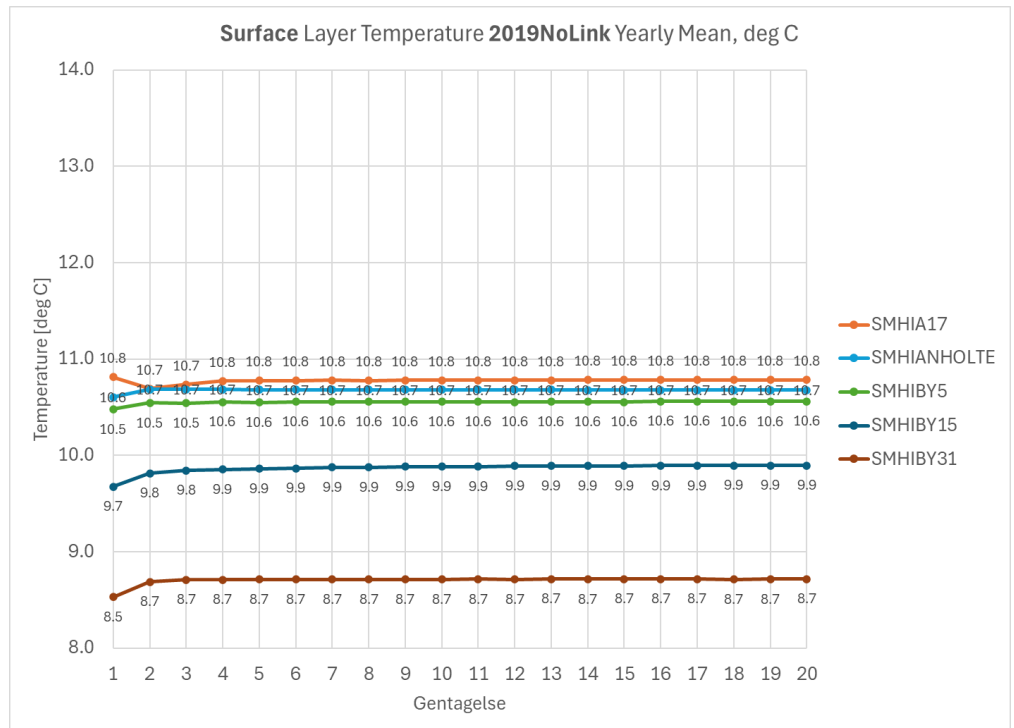
Ændringerne i de sidste gentagelser er generelt relativt større for middel temperatur end for middel saltholdighed.

Den længste indstilling sker omkring skillefladen og de dybeste lag i den indre Østersø, og længst inde i indre Østersø, for eksempel i Gotland Bassinet og Landsort Dybet.



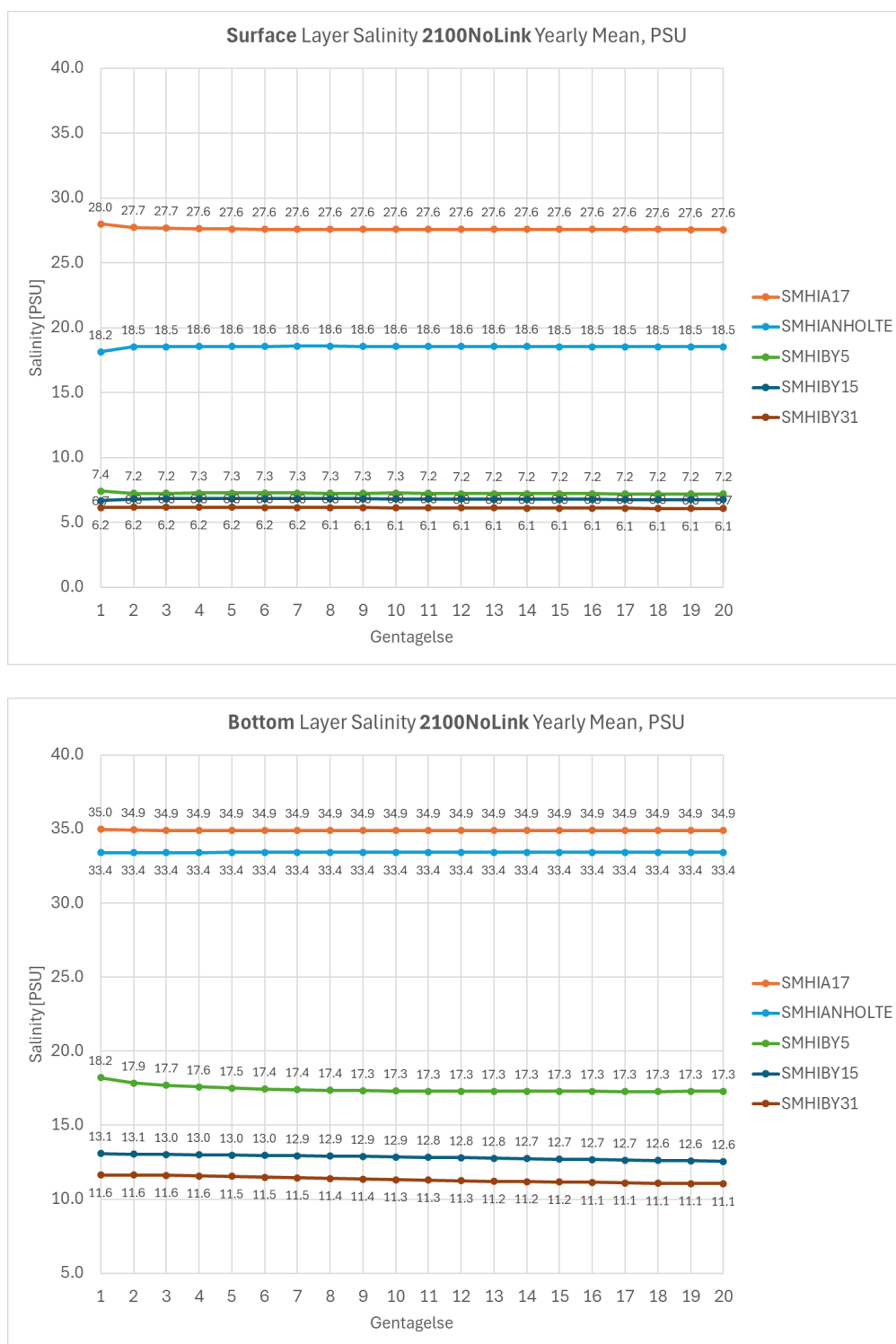
Figur A-1

Udviklingen af middel saltholdighed (g/kg) nær overflade og tættere på bunden i de 20 gentagelser af år 2019: -1m og -40m ved Anholt i Kattegat (SMHIANHOLTE), -1m og -80m i Bornholmer Bassinet (SMHIBY5), -1m og -200m i Gotlands Bassinet (SMHIBY15) og -1m og -180m i Landsort Dybet (SMHIBY31).

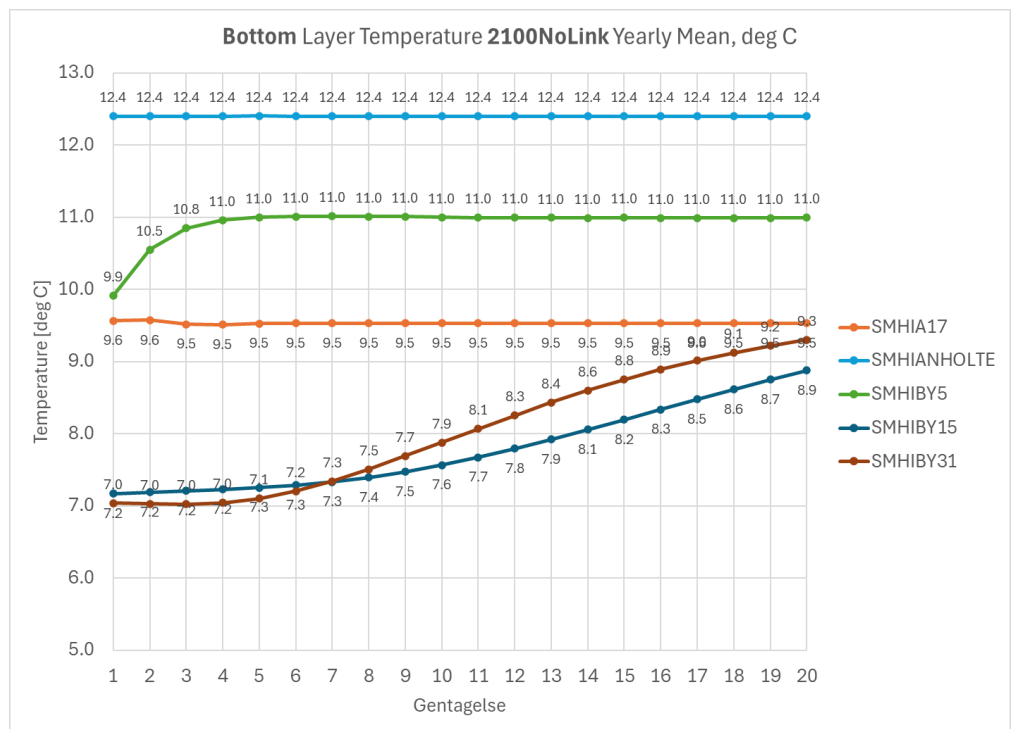
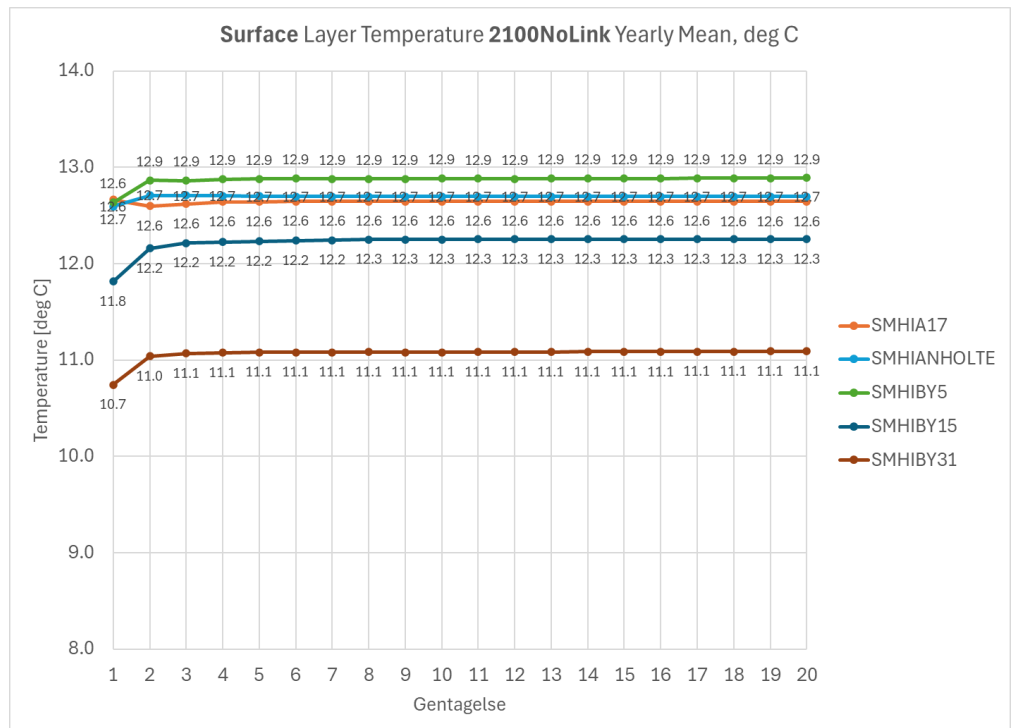


**Figur A-2** Udviklingen af middel temperatur (°C) nær overflade og tættere på bun-  
den i de 20 gentagelser af år 2019: -1m og -40m ved Anholt i Kattegat  
(SMHIANHOLTE), -1m og -80m i Bornholmer Bassinet (SMHIBY5), -1m og  
-200m i Gotlands Bassinet (SMHIBY15) og -1m og -180m i Landsort Dybet  
(SMHIBY31).





**Figur A-3** Udviklingen af middel saltholdighed (g/kg) nær overflade og tættere på bunden i de 20 gentagelser af år 2100: -1m og -40m ved Anholt i Kattegat (SMHIANHOLTE), -1m og -80m i Bornholmer Bassinet (SMHIBY5), -1m og -200m i Gotlands Bassinet (SMHIBY15) og -1m og -180m i Landsort Dybet (SMHIBY31).



**Figur A-4** Udviklingen af middel temperatur (°C) nær overflade og tættere på bunden i de 20 gentagelser af år 2100: -1m og -40m ved Anholt i Kattegat (SMHIANHOLTE), -1m og -80m i Bornholmer Bassinet (SMHIBY5), -1m og -200m i Gotlands Bassinet (SMHIBY15) og -1m og -180m i Landsort Dybet (SMHIBY31).

