

SUND OG BÆLT

STRØMNINGSANALYSE, MV. AF FREMSKUDT FÆRGEHAVN VED TÅRS

ØKOLOGISK MODELLERING

ADRESSE COWI A/S
Parallelvej 2
2800 Kongens Lyngby

TLF +45 56 40 00 00

FAX +45 56 40 99 99

WWW cowi.dk

INDHOLD

1	Sammenfatning	3
1.1	Baggrund	3
1.2	Økologisk påvirkning af Østersøen	4
2	Indledning	6
2.1	Formål	6
2.2	Indhold og baggrund	6
3	Økologisk model	8
3.1	Indledning	8
3.2	Modellen	9
3.3	Infrastrukturprojekter	11
3.4	Parameterisering i den regionale model	13
3.5	Klimaændringer	14
4	Forudsætninger og konsekvenser	22
4.1	Introduktion	22
4.2	Infrastrukturprojekter	22
4.3	Klimaændringer	24
4.4	Sensitivitetstest	25
4.5	År 2019	25
4.6	Vurdering af resultater	29
5	Økologisk påvirkning af Østersøen	32
5.1	Baggrund	32
5.2	HELCOM "Core indicators"	32
5.3	Supplerende indikatorer	51
5.4	Sensitivitetstest	67

PROJEKTNR.

DOKUMENTNR.

A258774

HYD-RAP-03

VERSION

UDGIVELSESDATO

BESKRIVELSE

UDARBEJDET

KONTROLLERET

GODKENDT

1.0

2 juni 2025

Økologisk modellering

MBI/FLJ/RMC

AER/NGR

JJU

5.5	Samlet betragtning af økologisk påvirkning	68
6	Diskussion	69
6.1	Infrastrukturprojekter og klimaændring	69
6.2	Vurdering af infrastrukturprojekter	71
6.3	Opholdstid og miljøforhold i Østersøen og forsinkelse i signal	71
6.4	Miljømål for Østersøen	72
7	Referenceliste	74

BILAG

Bilag A	Begrænsende faktorer for torskens reproduktive volumen
---------	---

1 Sammenfatning

1.1 Baggrund

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

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 infrastrukturprojekters og klimaændrings¹ samlede påvirkning af hydrografien og økologien i Østersøen.

Denne rapport fokuserer på de kumulerede effekter af udvalgte infrastrukturprojekter for Østersøens havmiljø i et nuværende (repræsenteret ved år 2019) og fremtidigt (år 2080-2100) klima. Endvidere belyses miljøeffekter af klimaforandringer uden infrastrukturprojekter.

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 forundersøges
- 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 overordnede 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
- En middel afstrømningskorregeret næringsstofftilførsel på +19% til Østersøen (nutids næringsstofkoncentration og øget afstrømning på 19% (2100)).

¹ Med klimaændringer menes der generelt menneskeskabte klimaændringer.

Udover modelscenarierne udføres også en sensitivitetstest, med alle de bestemte klimaændringer i år 2100, men hvor afstrømningen fra land kun er øget med det halve af den beregnede øgning i afstrømning (+9,5%).

Fokus i studiet er således at få de økologiske ændringer, der skyldes infrastrukturprojekter og klimaændringer, til at fremstå klart.

Ændringer af de økologiske 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, lagdeling og iltforhold. 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 naturlig langperiodisk variation af alle de parametre, der betragtes i dette arbejde, for eksempel vandføring, salttransport, lagdeling og iltforhold. Grundlæggende vurderes effekten af forbindelserne således 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 nær denne samme påvirkning for de store indstrømninger, som for typiske forhold.

Både infrastrukturprojekter og klimaforandringer medfører potentielt ændringer af de hydrografiske forhold, som kan påvirke Østersøens økosystem². I denne rapport fokuseres alene på de økologiske effekter af de hydrografiske ændringer og ikke de hydrografiske ændringer i sig selv. For eksempel vil en stigning af vandtemperaturen bevirke et mindre iltindhold og et hurtigere forbrug af ilt i havvandet, og altså et skift mod iltfattigere forhold i bundlagene i Østersøen. Det afgørende for Østersøen er således de mere iltfattige forhold og ikke temperaturstigningen i sig selv. De hydrografiske ændringer beskrives i en parallel rapport, der omhandler hydrografien i Østersøen (Sund & Bælt, 2025A).

1.2 Økologisk påvirkning af 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 større infrastrukturprojekter, samt klimaændringerne i det valgte klimascenarie.

² 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.

Det findes, at de økologiske forhold (klorofyl, næringsstoffer, sigtdybde, ilt, cyanobakterier og torskens reproduktive volumen) påvirkes marginalt ($\pm$) af de undersøgte infrastrukturprojekter, både i et nutidigt og fremtidigt klima. For eksempel bliver torskens reproduktive volumen, marginalt øget af infrastrukturprojekter. Den positive ændring af det reproduktive volumen i Bornholmer Bassinet og "Østlige Gotlands Bassin", skyldes en stigning i saltholdighed i bundlaget i "Bornholmer Bassinet", og en stigning lige under haloklinen i "Østlige Gotlands Bassin" (pga. stigningen i bundlaget i Kattegat).

Påvirkningen fra klimaændringer på økologien er betydelig - de ændrede økologiske forhold er af en størrelse, der vil kunne måles og dokumenteres i fremtidige monitoreringsprogrammer. De ændrede økologiske og hydrografiske forhold forårsaget af klimaændringerne forventes at have en betydelig påvirkning på miljøet i Østersøen. En væsentlig hydrografisk ændring er vandtemperaturstigningen, som vil bevirke et mindre iltindhold og et hurtigere forbrug af ilt i havvandet, altså et skift mod iltfattigere forhold i bundlagene i Østersøen, hvilket bl.a. vil medføre en reduktion i torskens reproduktive volumen. Endvidere vil vandtemperaturstigningen medføre øget dominans af cyanobakterier i Østersøens fytoplankton samfund, hvilket vil facilitere øget fiksering af atmosfærisk kvælstof. Dette vil, i samspil med en potentiel øgning i næringsstofftilførsler, medføre øget pelagisk primærproduktion og forstærke skiftet mod iltfattigere forhold i bundlagene i Østersøen yderligere. De ændrede hydrografiske forhold forårsaget af klimaændringerne er kvantificeret i den parallelle hydrografiske rapportering (Sund & Bælt, 2025A).

Påvirkningen fra forbindelserne på økologien og miljøforholdene er marginale. De ændrede økologiske forhold fra forbindelserne, som overvejende repræsenteres af meget små positive ændringer, er af en så marginal størrelse, at ændringen ikke forventes at kunne måles og dokumenteres i fremtidige monitoreringsprogrammer.

Overordnet viser 2100-sensitivitetstesten med den halve afstrømning og tilsvarende næringsstofftilførsel en tilsvarende mindre respons på de eutrofieringsrelaterede indikatorer (klorofyl, næringsstoffer, sigtdybde) sammenlignet med scenariet med forøgelse i afstrømning (og tilførsler) til Østersøen på +19%. Cyanobakterier og ilt i bundvandet viser dog en svagere respons, da disse indikatorer i højre grad er temperaturfølsomme, og temperaturen som nævnt ikke er ændret i sensitivitetstesten. Miljøhandleplanen for Østersøen indeholder endnu ikke en strategi for håndtering af klimaændringer og de afledte effekter for miljøforhold i Østersøen, men generelt gælder det, at en øgning i f.eks. klorofylkoncentrationer og næringsstof i Østersøbassiner, forventeligt skal kompenseres af næringsstofreduktioner, således at politisk vedtagne miljømål opnås.

2 Indledning

2.1 Formål

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

Formålet med studiet 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 påvirkning af hydrografien og økologien i Østersøen.

Denne rapport fokuserer på de kumulerede effekter af udvalgte infrastrukturprojekter for Østersøens havmiljø i et nuværende (repræsenteret ved år 2019) og fremtidigt (år 2080-2100) klima. Endvidere belyses miljøeffekter af klimaforandringer uden infrastrukturprojekter.

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

2.2 Indhold og baggrund

Denne rapport beskriver:

- Opsætningen af den økologiske model benyttet til studiet, herunder randbetingelser og hvorledes disse ændres pga. betragtede forbindelser, klimaændringer, og valgte scenarier; og
- Giver dernæst en præsentation og analyse af de økologiske resultater, hvor fokus ikke mindst er på, hvorledes de økologiske 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 og økologiske 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 studiet, herunder hvilke økologiske 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 netop 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 i rapporten præsenteret understøttet af figurer og analyser.

I studiet benyttes der også en videreudviklet konceptuel model, som beskriver middelforholdene 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, der er 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.

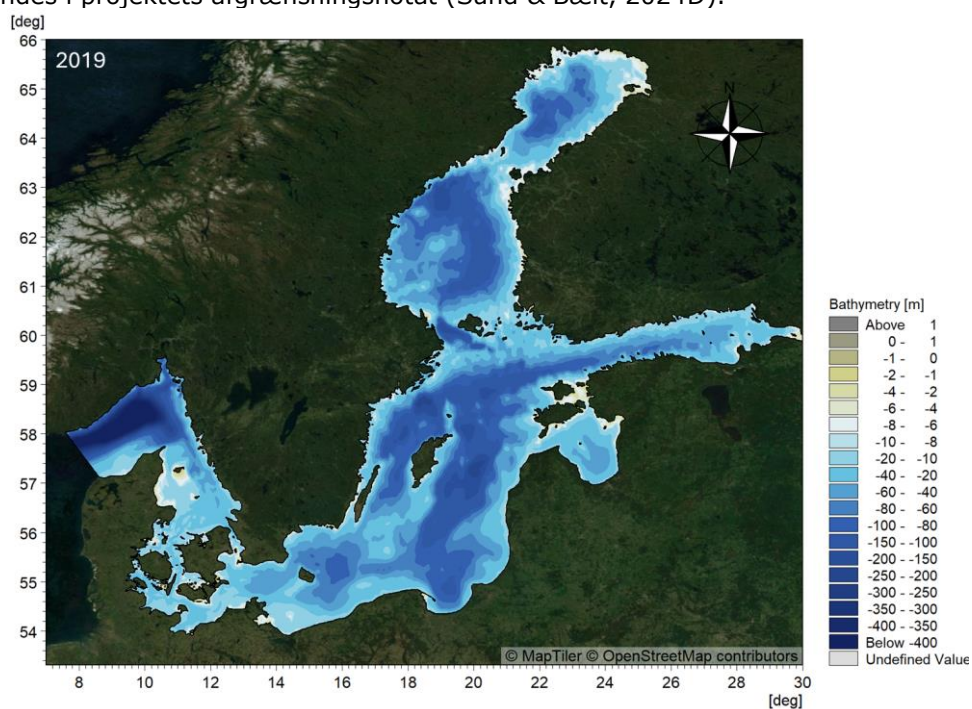
3 Økologisk model

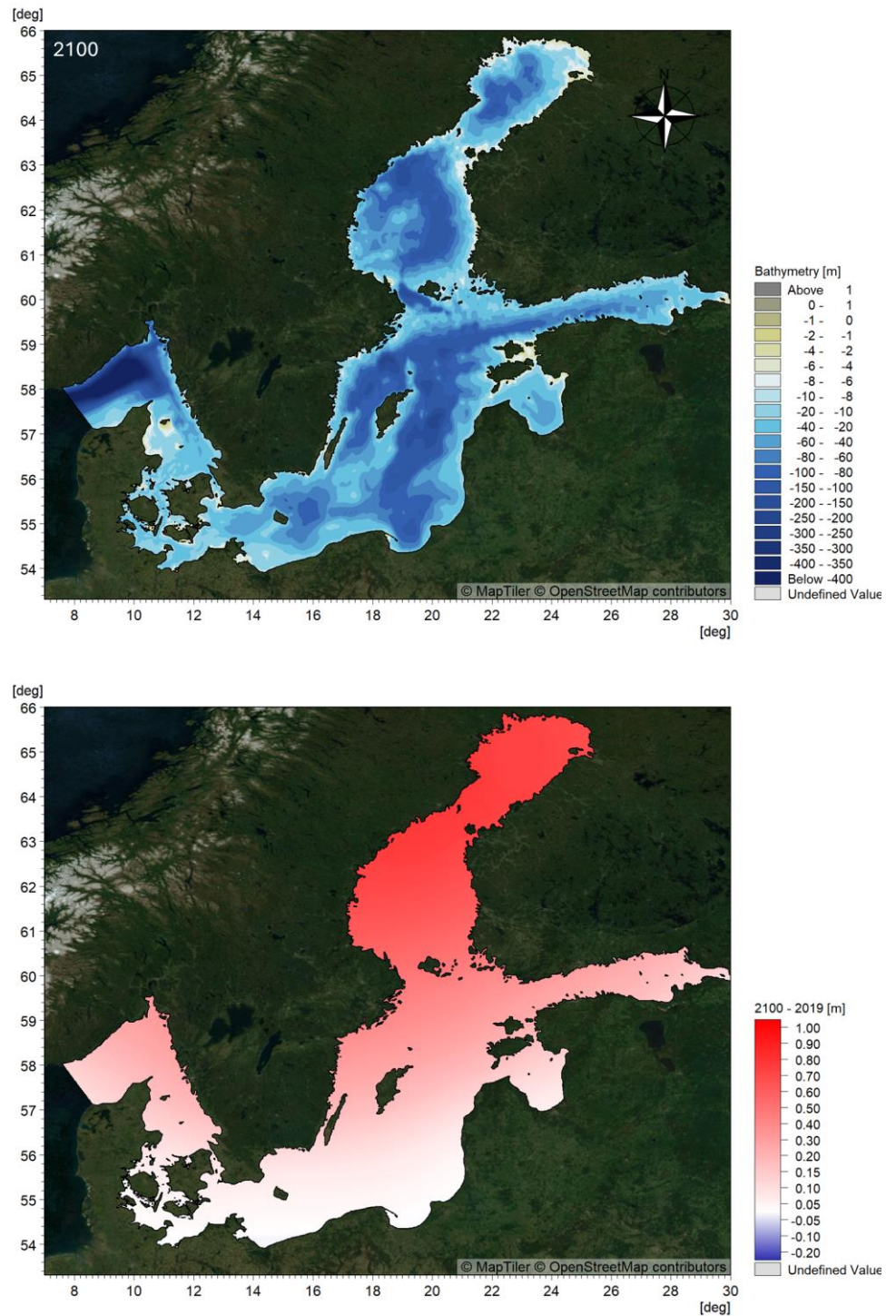
3.1 Indledning

En hydrografisk og en økologisk regional model er sat op og dækker Østersøen:

- Regional model, se Figur 3-1.
Den benyttes til vurdering af:
 - Strømningsmodstand fra infrastrukturprojekter
 - Klimaeffekter
 - Miljøforhold i Østersøen

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





Figur 3-1 Østersøens område og batymetri. Øverst: 2019, midten: 2100 med land/havbundshævninger og nederst: Forskel i batymetri mellem 2100 og 2019.

Udvalgte detaljer omkring opsætningen beskrives i det følgende.

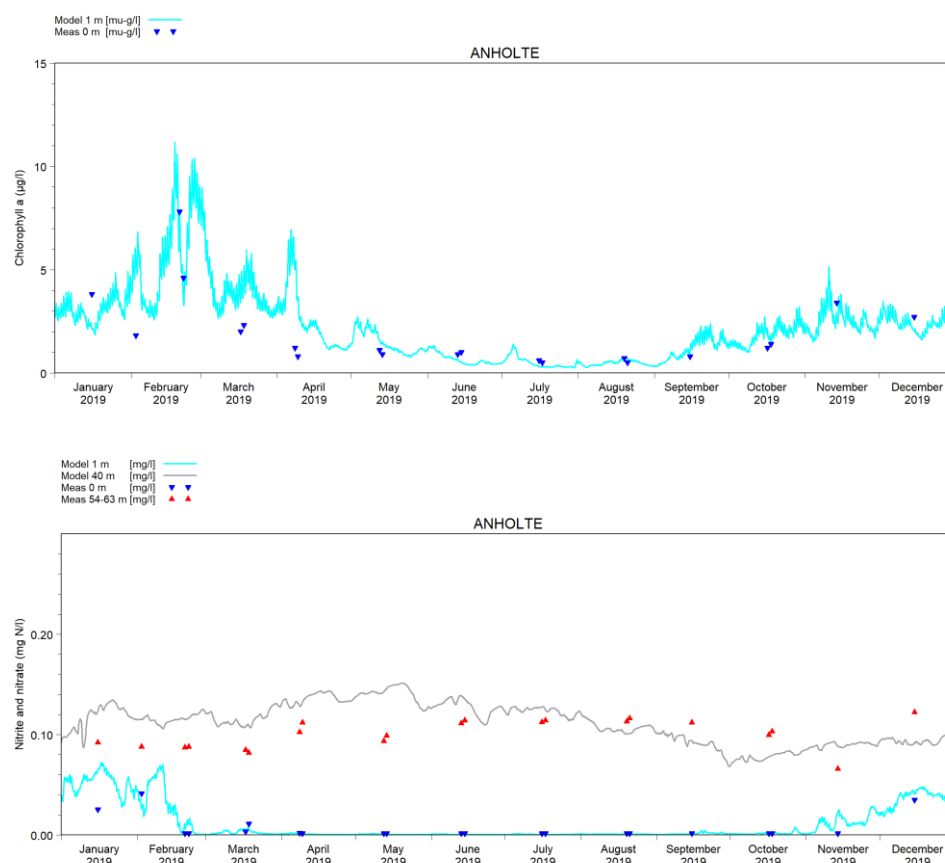
3.2 Modellen

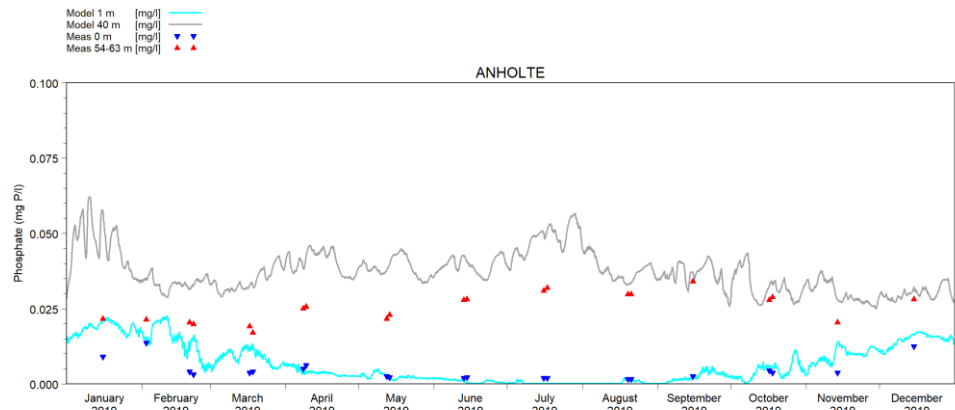
Den regionale model er en eksisterende model (ofte benævnt DKBS-modellen, se DHI 2020a) sat op i MIKE modelsystemet, der køres operationelt på DHI.

Modellens horisontale net består primært af trekantede elementer i varierende størrelser, men der er også anvendt firkantede elementer til at opløse specifikke dybe kanaler i Bælthavet. Den horisontale opløsning varierer gradvist fra 500-1000 m i Bælthavets kystområder til 4-6 km i Østersøområdet. I det vertikale net er vandsøjlen opløst i 10 sigma-lag med ens lagtykkelse ned til -10 m niveau (svarende til en lagtykkelse på 1/10 af vanddybden) og op til 233 z-lag under -10 m niveau. Fra niveau -10 m til -220 m (Gotlandsdybet) er lagtykkelsen 1 m, og mellem 220 m og 610 m (bunden af Skagerrak) øges lagtykkelsen gradvist fra 5 m til 20 m.

De vigtigste komponenter og processer, der bestemmer havmiljøets tilstand og responsen i økosystemet, er inkluderet i den økologiske model. De er baseret på eksterne faktorer (meteorologi og næringsstoftilførsler). Modellen beskriver omsætningen af organisk materiale og næringsstoffer (opløst uorganisk kvælstof, fosfat og silikat), både i den pelagiske (vandsøjle) og den bentiske fase (havbund eller sediment). Den pelagiske fase omfatter planteplankton og næringsstoffer, og den bentiske del dækker sedimentpuljer af næringsstoffer og udvekslingen af næringsstoffer mellem sediment- og vandfasen.

Modellen er kalibreret og valideret. En sammenligning af målt og beregnet klorofyl, NO_x og fosfat ved Anholt i 2019 er vist i Figur 3-2.





Figur 3-2 Sammenligning af målt (fra NOVANA målinger) og beregnet klorofyl, NOx og fosfat i overflade- og bundvand med DKBS-modellen ved Anholt.

3.2.1 Randbetingelser

DKBS modellen har én åben grænse mod Nordsøen (se Figur 3-1). Grænselinjen starter ved Tregde i Norge og slutter ved Hanstholm i Danmark. De biogeokemiske data til randbetingelserne er udtrukket fra DHI's operationelle Nordsømodel (UKNS2-HD28 modellen) og omfatter alle modellens tilstandsvariabler bl.a. klorofyl, uorganiske næringsstoffer (DIN og DIP) og ilt. Dokumentation af randbetingelser for den biogeokemiske modeludvikling er givet i DHI (2020b).

3.2.2 Simuleringsperioder

Til simuleringerne af den regionale model benyttes år 2019, hvilket gentages cyklisk med de drivende kræfter (vandstand, meteorologi, afstrømning og næringsstofftilførsler), indtil en nær-stationær situation udvikles. De drivende kræfter (vandstand, meteorologi, afstrømning og næringsstofftilførsler) i år 2019 ændres pga. klimapåvirkninger til at repræsentere år 2100, og år 2100 gentages ligeledes cyklisk indtil en nær-stationær situation udvikles. Klimaændringerne er de forventede klimaændringer i år 2100 (se afsnit 3.5), 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 nær-stationær situation udvikles. Da det kun drejer sig om cyklisk brug af 'et repræsentativt år' er der ikke nogen mellem-årlige påvirkninger, og infrastruktur forbindelsernes påvirkning kan derved identificeres i resultaterne.

3.3 Infrastrukturprojekter

3.3.1 Betragtede infrastrukturprojekter

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 vandgennemstrømningen kendes med forskellig præcision. En oversigt er præsenteret i Tabel 3-1 (fra Sund & Bælt, 2024C) baseret på de udvalgte anlægsvarianter.

Tabel 3-1 Oversigt over infrastrukturprojekternes omtrentlige påvirkning af vandgennemstrømningen i det lokale stræde (Øresund, Lillebælt, Storebælt og Femernbælt) og i det samlede overgangsområde (Bælthavet og Øresund). Lokale påvirkninger er udtrykt fra 1: (By & Havn, 2020), 2: (DHI & COWI, 2024), 3: (Sund & Bælt, 2024B), 4: (Sund & Bælt, 2018), og 5: (Sund & Bælt, 2022). Ændringen er opgjort som ændring i strømmodstand på minimum årlig skala.

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

Det bemærkes, at strømningsændringerne for de forskellige projekter er simuleret med et modelområde, der er mindre end hele det stræde, projekterne ligger i. Derfor er de simulerede strømningsændringer lidt for store og ligger dermed "på den sikre side". Projekterne og de associerede strømningsændringer er efterfølgende indbygget i den regionale model som faste strukturer.

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 estimeret til -0,16 – -0,49%.

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 3-3:

- 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 mindre modstand kan vurderes ved en 'interpolation' pba. deres mindre modstand, og giver mindre påvirkning af forholdene i Østersøen.



Figur 3-3 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):

- 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

Ændringerne i Østersøens hydrografi, økologi 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 (2005).

Der er klimaændringer fra referencetidspunktet i 2005 og frem til 2019. Af denne årsag er de betragtede klimaændringerne 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

Ændringerne opløses i tid per måned. 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 (herunder næringsstofftilførsler)

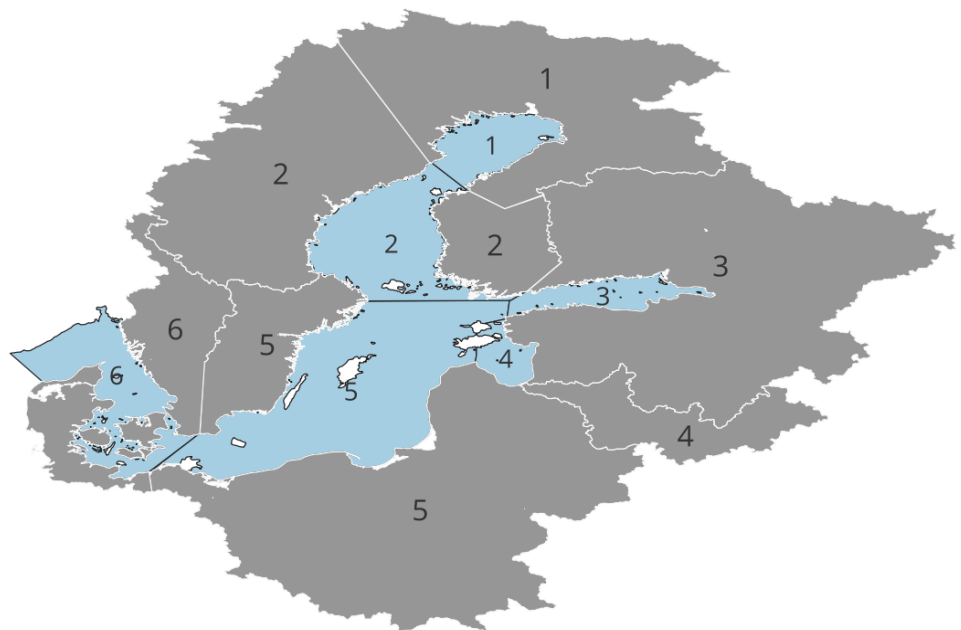
Disse parametre (undtagen landhævning) ændres direkte eller indirekte af klimaændringerne, hvor de fleste af parametrene stiger eller øges på grund af klimaændringerne.

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 og økologiske 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 processeret og outputtet 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 3-4.



Figur 3-4 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 (HELCOM 1986).

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.

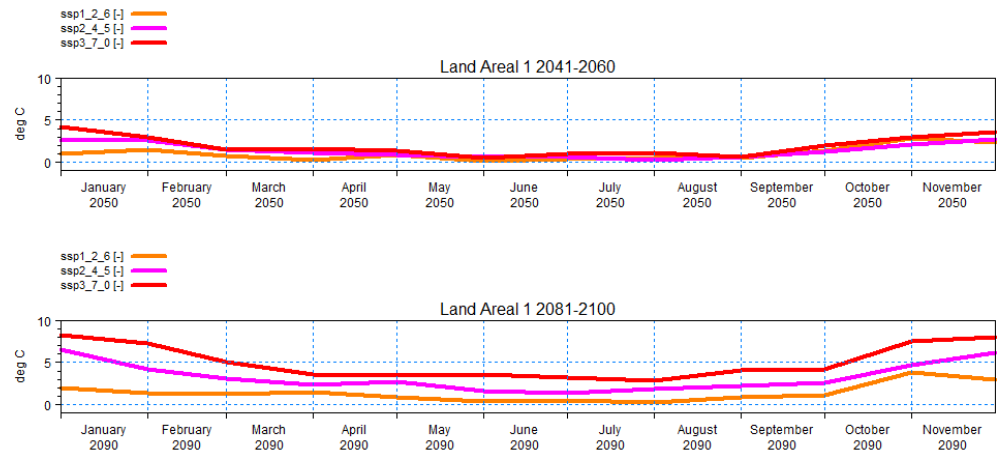
Vind, lufttemperatur og nedbør

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

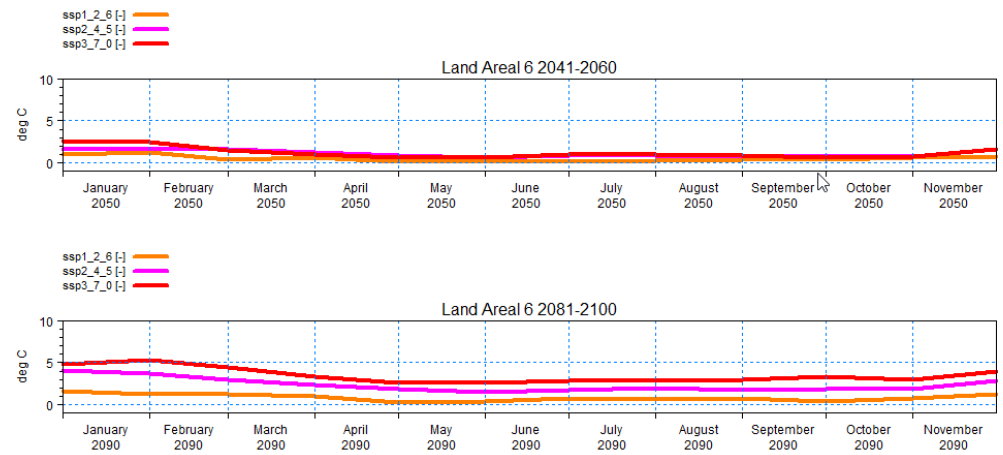
Ændring i lufttemperatur og nedbør påføres lufttemperatur- og nedbørfelterne benyttet i den regionale model i 2019 (Sund & Bælt, 2024E). Øgningen i lufttemperatur tillægges lufttemperaturen i de 6 områder vist i Figur 3-4, og tilsvarende multipliceres en nedbørsændringsfaktor på nedbørfelterne i 2019.

Analyserne af lufttemperaturen viser, at klimaændringerne giver den største øgning i lufttemperaturen i den nordlige del af Østersø området. Figur 3-5 og Figur 3-6 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.

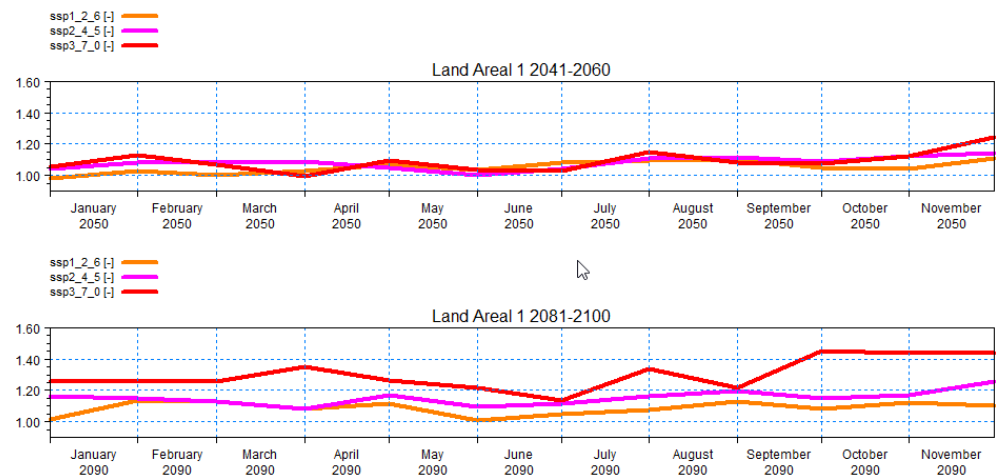
Klimafaktorerne for nedbør er bestemt for områderne vist i Figur 3-4, og opdelt i land og vand. Der er begrænset forskel mellem land og vand, inden for de enkelte områder. I Figur 3-6 og Figur 3-7 vises klimafaktorerne for land for områderne 1 og 6. Det er specielt for det høje klimascenarie, at der er forskelle.



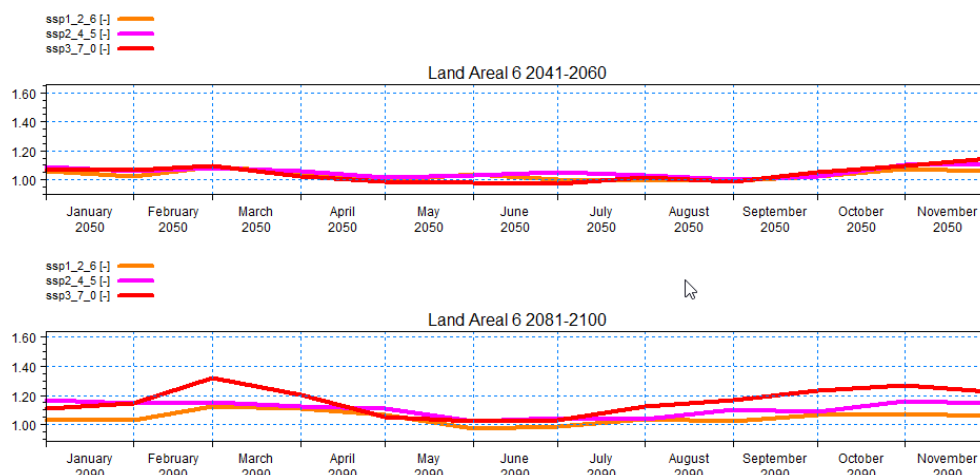
Figur 3-5 Øgning i lufttemperatur i område 1.



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



Figur 3-7 Klimafaktorer for nedbør over land for område 1.



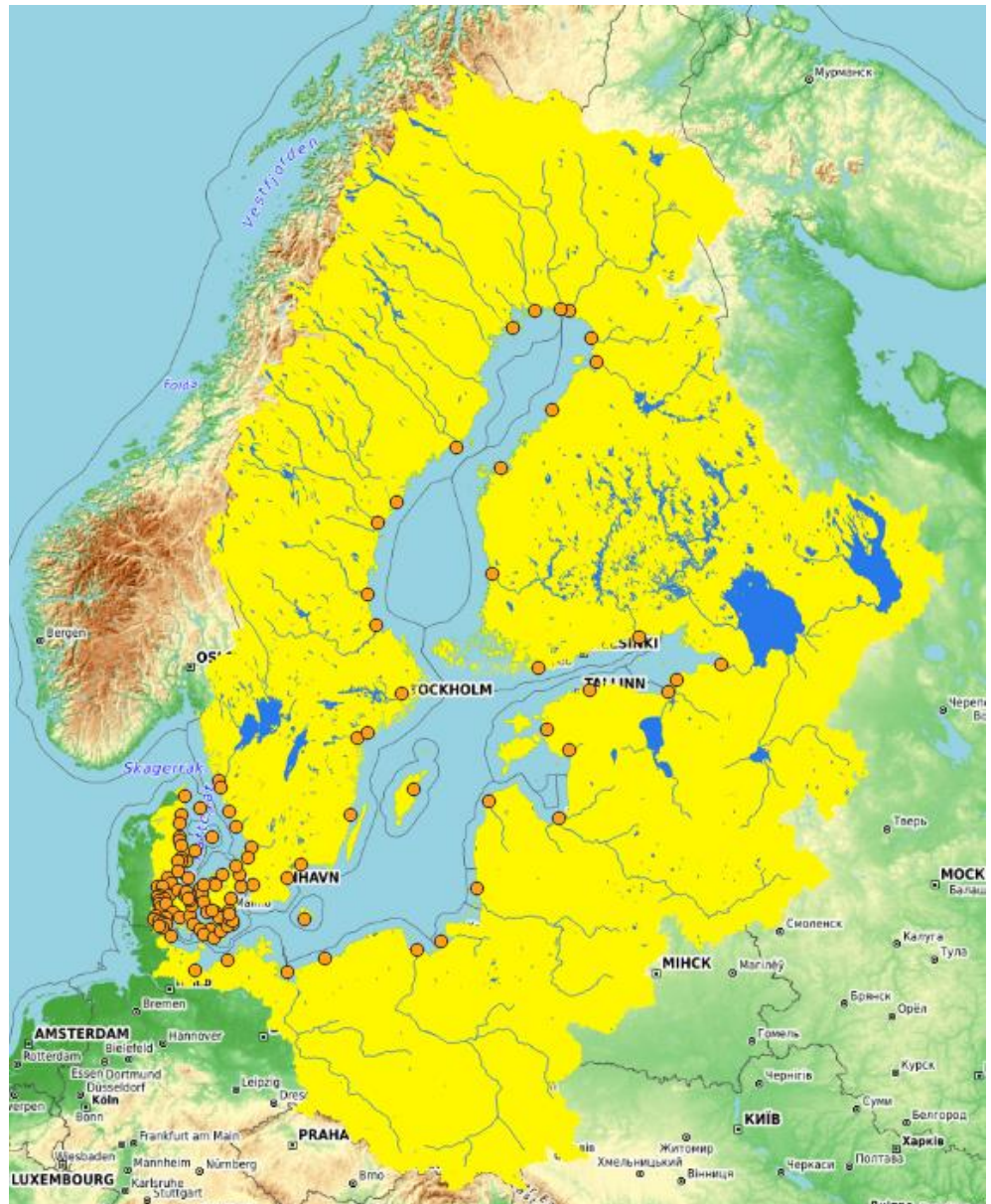
Figur 3-8 Klimafaktorer for nedbør over land for område 6, som inkluderer Danmark.

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 Hydrologisk 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). Afstrømningen beregnes også i år 2100 med den øgede lufttemperatur og nedbør.



Figur 3-9 Østersøens afstrømningsområde (det gule område) og tilstrømningspunkter til Østersøen langs kysten (orange punkter).

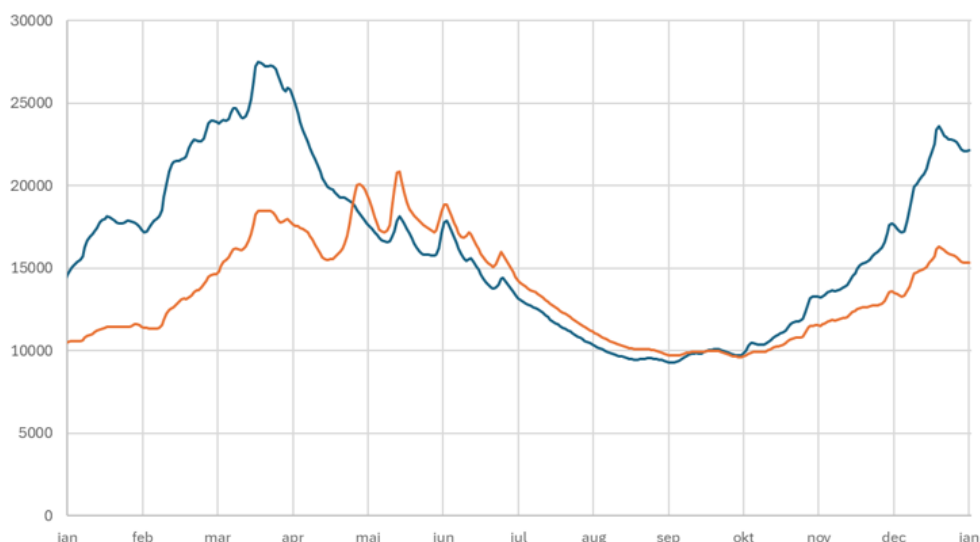
Modellen er valideret vha. data fra mange områder, flere klimabælter og med mange års data. Derfor er modellen også egnet til at beskrive klimaændringer ved Østersøen. Klimaændringen ved Østersøen svarer til forskydning af klimabælterne. Forholdene ved Østersøen i 2100 ændres til omkring det nuværende 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 forsinkelse gennem søer og reservoirer. Vandbalansen er ikke påvirket af disse ændringer. Af denne årsag betragtes modellen stadig som værende valideret.

Afstrømningen fordeles på 73 tilstrømningspunkter omkring Danmark og 46 tilstrømningspunkter omkring den indre Østersø og vestkysten af Sverige, se Figur 3-9. 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 3-10 er afstrømningen til Østersøen vist for både år 2019 og år 2100 (SSP2-4.5).



Figur 3-10 Afstrømning (m^3/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 pga. klimaændringer.

Gennemsnit	Afstrømning [m^3/s]	Nedbør [mm]	Potent. fordampning [mm]
2019	13.788	710	601
2100	16.368	790	649
Forskel [%]	+18,7%	+11,3%	+8%

Næringsstofftilførsler og atmosfærisk deposition

Fremtidige næringsstofftilførsler er afhængige af en række faktorer, fx klimarelaterede ændringer i temperatur, nedbør og arealanvendelse, ikke mindst landbrugspraksis, herunder potentiel øgning af skovarealer, udtagning af lavbunds-jorde og implementering af vådområder. Dertil kommer at landbrugspraksis som sådan forventes at være anderledes om 50-100 år sammenlignet med i dag. På EU-plan er der stort politisk fokus på at reducere både landbaserede næringsstofftilførsler og den atmosfæriske deposition. Imidlertid er der stor usikkerhed om implementeringen af de vedtagne aftaler og dermed, hvornår og i hvilket omfang effekterne kan forventes. I dette studie er der derfor ikke udviklet scenarier, der forholder sig til politiske tiltag, som påvirker fx landbrugspraksis. Af afsnit om Ferskvandstilstrømning fremgår, at afstrømningen stiger som funktion

af klimaændringerne, samt at den årlige fordeling også ændres, så afstrømningen hovedsageligt stiger i vintermånederne. Ved at anvende tidsserier for de enkelte vandløb/floder/elve med uændrede nutids klimatiske månedskoncentrationer af næringsstoffer, tages der højde for de ændrede tilstrømninger, under antagelse af, at koncentrationer i de respektive oplande ikke ændres markant. Denne tilgang giver øget tilførsel med øget afstrømning uden at introducere antagelser vedrørende specifikke dynamikker og arealanvendelser i oplandene og understøttes desuden af korrelationer mellem afstrømning og næringsstofftilførsler til Østersøen.

For at udjævne år-år variationer i næringsstofftilførsler anvendes kildespecifikke tidsvarierende tilførsler baseret på gennemsnit for perioden 2017-2021 (5 år).

Atmosfærisk kvælstofdeposition

Sammenhængene mellem ændret klima (herunder ændrede nedbørsmønstre) og atmosfærisk kvælstofdeposition er komplekse, og der er ikke noget entydigt svar på, om ændret nedbør vil give ændret atmosfærisk kvælstofdeposition. Til eksempel er oxideringen af NO og NO₂ stærkt afhængig af OH radikaler, der kræver sollys (som der må formodes at være mindre af i forbindelse med regnvejr). Helt generelt vil atmosfærekemien være ændret ved ændret klima, fx ligevægten mellem NH₃ og HNO₃ $\leftrightarrow$ NH₄NO₃, som er stærk temperaturafhængig, og derved bestemmende for om N er på gas- eller partikel / aerosol form. Den atmosfæriske kvælstofdeposition holdes derfor uændret ift. reference året 2019 i nærværende analyse.

4 Forudsætninger og konsekvenser

4.1 Introduktion

I Forudsætningsnotatet (Sund & Bælt, 2024E) er baggrunden for valgte forudsætninger givet i detaljer, herunder for de betragtede 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 i læ af henholdsvis Prøvestenen og Københavns Lufthavn.
- Derudover er begge ramper delvist strømlinet.

Derfor antages vandføringsreduktionen 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. Vandføringsreduktionen 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.

Det kan nævnes, at havnens strømningsmodstand i en tidligere rapport (KK & KDI, 2009) er 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 der 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.

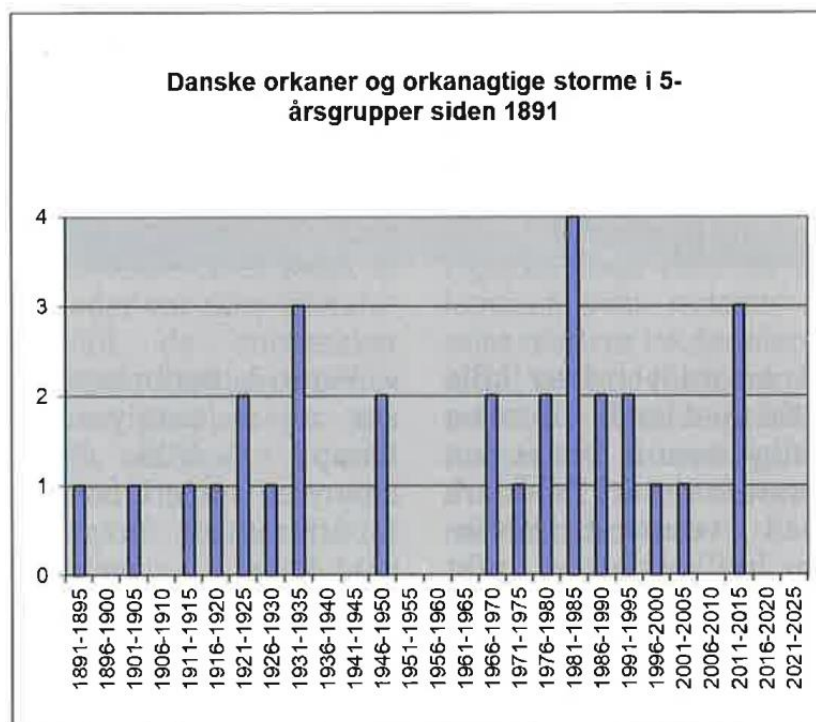
I projektet lægges der vægt på middelændringer (og af denne årsag er den benyttede Delta Change metode tilstrækkelig). Der er stor 'inerti' i Østersøen, tidskalaen er 5 – 30 år afhængigt af område og dybde, og således ændres forholdene i Østersøen ikke ved for eksempel kortvarige ændringer i afstrømning.

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). 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 tidslige 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 Sensitivitetstest

En sensitivitetstest er udført med alle de bestemte klimaændringer i år 2100, men hvor afstrømningen fra land kun er 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, og derved også tilførslerne med N og P, som mindskes i sensitivitetstesten.

4.5 År 2019

4.5.1 Det mest repræsentative år

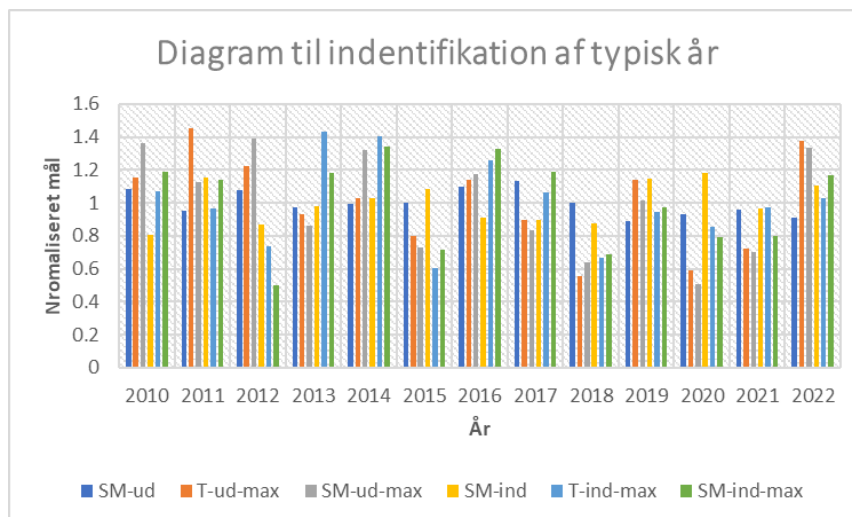
Det er valgt at benytte 2019 som et repræsentativt år i beregningerne.

I Sund & Bælt (2024A) er de 13 år fra 2010 til 2023 analyseret for at 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 Jakobsen et al. (2010).

Hydrografiske strømningsforhold, der er benyttet til at karakteriserer årene, se Figur 4-3:

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

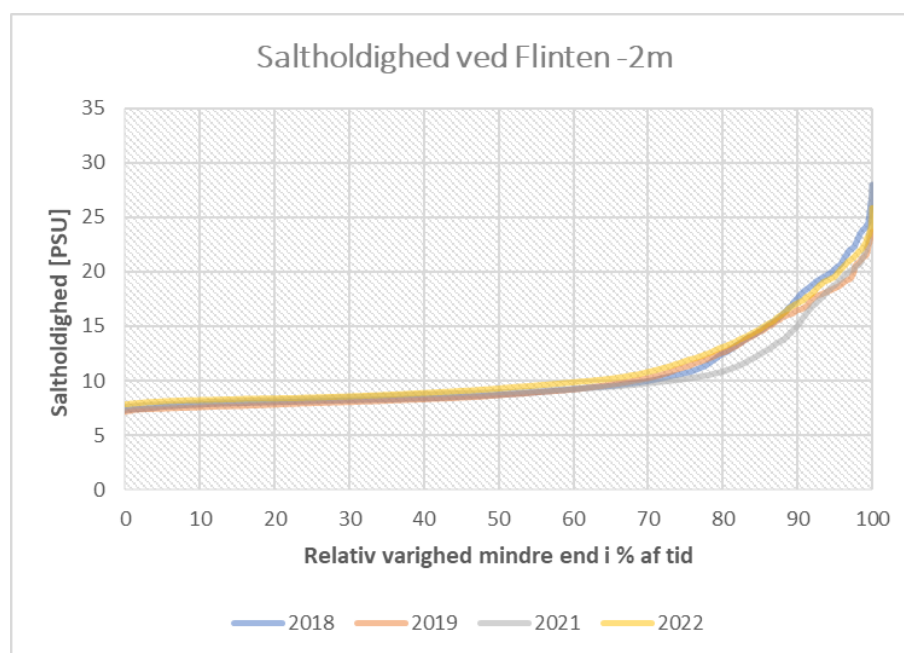
En integration af målene viser, at 2019 er det mest repræsentative år.



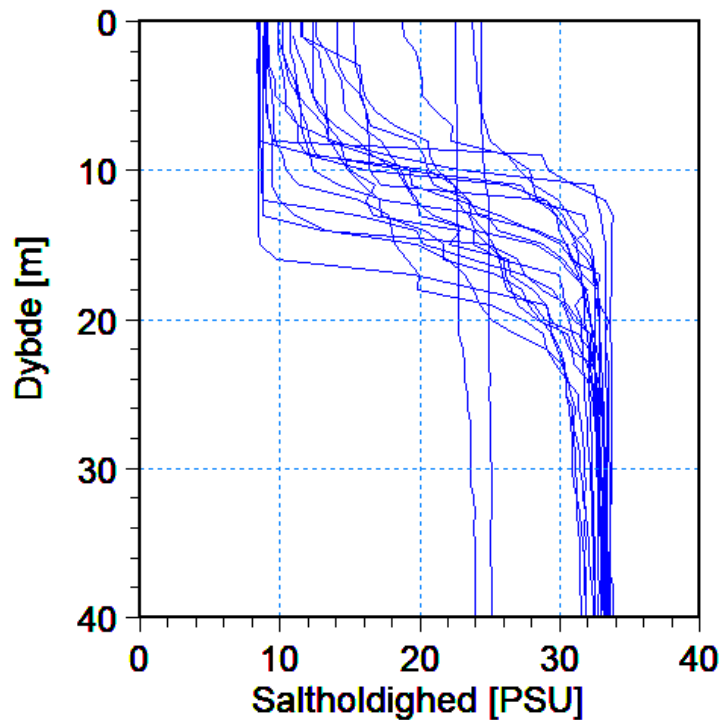
Figur 4-3 De 6 normaliserede mål i de enkelte år (fra Sund & Bælt, 2024A).

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 opblander vandmasserne, se Figur 4-5.



Figur 4-4 Angivelse af varigheder i % af tid af 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
3	02-01-2019	163	170
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
33	09-01-2019	111	118
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 denne opgave.

4.5.2 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.

Resultaterne er påvirket af dette på to forskellige måder:

- De økologiske og miljømæssige karakteristika af 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 og iltforholdene 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 og økologiske 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.

4.6 Vurdering af resultater

Nærværende analyser er ikke en miljøkonsekvensvurdering af den fremskudte færgehavn ved Tårs, men en undersøgelse af den fremskudte havn og andre udvalgte infrastrukturprojekters og klimaændringers påvirkning af hydrografien og økologien i Østersøen (se projektets Kommissorium). Først efter nærværende analyser 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 Forudsetningsnotatet (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 Østersøhandleplaner. 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 (Baltic Sea Action Plan - 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). 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 kapitel 5 beskrives ændringerne af de økologiske forhold, der er forårsaget af de undersøgte infrastrukturprojekter og klimaændringer. I sig selv betragtes ændringerne af de hydrografiske forhold ikke at have afgørende betydning. Det betragtes som afgørende, hvorledes ændringerne påvirker miljøet i Østersøen. For eksempel vil en stigning af vandtemperaturen bevirke et mindre iltindhold og et hurtigere forbrug af ilten i havvandet, og altså et skift mod iltfattigere forhold

i bundlagene i Østersøen. De hydrografiske ændringer i Østersøen beskrives i en parallel rapport (Sund & Bælt, 2025A).

Kriterier for valg af indikatorer

Valget af indikatorer til vurdering af påvirkning af økologi og miljøforhold er baseret på følgende kriterier:

- Økologisk relevans: Indikatoren skal kunne relateres til økosystemets struktur og funktion
- Videnskabeligt dokumenteret: Indikatoren skal dokumenterbart variere forudsigeligt, som følge af ændringer i miljøtilstand og/eller ændringer i en eller flere presfaktorer
- Kvantificerbar: Indikatoren skal kunne kvantificeres ved brug af økologiske modeller, hvilket muliggør scenariekørsler.

I dette projekt er der alene fokus på åbne havområder i Østersøen, hvorfor indikatorer for kystnære og lavvandede områder ikke medtages (fx ålegræs/bundplanter).

HELCOM core-indicators

Vandkvaliteten i de åbne dele af Østersøen er forvaltet via Østersøhandleplanen (HELCOM), som landene omkring Østersøen har tilsluttet sig.

I Østersøhandleplanen opereres med såkaldte "core indicators" for vandkvalitet, som Østersølandene også skal tilslutte sig, før de bliver gældende. For at sikre international forståelse for – og accept af – undersøgelsen anvendes derfor, samme indikatorer og miljømål som i Østersøhandleplanen. Herved sikres også, at indikatorerne er økologisk relevante og videnskabeligt dokumenterede og accepterede.

HELCOM's "core indicators" som anvendes til vurdering af status for vandkvalitet i Østersøen og som anvendes til undersøgelse af effekter af klimaændringer og infrastrukturprojekter udgøres af:

- Sommer (juni-sept) klorofylkoncentration (fytoplankton)
- vinter (dec - feb) DIN (opløst uorganisk kvælstof) koncentration
- vinter (dec - feb) DIP (opløst uorganisk fosfor) koncentration
- sigtdybde (vandets klarhed og gennemtrængelighed for sollys)
- Iltgæld (kun for bassiner med permanent lagdeling), defineret som den manglende ilt relativt til fuld mætning.

HELCOM opererer med yderligere "core indicators", fx TN, TP og bundfauna, som her udelades, da de er delvist overlappende med andre "core indicators" og ikke umiddelbart kan kvantificeres af en økologisk model.

Hver "core indicator" har fastlagte målkriterier, og der er indsatsplaner til regulering af særligt kvælstof og fosforudledninger, som skal lede til målopfyldelse.

De overordnede miljømål for vandkvaliteten i Østersøhandleplanen er:

- Næringsstofkoncentrationer tæt på naturlige niveauer
- Klart vand
- Naturligt niveau for algeopblomstringer
- Naturlige iltniveauer

De "naturlige niveauer" anvendt som grundlag for fastlæggelse af miljømålene i Østersøhandleplaner er baseret på hindcast (ca år 1900) modelberegninger og historiske data dækkende perioden 1880-1970. Dvs. de "naturlige niveauer" i Østersøhandleplanen reflekterer en situation, hvor menneskabte klimaændringerne ikke er slået igennem i havmiljøet og uden påvirkning af vandgennemstrømningen fra infrastrukturprojekter i de danske farvande.

Grænseværdierne, der adskiller målopfyldelse fra ikke-målopfyldelse for centrale "core indicators" i den centrale Østersø fremgår af Tabel 4-2.

Da der kun er bassin specifikt miljømål og status for iltgæld i Bornholmer Bassinet anvendes denne "core indicator" ikke direkte, men iltforhold vurderes i stedet ud fra ilt i bundvandet (iltsvind) iht. gældende standarder for iltsvind: lavt iltindhold 4-6 mg/L, moderat iltsvind (2-4 mg/L) og kraftigt iltsvind (< 2 mg/L).

Tabel 4-2 Miljømål og statusværdier for centrale "core indicators" i den centrale Østersø HELCOM (2023).

	Kattegat		Arkona bassinet		Bornholms bassinet		Østlige Gotlands Bassin	
Indikator	Miljømål/Status		Miljømål/Status		Miljømål/Status		Miljømål/Status	
Klorofyl (ug/L)	1,50	1,39	1,8	2,29	1,55	2,37	1,90	2,99
DIN (umol/L)	5,00	5,26	2,9	3,8	1,8	4,16	2,60	4,20
DIP (umol/L)	0,49	0,52	0,36	0,6	0,28	0,71	0,29	0,67
Sigtdybde (m)	7,6	9,1	7,2	6,1	7,1	6,3	7,6	5,7
Iltgæld (mg/L)	-	-	-	-	6,37	8,43	8,66*	13,29*

*Consists of Gdansk Basin (SEA-008), Eastern Gotland Basin (SEA-009), Western Gotland Basin (SEA010), Northern Baltic Proper (SEA-012) and Gulf of Finland Western (SEA-013A) open sea assessment units.

Supplerende indikatorer

Cyanobakterier

Udover de udvalgte HELCOM core-indicators, suppleres med en indikator for cyanobakterie opblomstringer. Cyanobakterier har betydning for vandkvaliteten og næringsstoffodynamikken i de centrale og sydlige dele af Østersøen (Carstensen et al., 2019). Cyanobakterie opblomstringer i Østersøen er primært styret af fosfor-overskud, og er derudover afhængig af lav saltholdighed, samt varme og stille vejrforhold. Det kan ikke udelukkes at ændret vand- og salttransport til Østersøen potentielt kan påvirke frekvens og/eller omfang af cyanobakterieopblomstringer, og derfor kan en indikator for cyanobakterier inkluderes i effektvurderinger.

Torsk – Det reproduktive volumen

Østersøtorsken er på et historisk lavt niveau pga. multiple presfaktorer (fiskeri, miljøforhold, predation, parasitter osv). En af de parametre, som dokumenterbart har indflydelse på rekruttering af torsk, er torskens reproduktive volumen (MacKenzie et al., 1996; Heikinheimo, 2008; Plikshs et al., 2015). Det reproduktive volumen beregnes som det vandvolumen, hvor ilt koncentrationen $> 2 \text{ ml/L}$, temperaturen $> 1,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ - $< 14 \text{ }^{\circ}\text{C}$ og saltholdigheden $> 11 \text{ ‰}$. Dette volumen bliver i dag brugt som indikator i f.eks ICES og Copernicus.

5 Økologisk påvirkning af Østersøen

5.1 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 antaget klimaændringer i afsnit 4.3)

Den regionale model anvendes til at beskrive den kumulative effekt af den frem-skudte færgehavn ved Tårs og andre større infrastrukturprojekter, der er blevet undersøgt (Lynetteholmen) eller aktuelt bliver undersøgt (Østlig Ringvej, Kattegatforbindelsen og en fast forbindelse mellem Als og Fyn samt stormflodssikring af hovedstaden).

Det valgte klimascenarie kombineres ligeledes med modstanden fra den frem-skudte færgehavn ved Tårs og andre større infrastrukturer, der er blevet eller aktuelt bliver undersøgt.

5.2 HELCOM "Core indicators"

I nedenstående gennemgås de modellerede resultater i henhold til HELCOMs "Core indicators":

- Sommer (juni-sept) klorofylkoncentration (fytoplankton)
- vinter (dec - feb) DIN (opløst uorganisk kvælstof) koncentration
- vinter (dec - feb) DIP (opløst uorganisk fosfor) koncentration
- sigtdybde (vandets klarhed og gennemtrængelighed for sollys)

5.2.1 Sommer klorofylkoncentration

Sommer klorofylkoncentration er vist i Figur 5-1 (2019 uden forbindelser), Figur 5-2 (2019 med forbindelser), Figur 5-4 (2100 uden forbindelser) og Figur 5-5 (2100 med forbindelser), og ændringer i sommer klorofylkoncentration i Figur 5-

3 (2019 med og uden forbindelser), Figur 5-6 (2100 med og uden forbindelser) og Figur 5-7 (2019 og 2100 uden forbindelser).

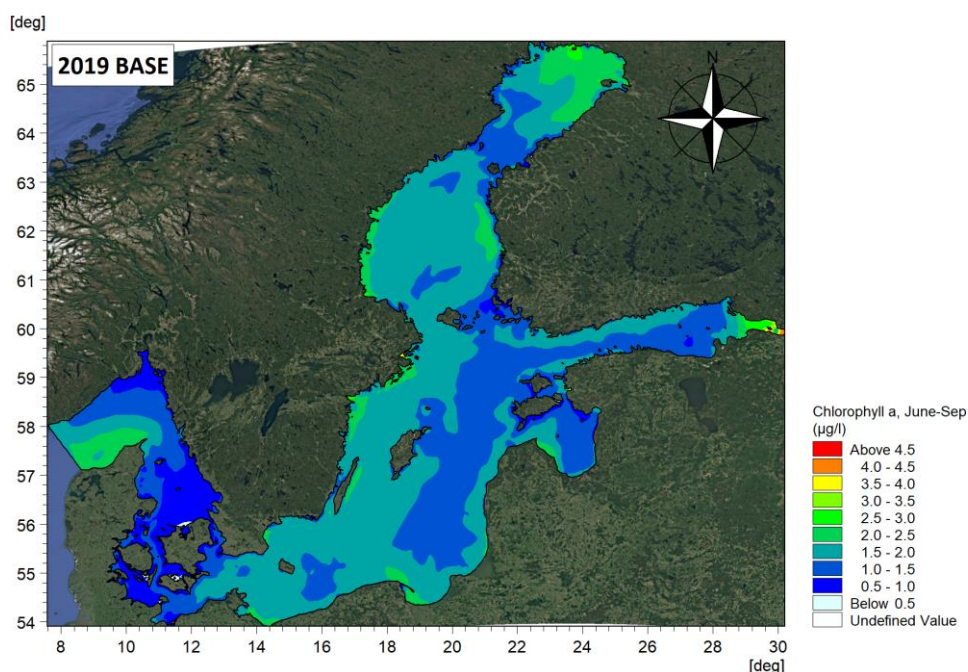
Der ses ved sammenligning af sommer klorofylkoncentration i 2019 med og uden forbindelser (Figur 5-1, Figur 5-2 og Figur 5-3) og sammenligning af sommer klorofyl-koncentration i 2100 med og uden forbindelser (Figur 5-4, Figur 5-5 og Figur 5-6), at ændringer i klorofylkoncentrationen pga. forbindelserne er $\pm 0,1 \mu\text{g/L}$.

Ændringen i sommer klorofylkoncentrationen pga. forbindelserne er således marginale og sporadiske, og skyldes forbindelsernes marginale og sporadiske påvirkning af hydrodynamikken, primært saltholdigheden.

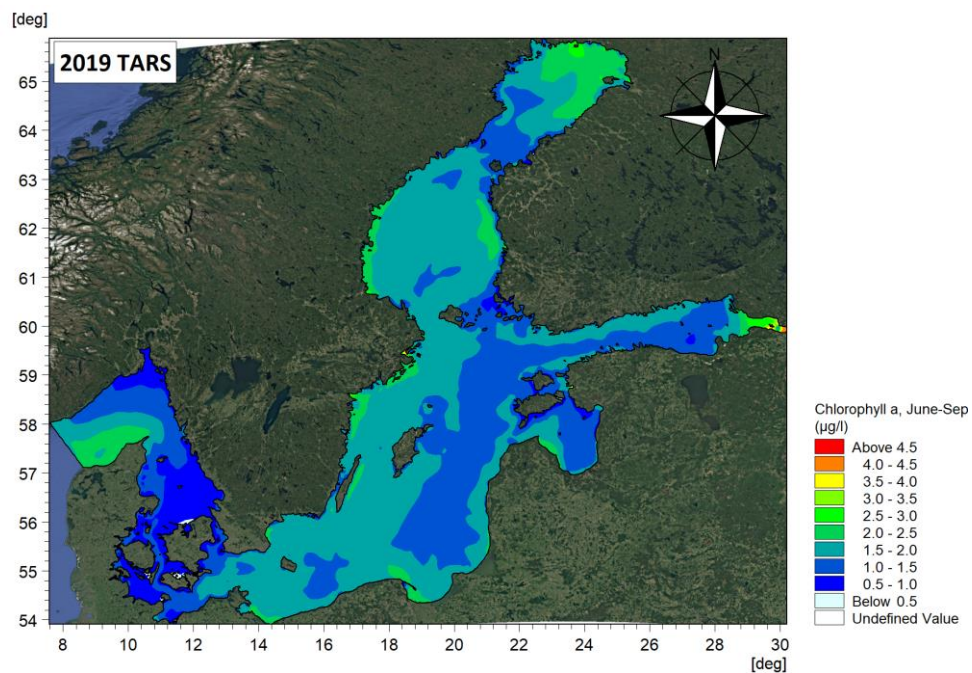
Ændringen i sommer klorofylkoncentrationen pga. klimaændringer er vist i Figur 5-7, og viser en øgning i sommer klorofylkoncentrationen på $+0,1-0,5 \mu\text{g/L}$ i hele Østersøen. I Skagerrak ses en reduktion i sommer klorofylkoncentrationen ($-0,1-0,5 \mu\text{g/L}$), pga. øget vandstand og indstrømning fra Nordsøen.

Af Tabel 5-1 ses ændring i middel sommer klorofylkoncentration i juni-september 2019, opgjort for sub-bassinerne "Kattegat", "Arkona Bassinet", "Bornholmer Bassinet" og "Østlige Gotlands Bassin" pga. forbindelser og klimaændringer, i forhold til 2019 uden forbindelser. Der ses en ændring på $-0,01 \mu\text{g/l}$ pga. forbindelser, og ændringer på $+0,03 - +0,19 \mu\text{g/l}$ pga. klimaændringer på basin-skala.

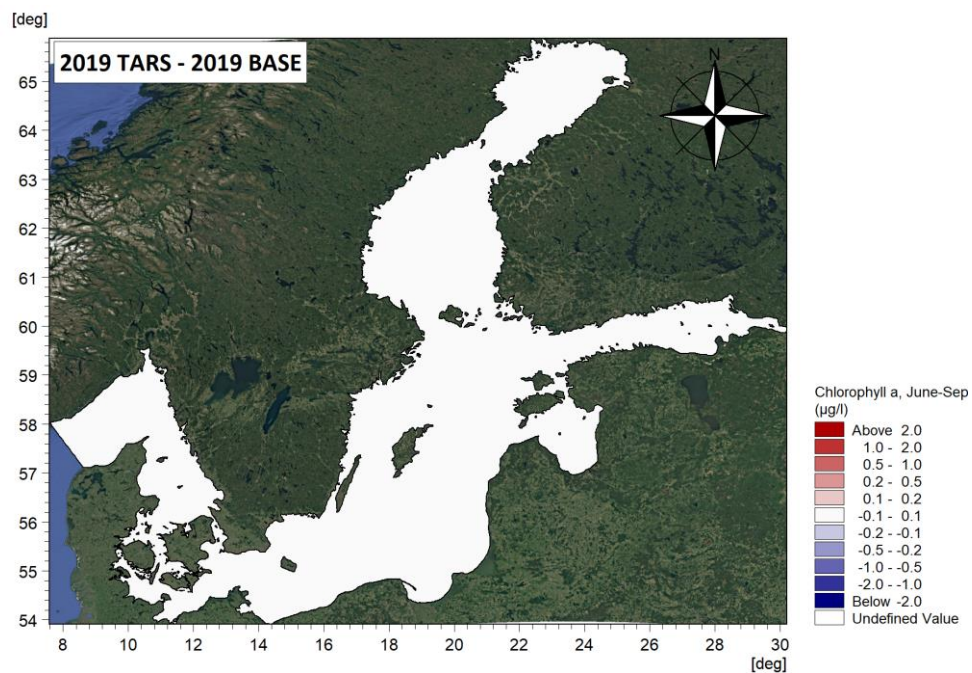
Ændringerne i sommer klorofylkoncentrationer skyldes øget temperatur samt øget afstrømning og tilhørende N og P tilførsler ved klimascenariet (jf. afsnit 3.5) og den derved øgede pelagiske primærproduktion.



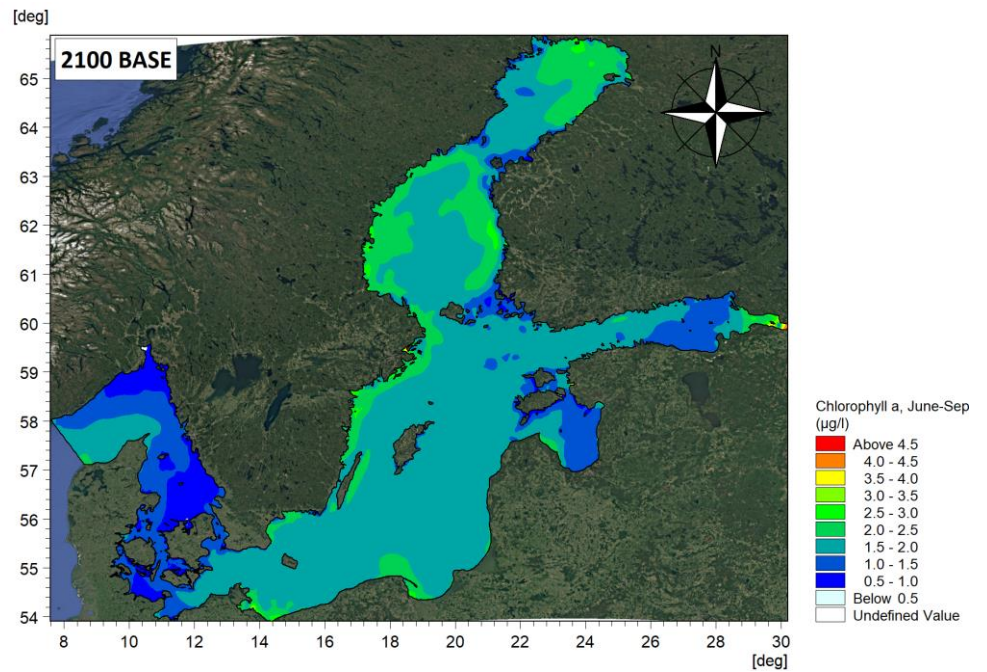
Figur 5-1 Middel klorofylkoncentration i juni-september 2019 uden forbindelser.



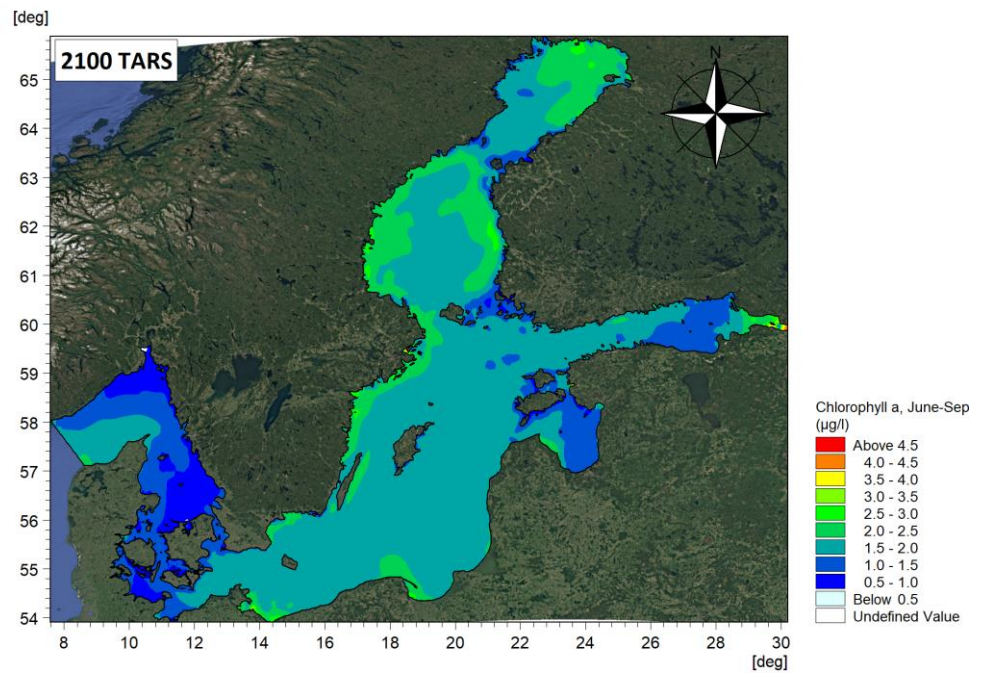
Figur 5-2 Middel klorofylkoncentration i juni-september i 2019 med forbindelser.



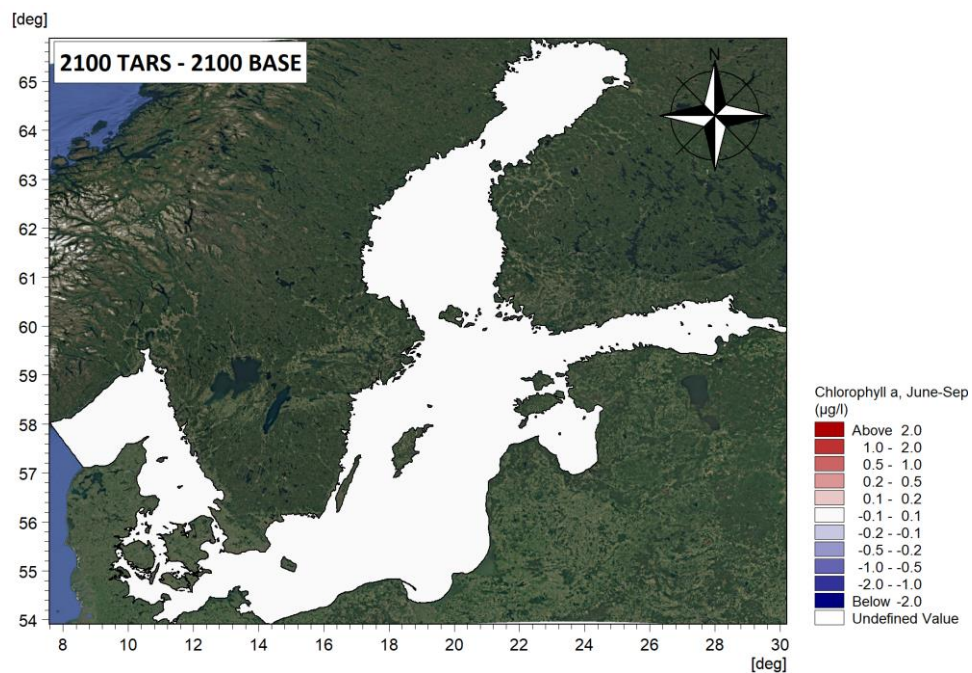
Figur 5-3 Ændring i middel klorofylkoncentration i juni-september 2019 med og uden forbindelser (med forbindelser minus uden forbindelser).



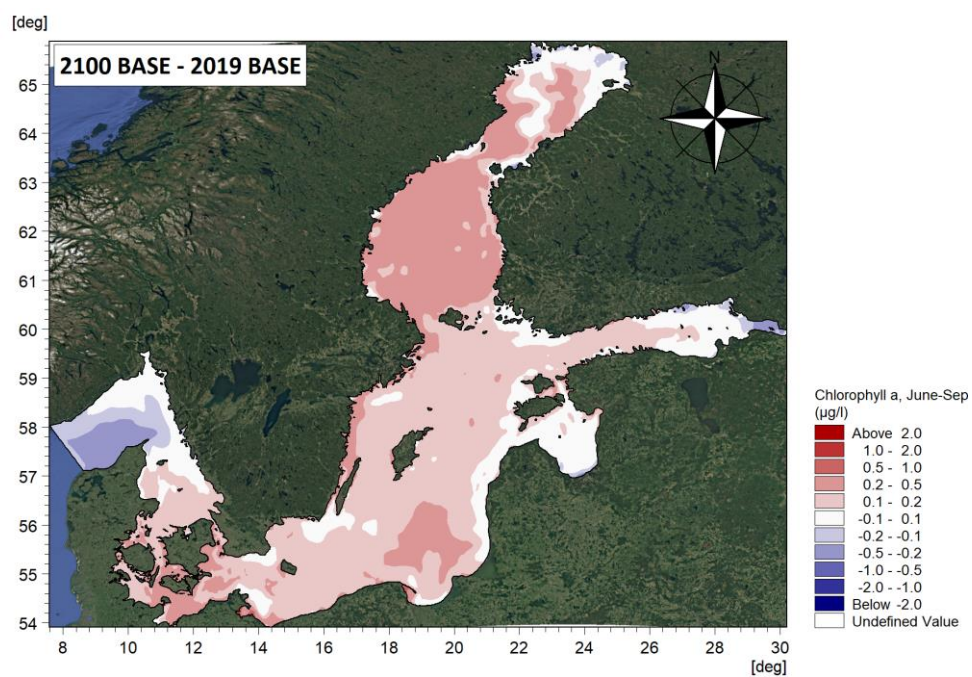
Figur 5-4 Middel klorofylkoncentration i juni-september i 2100 uden forbindelser.



Figur 5-5 Middel klorofylkoncentration i juni-september i 2100 med forbindelser.



Figur 5-6 Ændring i middel klorofylkoncentration i juni-september 2100 med og uden forbindelser (med forbindelser minus uden forbindelser).



Figur 5-7 Ændring i middel klorofylkoncentration i juni-september 2019 uden forbindelser og 2100 uden forbindelser (2100 minus 2019).

Tabel 5-1 Ændring i middel sommer klorofylkoncentration ($\mu\text{g/l}$) i juni-september 2019, samt nuværende (jf. Tabel 4-2) og "ny" beregnet statusværdi i parentes for sub-bassin "Kattegat", "Arkona Bassinet", "Bornholmer Bassinet" og "Østlige Gotlands Bassin" ved 2019 med forb., 2100 uden forb., 2100 med forb., 2100 uden forb. test* og 2100 med forb. test, i forhold til 2019 uden forbindelser (+ angiver øgning i klorofylkoncentration).

Østersø Model	Kattegat	Arkona Bassinet	Bornholmer Bassinet	Østlige Gotlands Bassin
2019 med forb.	-0,01 (1,39/1,38)	-0,01 (2,29/2,28)	0,00 (2,37/2,37)	-0,01 (2,99/2,98)
2100 uden forb.	+0,08 (1,39/1,47)	+0,19 (2,29/2,48)	+0,14 (2,37/2,51)	+0,16 (2,99/3,15)
2100 med forb.	+0,07 (1,39/1,46)	+0,18 (2,29/2,47)	+0,14 (2,37/2,51)	+0,15 (2,99/3,14)
2100 uden forb. Test	+0,04 (1,39/1,43)	+0,13 (2,29/2,42)	+0,09 (2,37/2,46)	+0,12 (2,99/3,11)
2100 med forb. Test	+0,03 (1,39/1,42)	+0,13 (2,29/2,42)	+0,09 (2,37/2,46)	+0,11 (2,99/3,10)

*test refererer til sensitivitetstesten beskrevet i afsnit 4.4.

5.2.2 Vinter DIN koncentration

Vinter DIN koncentrationen er vist i Figur 5-8 (2019 uden forbindelser), Figur 5-9 (2019 med forbindelser), Figur 5-11 (2100 uden forbindelser) og Figur 5-12 (2100 med forbindelser), og ændringer i vinter DIN koncentrationen i Figur 5-10 (2019 med og uden forbindelser), Figur 5-13 (2100 med og uden forbindelser) og Figur 5-14 (2019 og 2100 uden forbindelser).

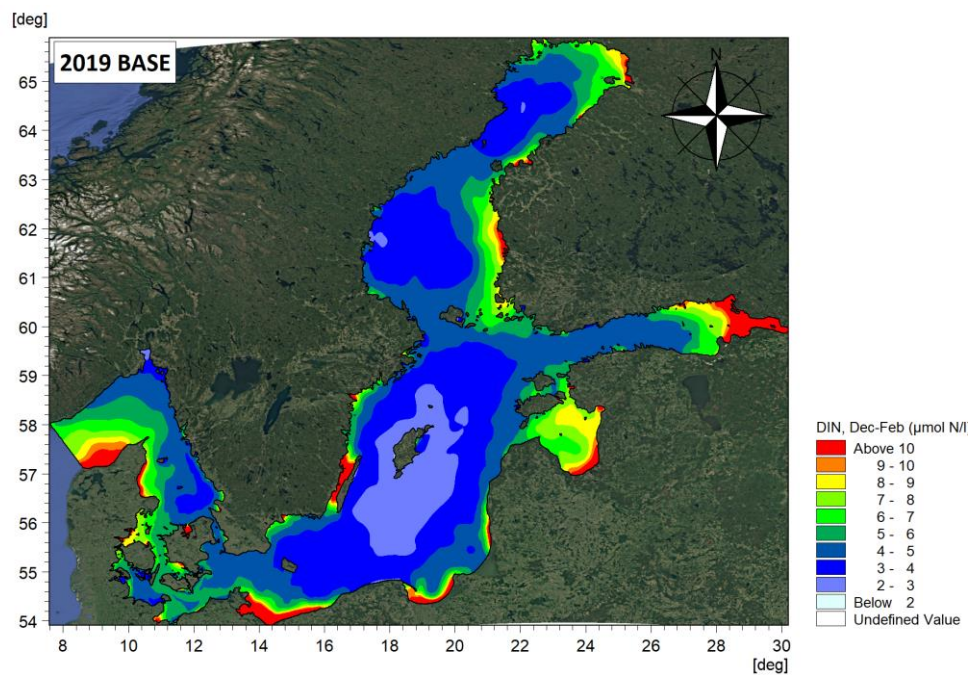
Der ses ved sammenligning af vinter DIN koncentrationen i 2019 med og uden forbindelser (Figur 5-8, Figur 5-9 og Figur 5-10) og sammenligning af vinter DIN koncentrationen i 2100 med og uden forbindelser (Figur 5-11, Figur 5-12 og Figur 5-13), at ændringer i DIN koncentrationen pga. forbindelserne er $< \pm 0,5 \mu\text{mol/L}$.

Ændringen i vinter DIN koncentrationen pga. forbindelserne er således marginale og sporadiske, og skyldes forbindelsernes marginale og sporadiske påvirkning af hydrodynamikken, primært saltholdigheden.

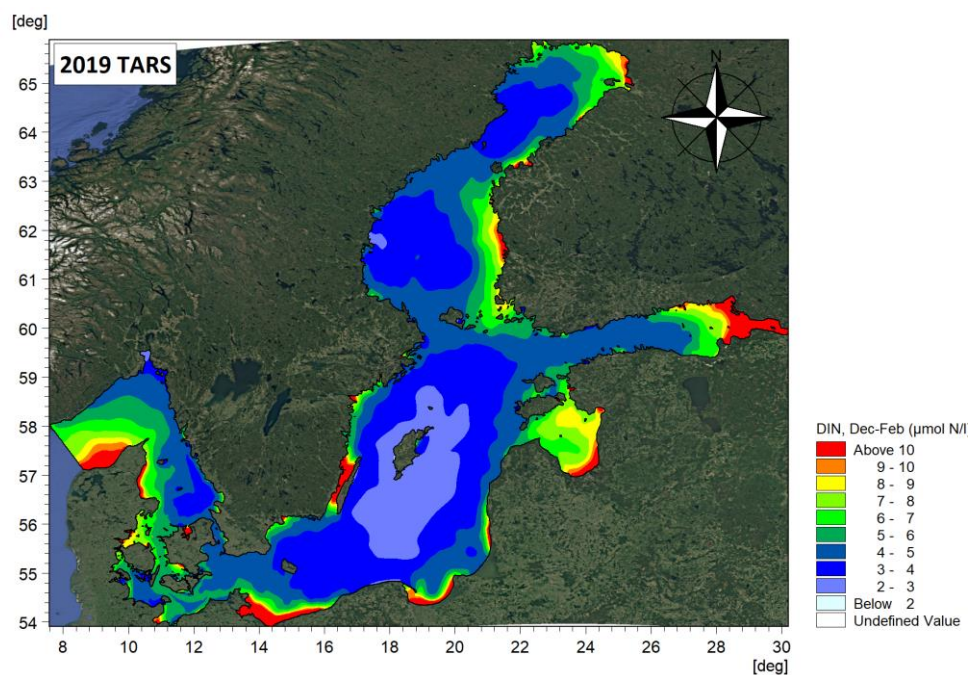
Ændringen i vinter DIN koncentrationen pga. klimaændringer er vist i Figur 5-14, og viser en øgning i vinter DIN koncentrationen på $+ 0,5-4,0 \mu\text{mol/L}$ i hele Østersøen. I Skagerrak ses ingen øgning i vinter DIN koncentrationen pga. øget indstrømning fra Nordsøen.

Af Tabel 5-2 ses ændring i middel vinter DIN koncentration ($\mu\text{mol/L}$) i december-februar 2019, opgjort for sub-bassinerne "Kattegat", "Arkona Bassinet", "Bornholmer Bassinet" og "Østlige Gotlands Bassin" pga. forbindelser og klimaændringer, i forhold til 2019 uden forbindelser. Der ses en ændring på $-0,03 - -0,06$ pga. forbindelser, og ændringer på $+1,54 - +3,55 \mu\text{mol/L}$ pga. klimaændringer.

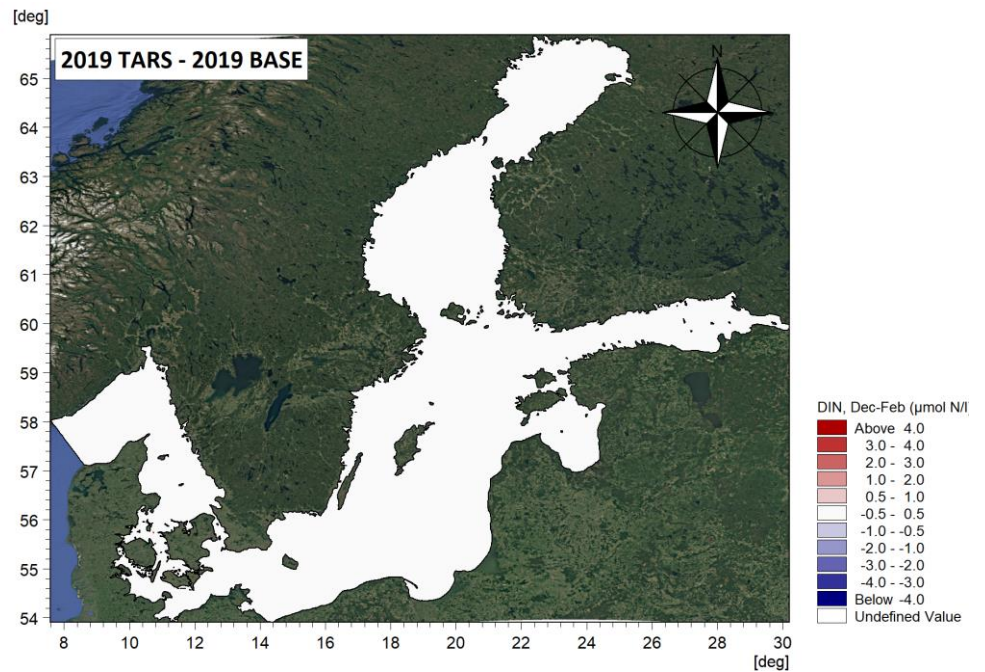
Ændringerne i vinter DIN koncentrationer pga. klimaændringer skyldes hovedsageligt øget afstrømning og N tilførsler (jf. afsnit 3.5).



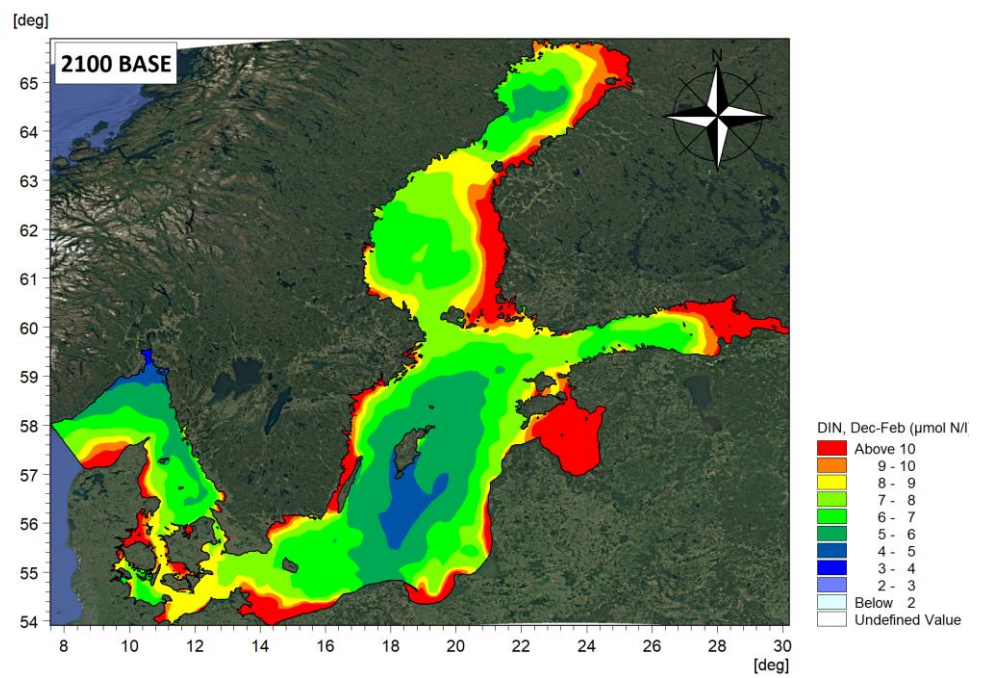
Figur 5-8 Middel DIN koncentration i december-februar 2019 uden forbindelser.



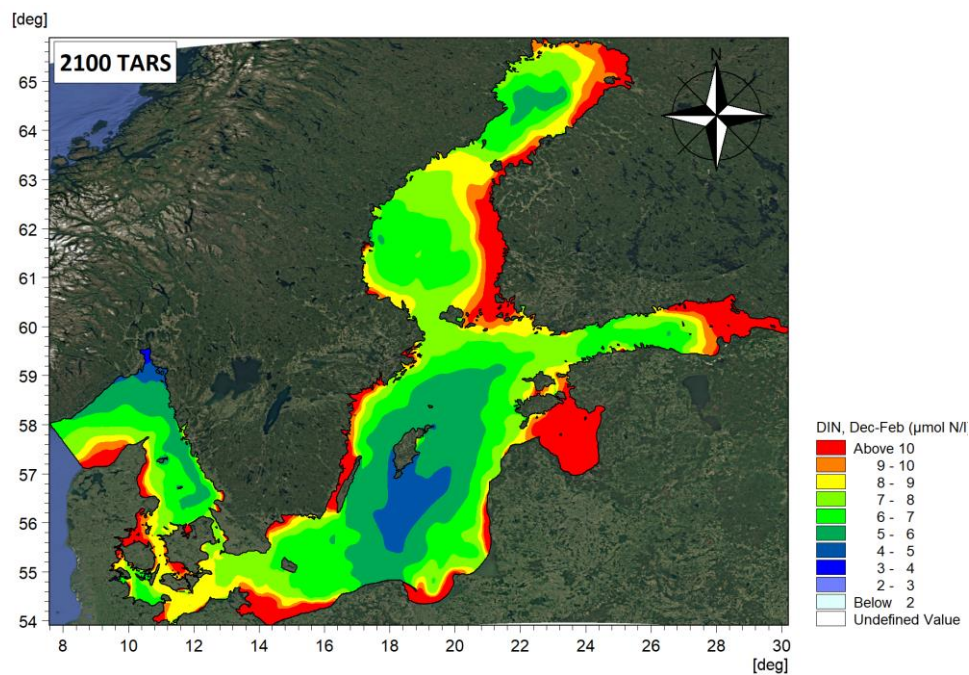
Figur 5-9 Middel DIN koncentration i december-februar 2019 med forbindelser.



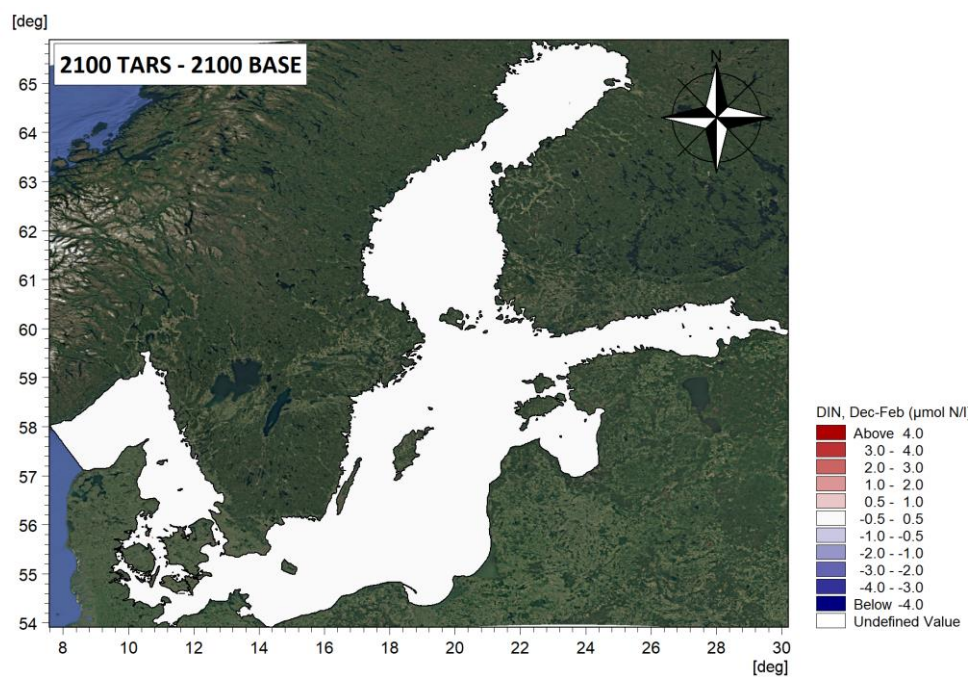
Figur 5-10 Ændring i middel DIN koncentration i december-februar 2019 med og uden forbindelser (med forbindelser minus uden forbindelser).



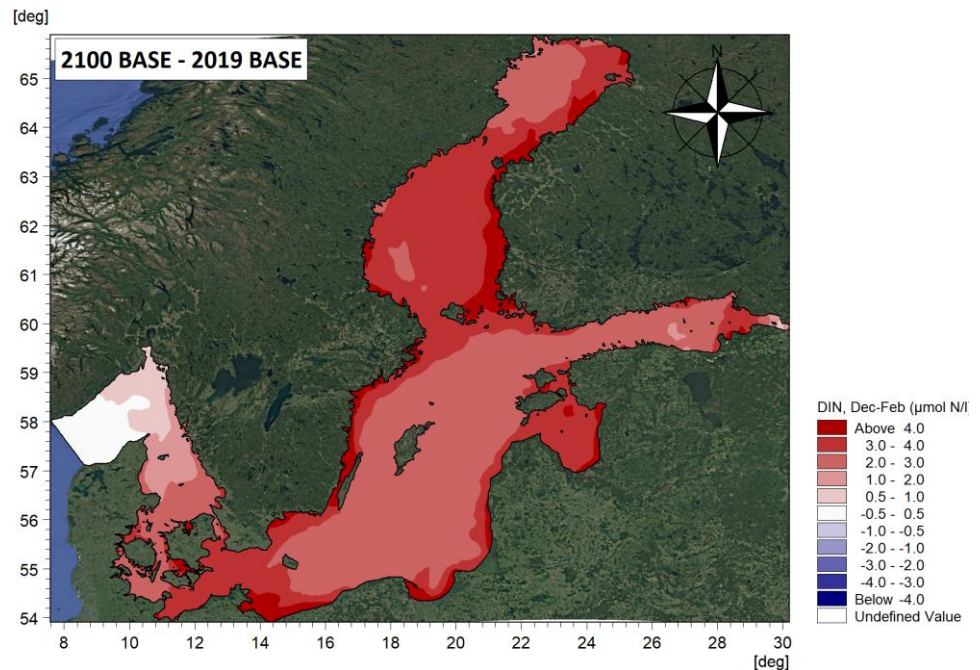
Figur 5-11 Middel DIN koncentration i december-februar 2100 uden forbindelser.



Figur 5-12 Middel DIN koncentration i december-februar 2100 med forbindelser.



Figur 5-13 Ændring i middel DIN koncentration i december-februar 2100 med og uden forbindelser (med forbindelser minus uden forbindelser).



Figur 5-14 Ændring i middel DIN koncentration i december-februar 2019 uden forbindelser og 2100 uden forbindelser (2100 minus 2019).

Tabel 5-2 Ændring i middel vinter DIN koncentration ($\mu\text{mol/l}$) i december-februar 2019, samt nuværende (jf. Tabel 4-2) og "ny" beregnet statusværdi (i parentes) for sub-bassin "Kattegat", "Arkona Bassinet", "Bornholmer Bassinet" og "Østlige Gotlands Bassin" ved 2019 med forb., 2100 uden forb., 2100 med forb., 2100 uden forb. test og 2100 med forb. test, i forhold til 2019 uden forbindelser (+ angiver øgning i DIN koncentration).

Østersø Model	Kattegat	Arkona Bassinet	Bornholmer Bassinet	Østlige Gotlands Bassin
2019 med forb.	-0,03 (5,26/5,23)	-0,04 (3,8/3,76)	-0,02 (4,16/4,14)	-0,06 (4,20/4,14)
2100 uden forb.	+2,02 (5,26/7,28)	+3,55 (3,8/7,35)	+3,22 (4,16/7,38)	+2,63 (4,20/6,83)
2100 med forb.	+1,98 (5,26/7,24)	+3,48 (3,8/7,28)	+3,17 (4,16/7,33)	+2,52 (4,20/6,72)
2100 uden forb. test	+1,59 (5,26/6,85)	+3,05 (3,8/6,85)	+2,77 (4,16/6,93)	+2,34 (4,20/6,54)
2100 med forb. test	+1,54 (5,26/6,80)	+2,98 (3,8/6,78)	+2,73 (4,16/6,89)	+2,24 (4,20/6,44)

5.2.3 Vinter DIP koncentration

Vinter DIP koncentrationen er vist i Figur 5-15 (2019 uden forbindelser), Figur 5-16 (2019 med forbindelser), Figur 5-18 (2100 uden forbindelser) og Figur 5-19 (2100 med forbindelser), og ændringer i vinter DIP koncentrationen i Figur 5-17 (2019 med og uden forbindelser), Figur 5-20 (2100 med og uden forbindelser) og Figur 5-21 (2019 og 2100 uden forbindelser).

Der ses ved sammenligning af vinter DIP koncentrationen i 2019 med og uden forbindelser (Figur 5-15, Figur 5-16 og Figur 5-17) og sammenligning af vinter DIP koncentrationen i 2100 med og uden forbindelser (Figur 5-18, Figur 5-19 og

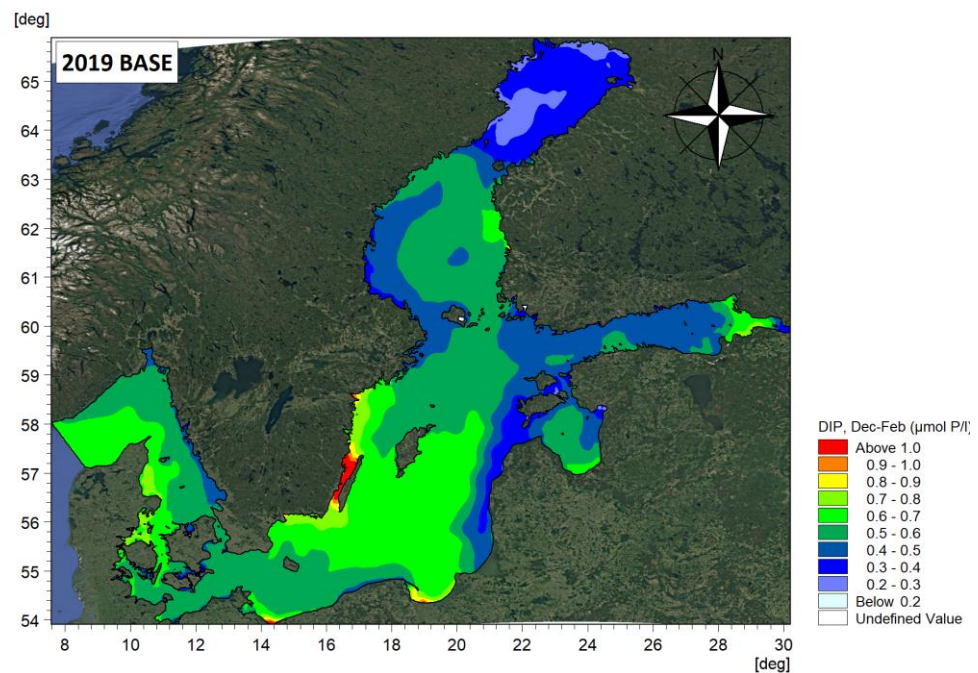
Figur 5-20), at ændringer i DIP koncentrationen pga. forbindelserne er $< \pm 0,05 \mu\text{mol/L}$.

Ændringen i vinter DIP koncentrationen pga. forbindelserne er således marginale og sporadiske, og skyldes forbindelsernes marginale og sporadiske påvirkning af hydrodynamikken, primært saltholdigheden.

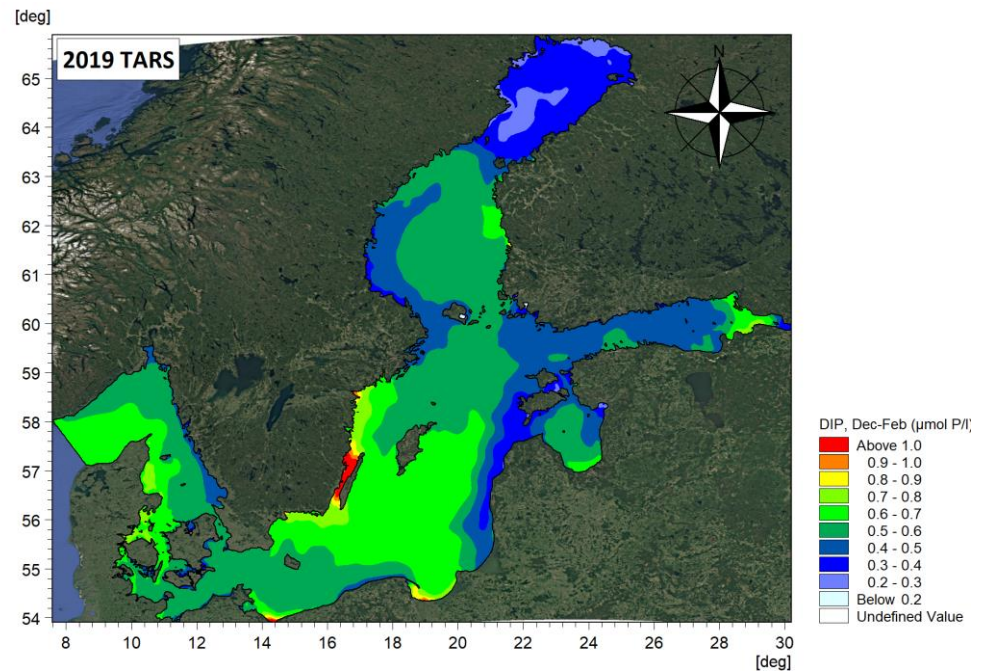
Ændringen i vinter DIP koncentrationen pga. klimaændringer er vist i Figur 5-21, og viser en øgning i vinter DIP koncentrationen på $+ 0,05 - 0,4 \mu\text{mol/L}$ i hele Østersøen. I Skagerrak ses ingen øgning i vinter DIP koncentrationen pga. øget indstrømning fra Nordsøen.

Af Tabel 5-1 ses ændring i middel vinter DIP koncentration ($\mu\text{mol/L}$) i december-februar 2019, opgjort for sub-bassinerne "Kattegat", "Arkona Bassinet", "Bornholmer Bassinet" og "Østlige Gotlands Bassin" pga. forbindelser og klimaændringer, i forhold til 2019 uden forbindelser. Der ses en ændring på $< 0,00 \mu\text{mol/L}$ pga. forbindelser, og ændringer på $0,2 - 0,4 \mu\text{mol/L}$ pga. klimaændringer.

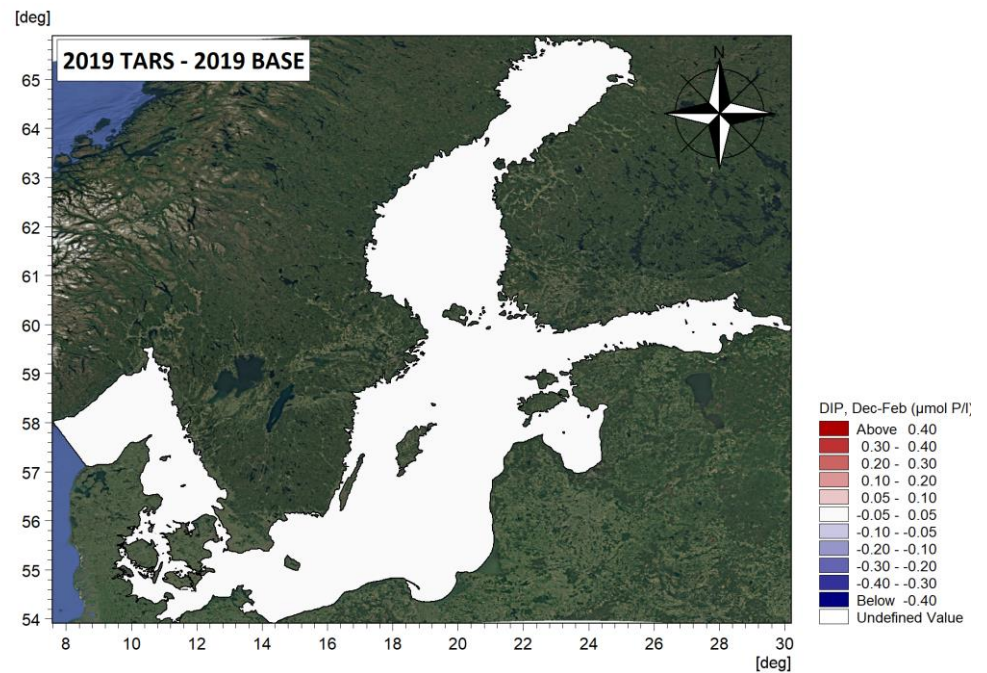
Ændringerne i vinter DIP koncentrationer skyldes overvejende øget afstrømning og P tilførsler ved klimascenariet (jf. afsnit 3.5).



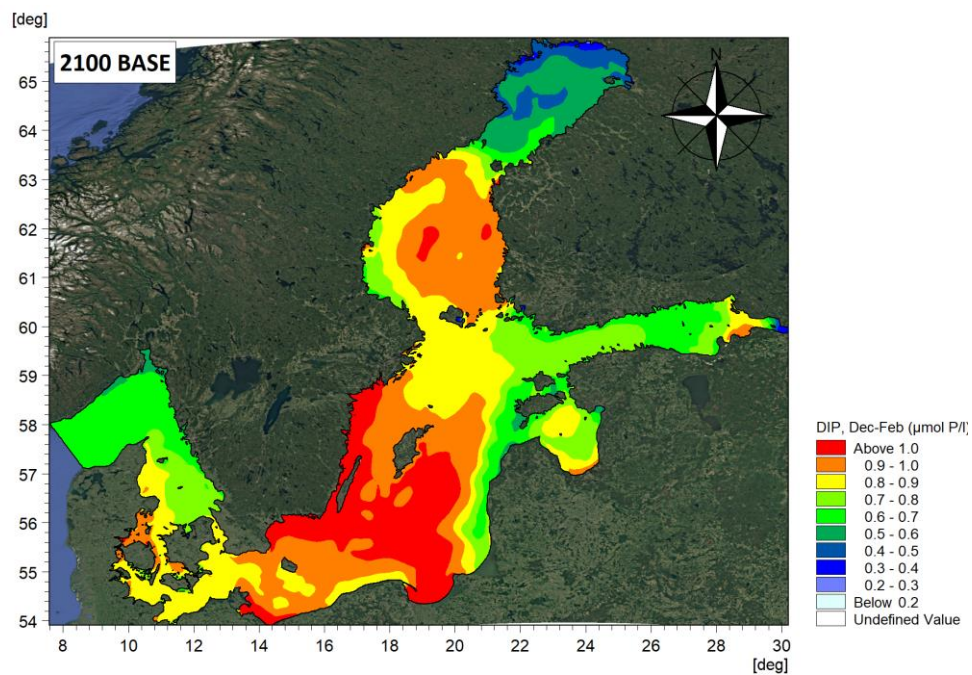
Figur 5-15 Middel DIP koncentration i december-februar 2019 uden forbindelser.



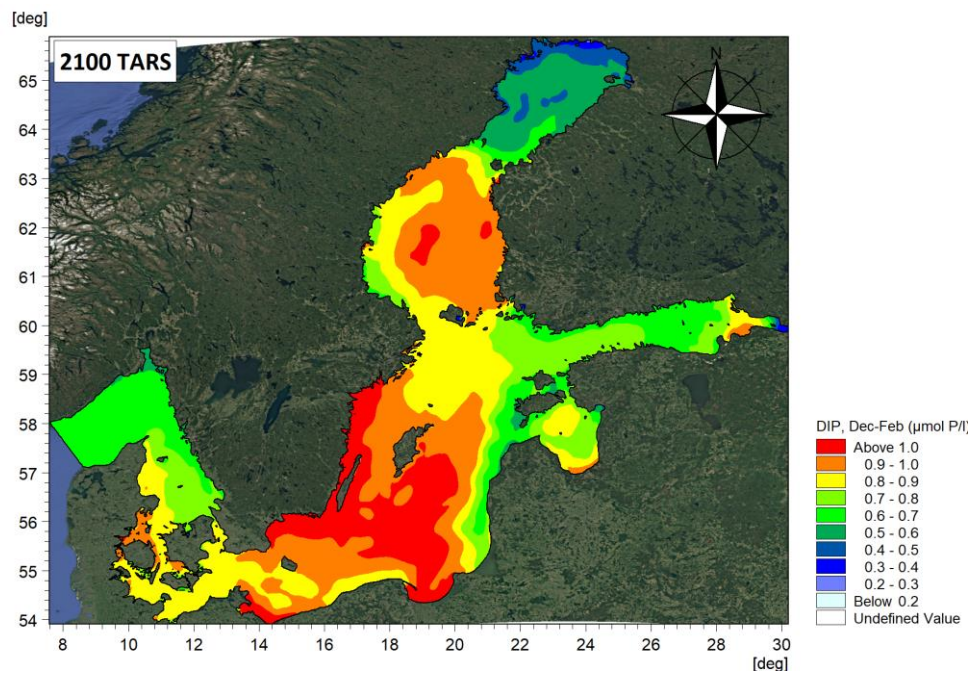
Figur 5-16 Middel DIP koncentration i december-februar 2019 med forbindelser.



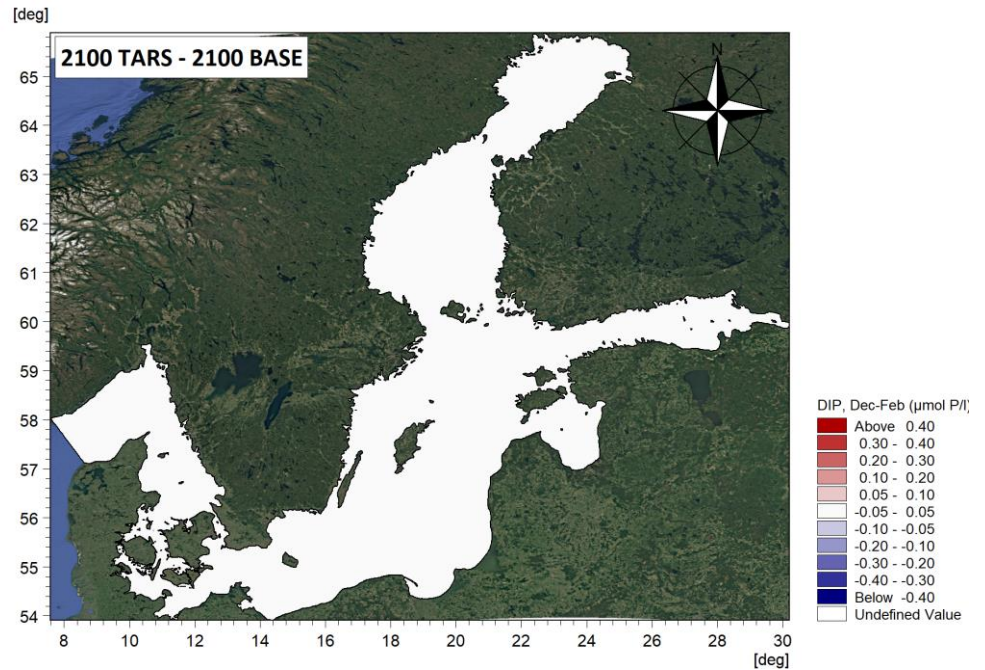
Figur 5-17 Ændring i middel DIP koncentration i december-februar 2019 med og uden forbindelser (med forbindelser minus uden forbindelser).



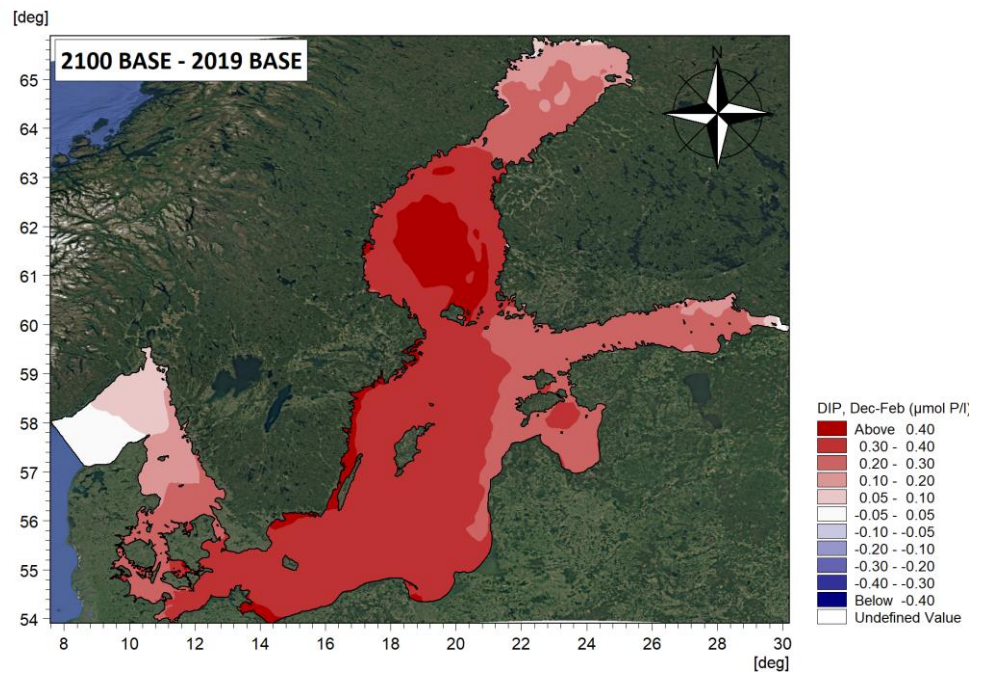
Figur 5-18 Middel DIP koncentration i december-februar 2100 uden forbindelser.



Figur 5-19 Middel DIP koncentration i december-februar 2100 med forbindelser.



Figur 5-20 Ændring i middel DIP koncentration i december-februar 2100 med og uden forbindelser (med forbindelser minus uden forbindelser).



Figur 5-21 Ændring i middel DIP koncentration i december-februar 2019 uden forbindelser og 2100 uden forbindelser (2100 minus 2019).

Tabel 5-3 Ændring i middel vinter DIP koncentration ($\mu\text{mol/l}$) i december-februar 2019, samt nuværende (jf. Tabel 4-2) og "ny" beregnet statusværdi i parentes for sub-bassin "Kattegat", "Arkona Bassinet", "Bornholmer Bassinet" og "Østlige Gotlands Bassin" ved 2019 med forb., 2100 uden forb., 2100 med forb., 2100 uden forb. test og 2100 med forb. test, i forhold til 2019 uden forbindelser (+ angiver øgning i DIN koncentration).

Østersø Model	Kattegat	Arkona Bassinet	Bornholmer Bassinet	Østlige Gotlands Bassin
2019 med forb.	0,00 (0,52/0,52)	0,00 (0,6/0,6)	0,00 (0,71/0,71)	0,00 (0,67/0,67)
2100 uden forb.	+0,19 (0,52/0,71)	+0,36 (0,6/0,96)	+0,36 (0,71/1,07)	+0,33 (0,67/1,00)
2100 med forb.	+0,18 (0,52/0,70)	+0,35 (0,6/0,95)	+0,36 (0,71/1,07)	+0,33 (0,67/1,00)
2100 uden forb. test	+0,17 (0,52/0,69)	+0,34 (0,6/0,94)	+0,35 (0,71/1,06)	+0,32 (0,67/0,99)
2100 med forb. test	+0,17 (0,52/0,69)	+0,33 (0,6/0,9,3)	+0,34 (0,71/1,05)	+0,32 (0,67/0,99)

5.2.4 Sigtdybde

Sigtdybde er vist i Figur 5-22 (2019 uden forbindelser), Figur 5-23 (2019 med forbindelser), Figur 5-25 (2100 uden forbindelser) og Figur 5-26 (2100 med forbindelser), og ændringer i sigtdybde i Figur 5-24 (2019 med og uden forbindelser), Figur 5-27 (2100 med og uden forbindelser) og Figur 5-28 (2019 og 2100 uden forbindelser).

Der ses ved sammenligning af sigtdybde i 2019 med og uden forbindelser (Figur 5-22, Figur 5-23 og Figur 5-24) og sammenligning af sigtdybde i 2100 med og uden forbindelser (Figur 5-25, Figur 5-26 og Figur 5-27), at ændringer i sigtdybden pga. forbindelserne er generelt $\pm 0,1$ m, med sporadiske ændringer op til $+ 0,2$ m i Vestlige Østersø.

Ændringen i sigtdybden pga. forbindelserne er således marginale og sporadiske, og skyldes forbindelsernes marginale og sporadiske påvirkning af sommer klorofylkoncentrationen, foranlediget af de marginale ændringer i hydrodynamikken, primært saltholdigheden.

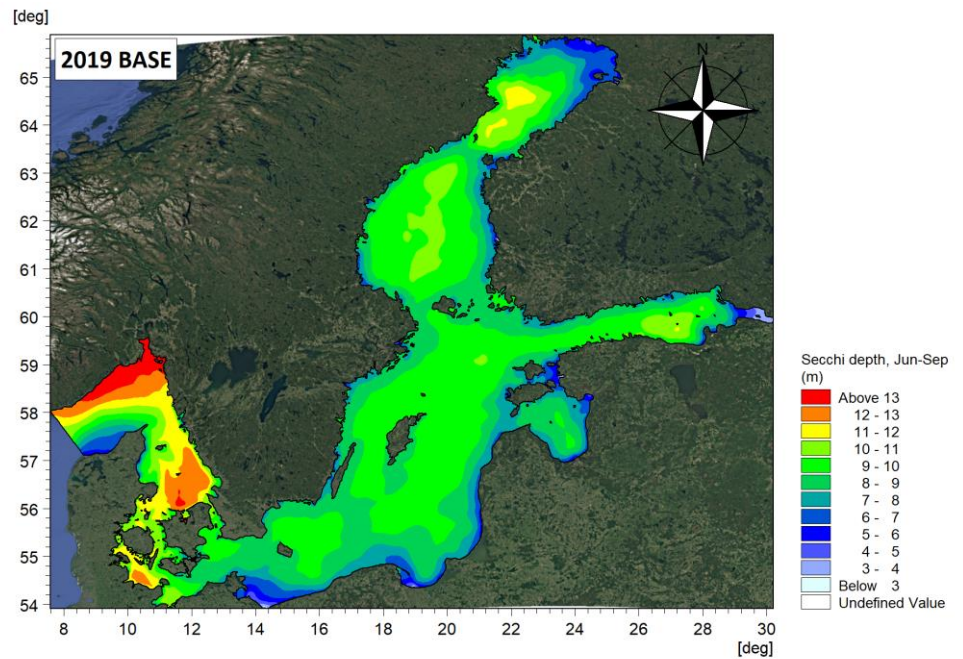
Ændringen i sigtdybden pga. klimaændringer er vist i Figur 5-28, og viser et fald i sigtdybde i indre Østersø ($-0,5$ - $-1,0$ m), og et lidt større sporadisk fald i Bælthavet ($-1,0$ - $-2,0$ m). I Skagerrak ses en øgning i sigtdybde ($+0,1$ - $+0,5$ m), pga. øget vandstand og indstrømning fra Nordsøen.

Af Tabel 5-4 ses ændring i middel sigtdybde i juni-september 2019, opgjort for sub-bassinerne "Kattegat", "Arkona Bassinet", "Bornholmer Bassinet" og "Østlige Gotlands Bassin" pga. forbindelser og klimaændringer i forhold til 2019 uden forbindelser. Der ses ingen ændring pga. forbindelser, men ændringer på $-0,5$ - $-0,8$ m pga. klimaændringer.

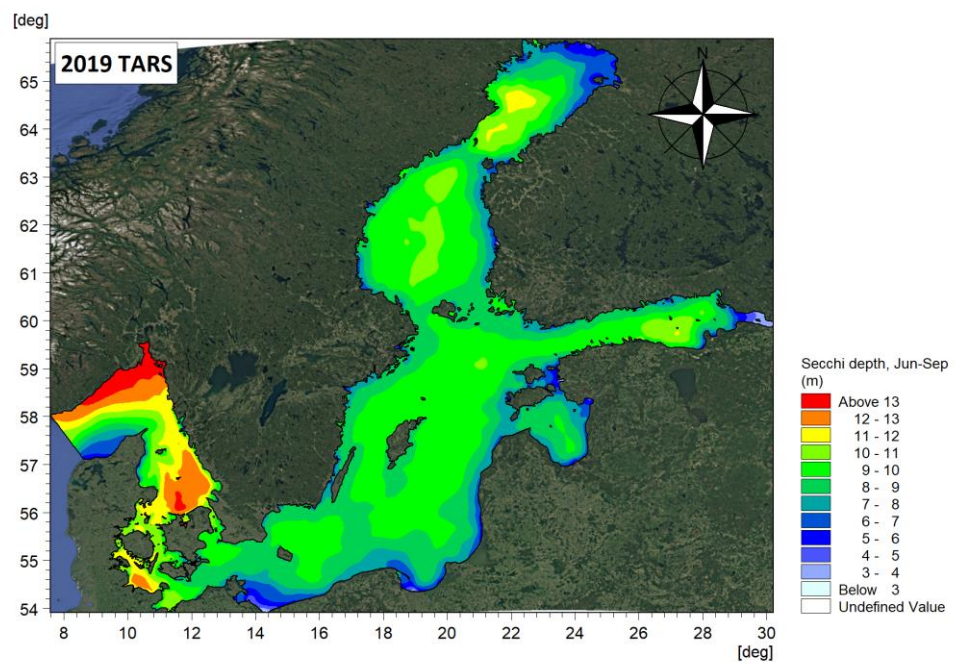
Ændringerne i sigtdybde skyldes overvejende øget afstrømning samt N og P tilførsler og øget temperatur ved klimascenarierne (jf. afsnit 3.5) og den derved øgede pelagiske primærproduktion samt øget tilførsel af partikulært og opløst

organisk kulstof fra oplandet, der tilsammen giver øget lyssvækkelse i vandsøjlen.

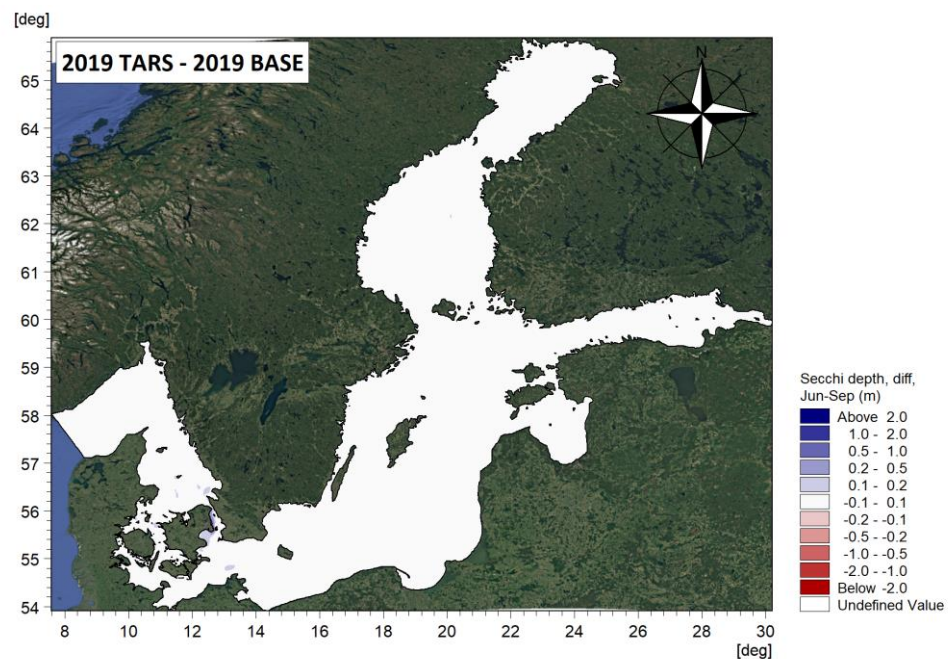
Ændringen i sigtdybde forårsaget af henholdsvis forbindelserne og klimaændringer er modsatrettet og ændringerne er en størrelsesorden større for klimaændringerne end for forbindelserne.



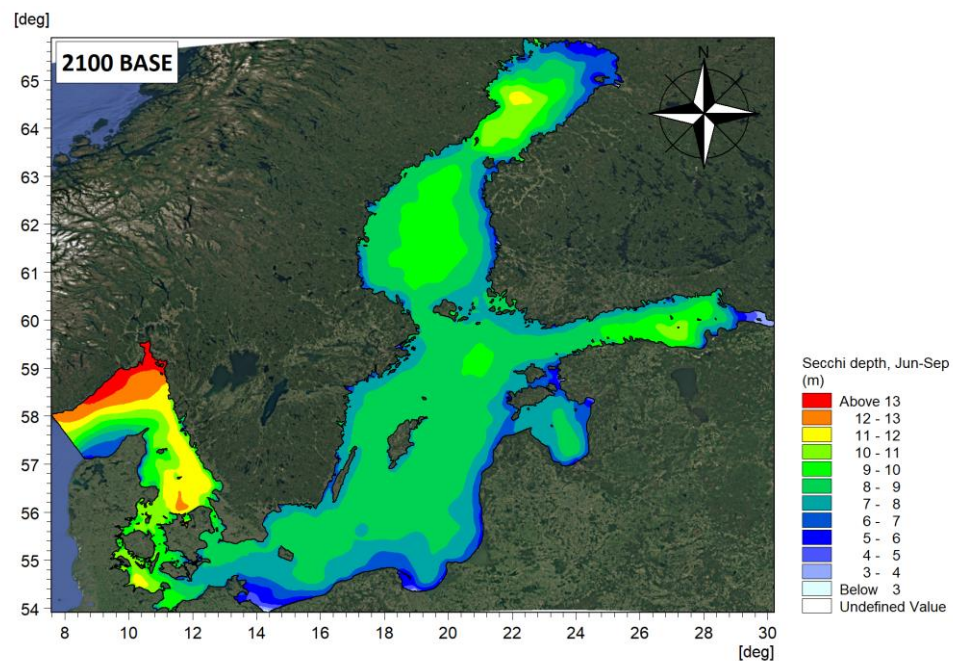
Figur 5-22 Middel sigtdybde i juni-september 2019 uden forbindelser.



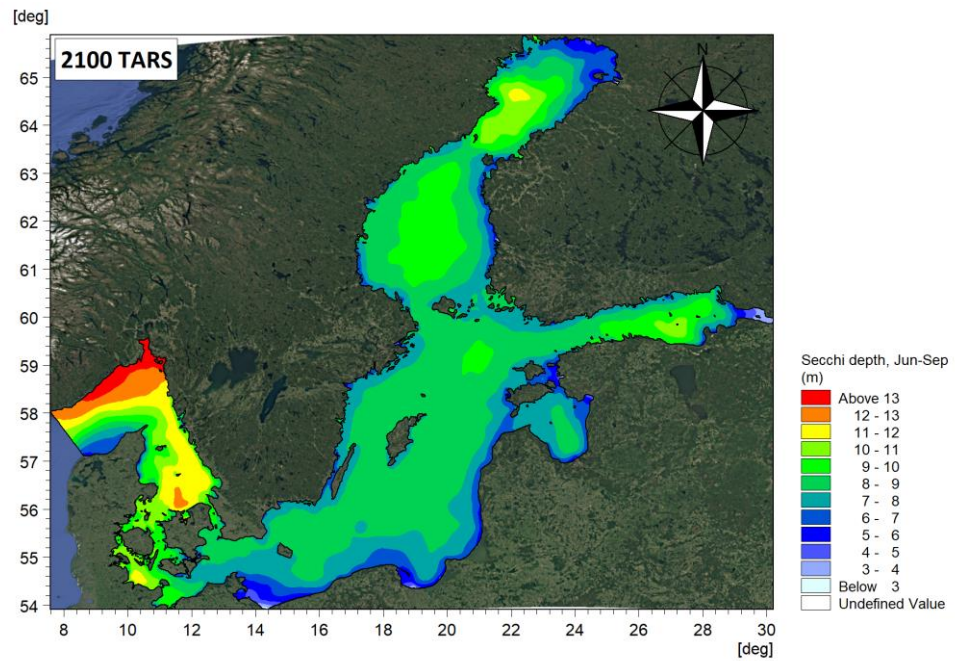
Figur 5-23 Middel sigtdybde i juni-september i 2019 med forbindelser.



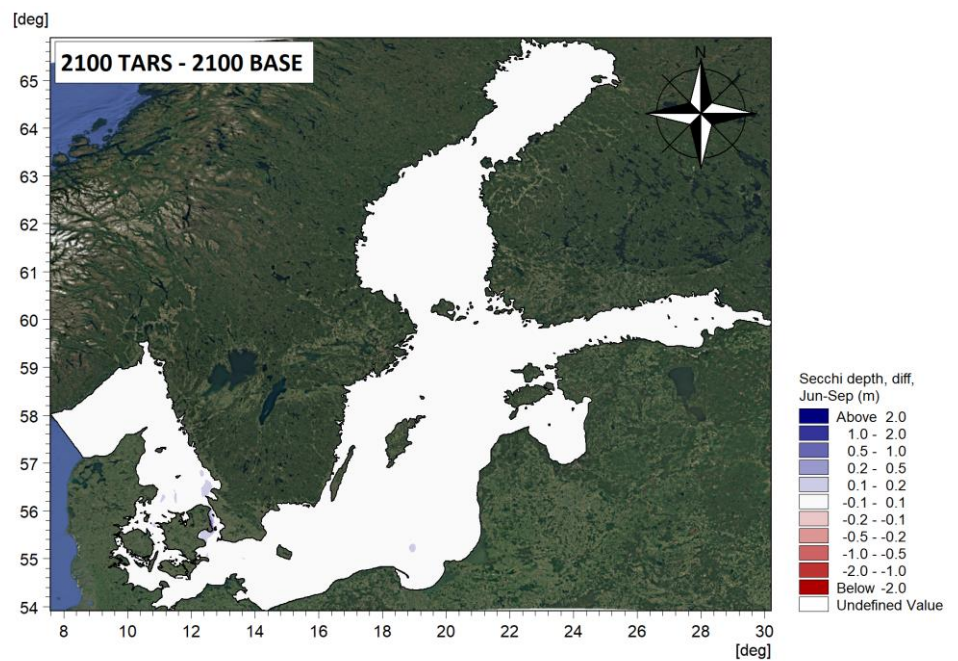
Figur 5-24 Ændring i middel sigtdybde i juni-september, 2019 med og uden forbindelser (med forbindelser minus uden forbindelser).



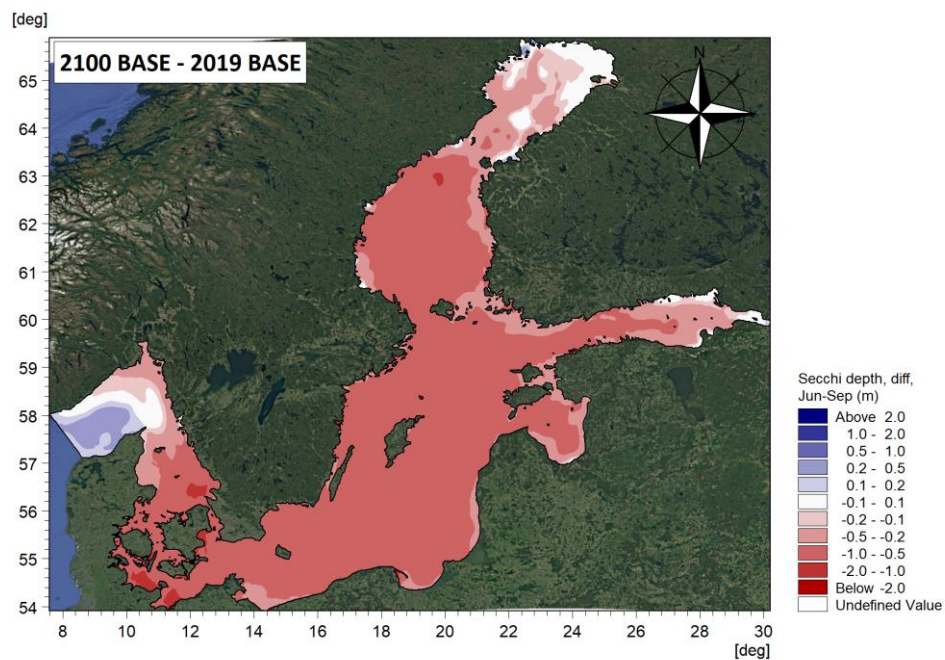
Figur 5-25 Middel sigtdybde i juni-september i 2100 uden forbindelser.



Figur 5-26 Middel sigtddybe i juni-september i 2100 med forbindelser.



Figur 5-27 Ændring i middel sigtddybe i juni-september 2100 med og uden forbindelser (med forbindelser minus uden forbindelser).



Figur 5-28 Ændring i middel sigtdybde i juni-september, 2019 uden forbindelser og 2100 uden forbindelser (2100 minus 2019).

Tabel 5-4 Ændring i middel sigtdybde (m) i juni-september 2019, samt nuværende (jf. Tabel 4-2) og "ny" beregnet statusværdi i parentes for sub-bassin "Kattegat", "Arkona Bassinet", "Bornholmer Bassinet" og "Østlige Gotlands Bassin" ved 2019 med forb., 2100 uden forb., 2100 med forb., 2100 uden forb. test og 2100 med forb. test i forhold til 2019 uden forbindelser (- angiver reduktion i sigtdybde).

Østersø Model	Kattegat	Arkona Bassinet	Bornholmer Bassinet	Østlige Gotlands Bassin
2019 med forb.	0,0 (9,1/9,1)	0,0 (6,1/6,1)	0,0 (6,3/6,3)	0,0 (5,7/5,7)
2100 uden forb.	-0,6 (9,1/8,5)	-0,8 (6,1/5,3)	-0,8 (6,3/5,5)	-0,8 (5,7/4,9)
2100 med forb.	-0,6 (9,1/8,5)	-0,8 (6,1/5,3)	-0,7 (6,3/5,6)	-0,8 (5,7/4,9)
2100 uden forb. test	-0,5 (9,1/8,6)	-0,7 (6,1/5,4)	-0,7 (6,3/5,6)	-0,7 (5,7/5,0)
2100 med forb. test	-0,5 (9,1/8,6)	-0,7 (6,1/5,4)	-0,6 (6,3/5,7)	-0,7 (5,7/5,0)

5.3 Supplerende indikatorer

5.3.1 Ilt i bundvandet (iltsvind)

Iltforhold er vurderet iht. gældende standarder for iltsvind på: lavt iltindhold (4-6 mg/L), moderat iltsvind (2-4 mg/L) og kraftigt iltsvind (< 2 mg/L).

Modelleret ilt i bundvandet (iltsvind) er overordnet set som forventet fra målinger og litteraturen, se for eksempel Hansen, J.W. & Rytter, D. (2024) med udbredt ilt i bundvandet på lavt iltindhold 4-6 mg/L, moderat iltsvind (2-4 mg/L) og kraftigt iltsvind (< 2 mg/L), i alle dybere områder af Østersøen.

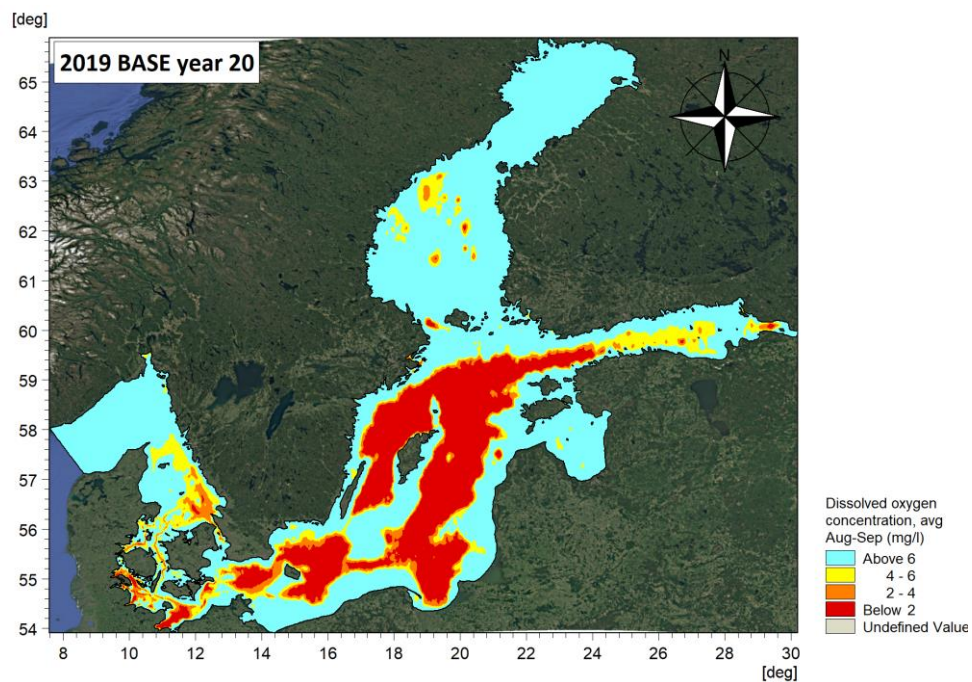
Ilt i bundvandet (iltsvind – august-september) er vist i Figur 5-29 (2019 uden forbindelser), Figur 5-30 (2019 med forbindelser), Figur 5-31 (2100 uden forbindelser) og Figur 5-32 (2100 med forbindelser).

Årlig variation, og ændringer pga. forbindelserne og klima, i iltforhold i bundvandet i HELCOM sub-bassin "Kattegat", "Arkona", "Bornholmer Bassinet" og "Østlige Gotlands Bassin" for 2019 med og uden forbindelser, 2100 med og uden forbindelser og 2019 og 2100 uden forbindelser er vist i Figur 5-33, Figur 5-34, Figur 5-35 og Figur 5-36.

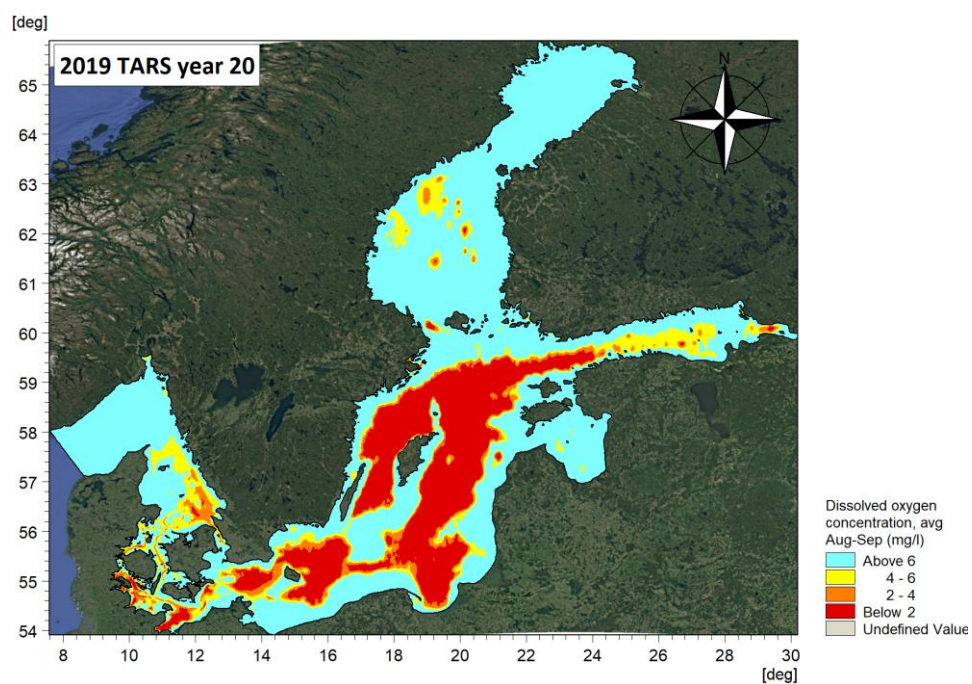
I alle bassiner er ændringen i ilt i bundvandet (iltsvind) pga. forbindelserne marginal, både under 2019 og 2100 forhold. I "Kattegat", "Arkona Bassinet", "Bornholmer Bassinet" og "Østlige Gotlands Bassin" medfører forbindelserne således en ændring på < ±1% i områder med ilt i bundvandet på < 6 mg/L, < 4 mg/L og < 2 mg/L (Tabel 5-5, Tabel 5-6, Tabel 5-7 og Tabel 5-8).

I alle bassiner er ændringen i ilt i bundvandet (iltsvind) pga. klimaændringer markant. I "Kattegat", "Arkona Bassinet", "Bornholmer Bassinet" og "Østlige Gotlands Bassin" medfører klimaændringer således en forøgelse af områder med iltsvind på hhv. 5-18%, 5-28% og 2-9% i områder med ilt i bundvandet på < 6 mg/L, < 4 mg/L og < 2 mg/L. De største forøgelser af områder med iltsvind ses i Arkona Bassinet.

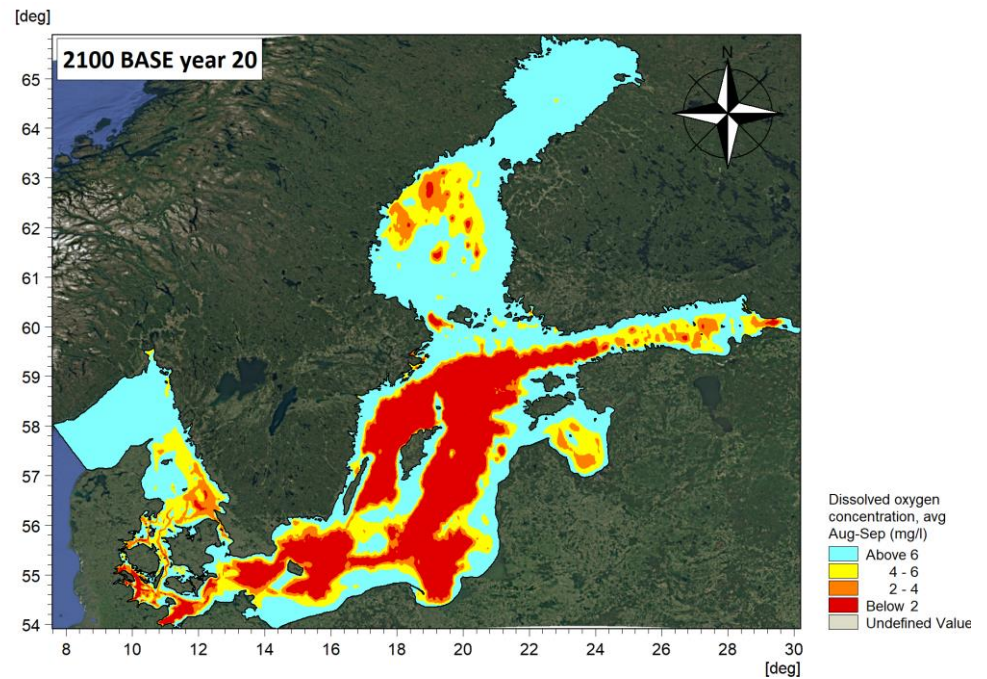
Ændringerne i ilt i bundvandet (iltsvind) skyldes primært øget vandtemperatur der resulterer i lavere iltmætning, øget pelagisk primærproduktion, øget sedimentation af dødt fytoplankton (organisk materiale) og øget bakteriel aktivitet i havbunden ved remineralisering af organisk materiale, hvilket medfører øget iltforbrug.



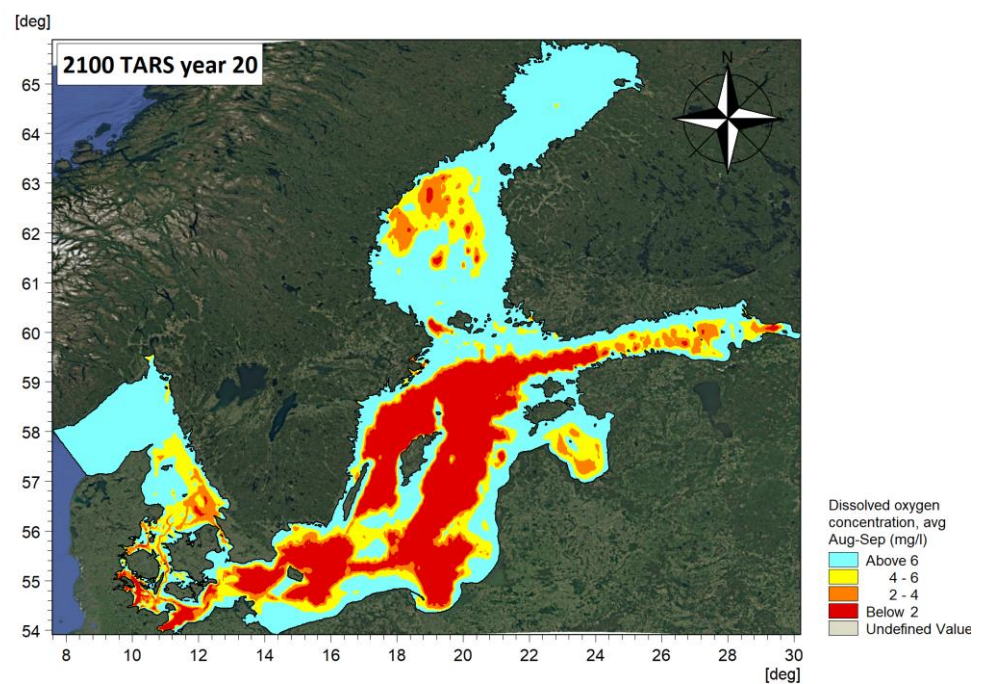
Figur 5-29 Iltsvind i 2019 uden forbindelser.



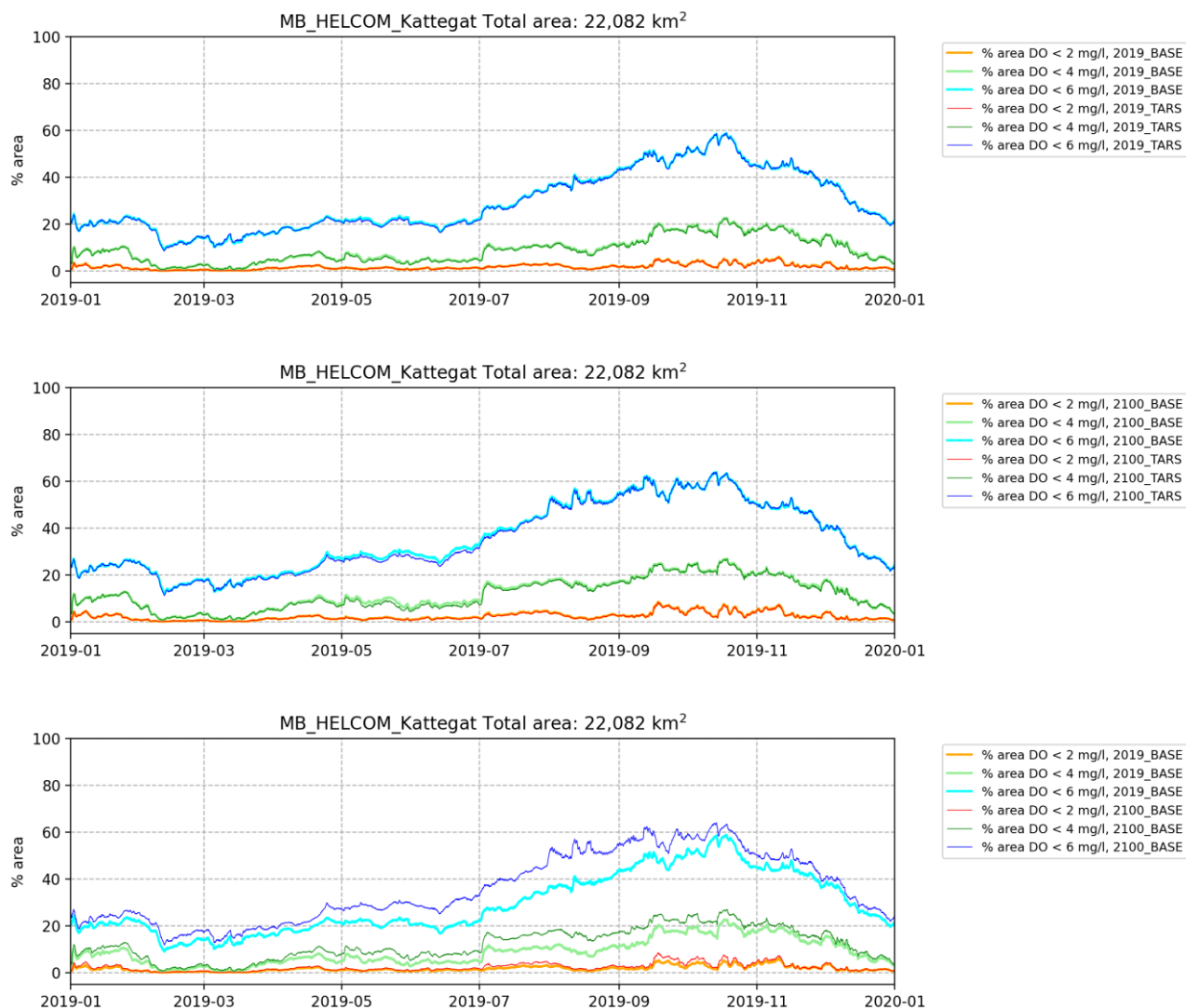
Figur 5-30 Iltsvind i 2019 med forbindelser.



Figur 5-31 Iltsvind i 2100 uden forbindelser.



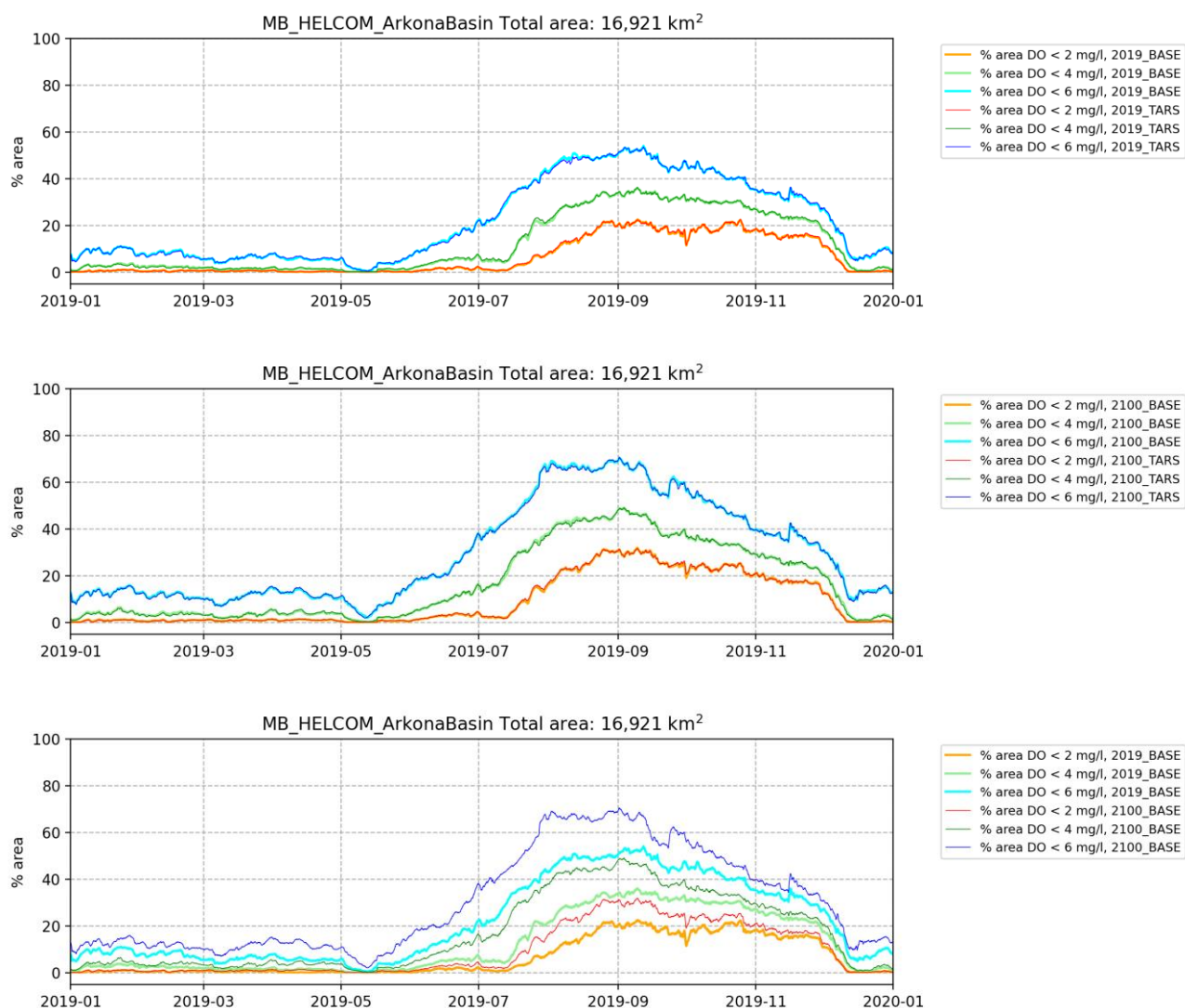
Figur 5-32 Iltsvind i 2100 med forbindelser.



Figur 5-33 Årlig udvikling og variation i iltvind i HELCOM sub-bassin "Kattegat". Øverst: 2019 med og uden forbindelser. Midten: 2100 med og uden forbindelser. Nederst: 2019 og 2100 uden forbindelser. Graferne angiver procent (%) af sub-bassinets samlede areal.

Tabel 5-5 Maksimal udbredelse af områder i HELCOM sub-bassin "Kattegat" med ilt i bundvandet på 4-6 mg/L, moderat iltvind (2-4 mg/L) og kraftigt iltvind (< 2 mg/L), ved 2019 og 2100 med og uden forbindelser opgjort i km² og procent (%) af sub-bassinets samlede areal.

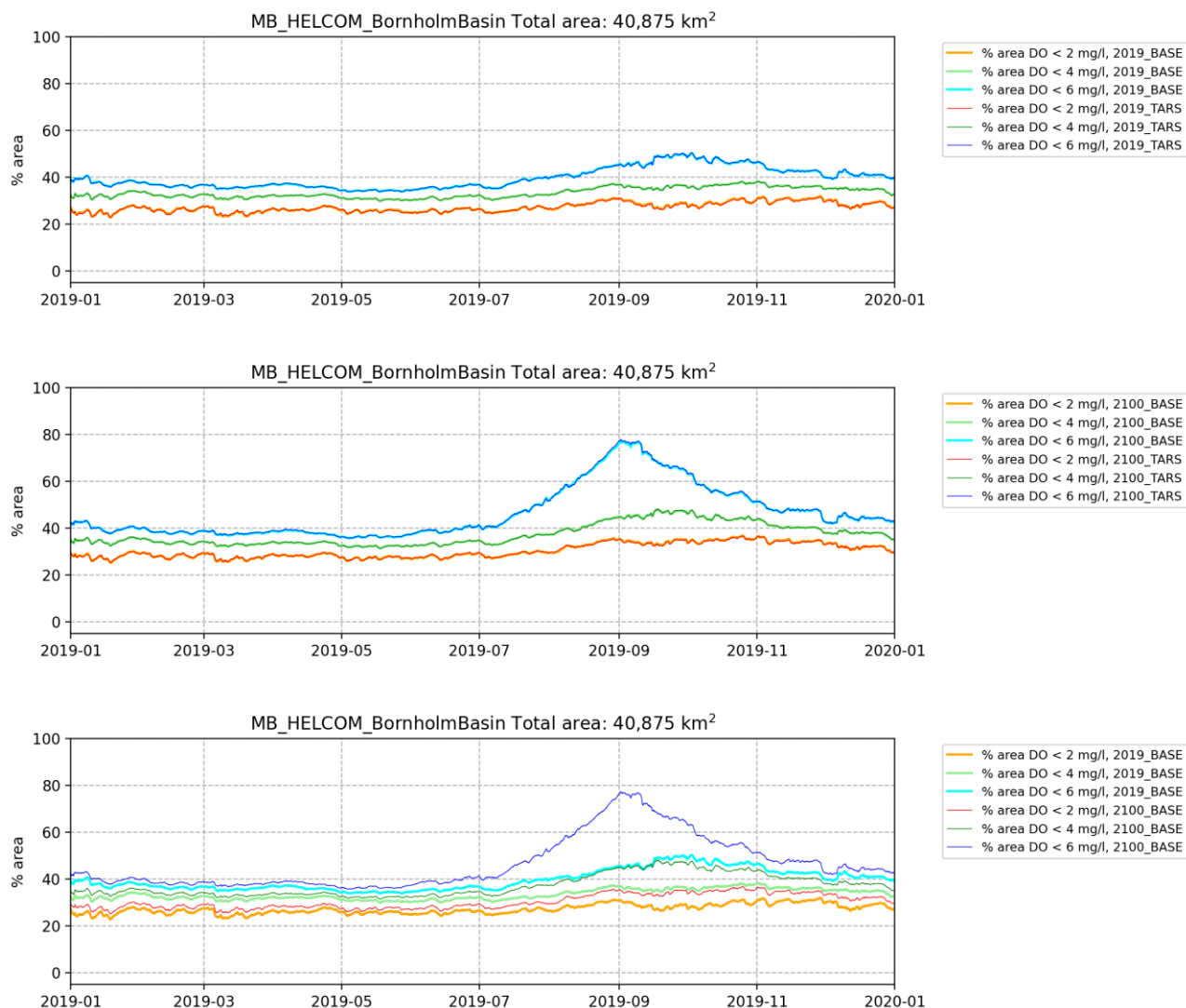
Østersø Model	Ilt < 6 mg/L (km²)	Ilt < 4 mg/L (km²)	Ilt < 2 mg/L (km²)
2019 uden forb.	12.975 (59%)	4.998 (23%)	1.321 (6%)
2019 med forb.	12.966 (59%)	4.921 (22%)	1.285 (6%)
2100 uden forb.	14.107 (64%)	5.928 (27%)	1.864 (8%)
2100 med forb.	14.084 (64%)	5.885 (27%)	1.820 (8%)
2100 uden forb. test	14.031 (64%)	5.845 (26%)	1.757 (8%)
2100 med forb. test	14.021 (63%)	5.794 (26%)	1.732 (8%)



Figur 5-34 Årlig udvikling og variation i iltsvind i HELCOM sub-bassin "Arkona Bassinet". Øverst: 2019 med og uden forbindelser. Midten: 2100 med og uden forbindelser. Nederst: 2019 og 2100 uden forbindelser. Graferne angiver procent (%) af sub-bassinets areal.

Tabel 5-6 Maksimal udbredelse af områder i HELCOM sub-bassin "Arkona Bassinet" med ilt i bundvandet på 4-6 mg/L, moderat iltsvind (2-4 mg/L) og kraftigt iltsvind (< 2 mg/L), ved 2019 og 2100 med og uden forbindelser opgjort i km² og procent (%) af sub-bassinets areal.

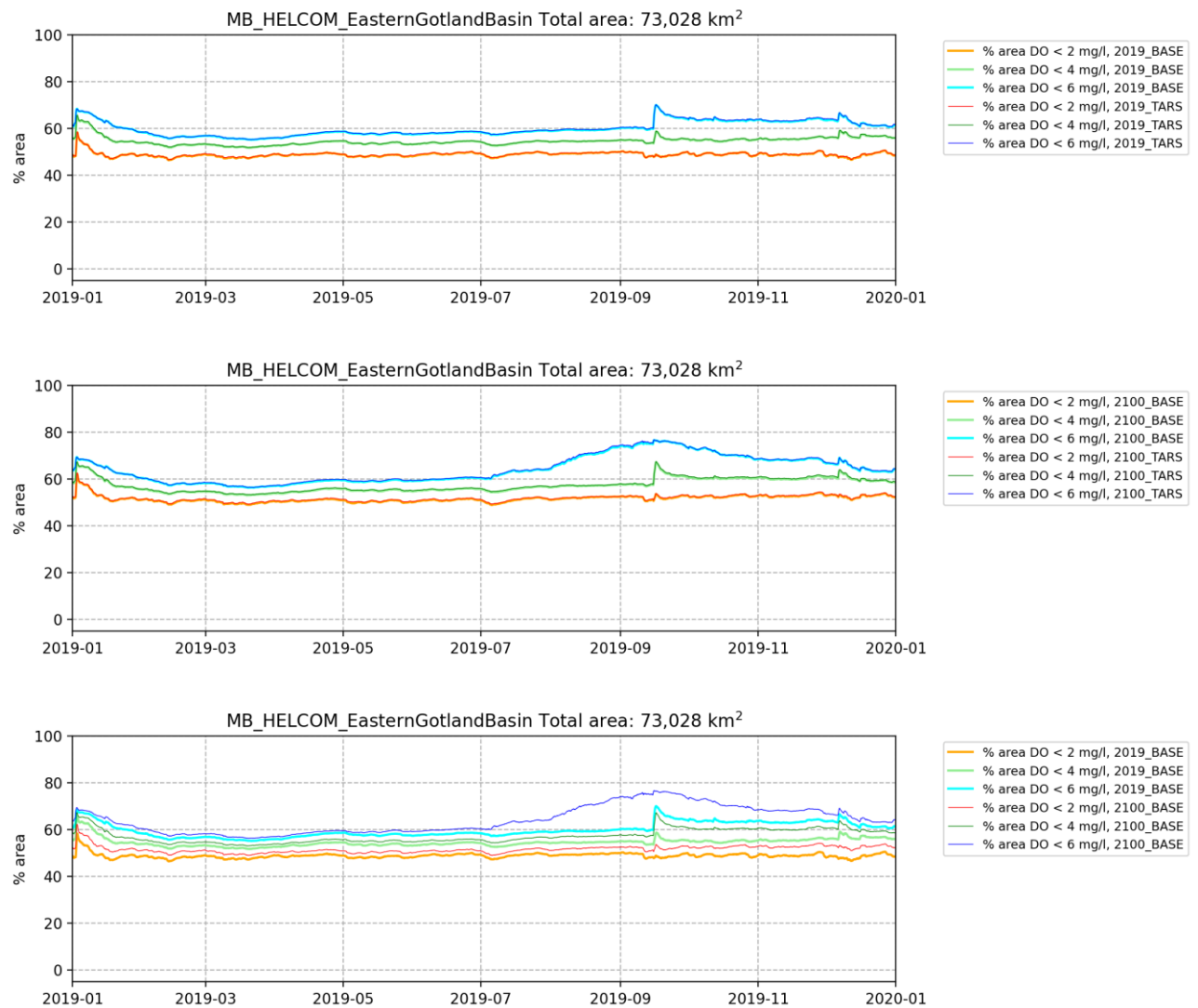
Østersø Model	Ilt < 6 mg/L (km ²)	Ilt < 4 mg/L (km ²)	Ilt < 2 mg/L (km ²)
2019 uden forb.	9.144 (54%)	6.106 (36%)	3.808 (23%)
2019 med forb.	9.051 (53%)	6.134 (36%)	3.820 (23%)
2100 uden forb.	11.916 (70%)	8.293 (49%)	5.396 (32%)
2100 med forb.	11.945 (71%)	8.288 (49%)	5.351 (32%)
2100 uden forb. test	11.745 (69%)	8.058 (48%)	5.231 (31%)
2100 med forb. test	11.773 (70%)	8.062 (48%)	5.203 (31%)



Figur 5-35 Årlig udvikling og variation i iltsvind i bundvandet i HELCOM sub-bassin "Bornholmer Bassinet". Øverst: 2019 med og uden forbindelser. Midten: 2100 med og uden forbindelser. Nederst: 2019 og 2100 uden forbindelser. Graferne angiver procent (%) af sub-bassins areal.

Tabel 5-7 Maksimal udbredelse af områder i HELCOM sub-bassin "Bornholmer Bassinet" med ilt i bundvandet på 4-6 mg/L, moderat iltsvind (2-4 mg/L) og kraftigt iltsvind (< 2 mg/L), ved 2019 og 2100 med og uden forbindelser opgjort i km² og procent (%) af sub-bassins areal.

Østersø Model	Ilt < 6 mg/L (km ²)	Ilt < 4 mg/L (km ²)	Ilt < 2 mg/L (km ²)
2019 uden forb.	20.516 (50%)	15.605 (38%)	13.032 (32%)
2019 med forb.	20.597 (50%)	15.586 (38%)	12.856 (31%)
2100 uden forb.	31.586 (77%)	19.632 (48%)	14.998 (37%)
2100 med forb.	31.805 (78%)	19.624 (48%)	14.967 (37%)
2100 uden forb. test	31.071 (76%)	19.181 (47%)	14.758 (36%)
2100 med forb. test	31.138 (76%)	19.092 (47%)	14.680 (36%)



Figur 5-36 Årlig udvikling og variation i iltvind i HELCOM sub-bassin "Østlige Gotlands Bassin". Øverst: 2019 med og uden forbindelser. Midten: 2100 med og uden forbindelser. Nederst: 2019 og 2100 uden forbindelser. Graferne angiver procent (%) af sub-bassinets areal.

Tabel 5-8 Maksimal udbredelse af områder i HELCOM sub-bassin "Østlige Gotlands Bassin" med ilt i bundvandet på 4-6 mg/L, moderat iltvind (2-4 mg/L) og kraftigt iltvind (< 2 mg/L), ved 2019 og 2100 med og uden forbindelser opgjort i km² og procent (%) af sub-bassinets areal.

Østersø Model	Ilt < 6 mg/L (km ²)	Ilt < 4 mg/L (km ²)	Ilt < 2 mg/L (km ²)
2019 uden forb.	51.090 (70%)	47.836 (66%)	42.473 (58%)
2019 med forb.	51.171 (70%)	47.865 (66%)	42.670 (58%)
2100 uden forb.	55.895 (77%)	49.082 (67%)	45.390 (62%)
2100 med forb.	55.998 (77%)	49.201 (67%)	45.693 (63%)
2100 uden forb. test	55.731 (76%)	49.047 (67%)	45.315 (62%)
2100 med forb. test	55.806 (76%)	49.090 (67%)	45.565 (62%)

5.3.2 Cyanobakterier

Årlig variation og ændringer i fytoplanktonsamfundet er vurderet iht. perioden med dominans af cyanobakterier.

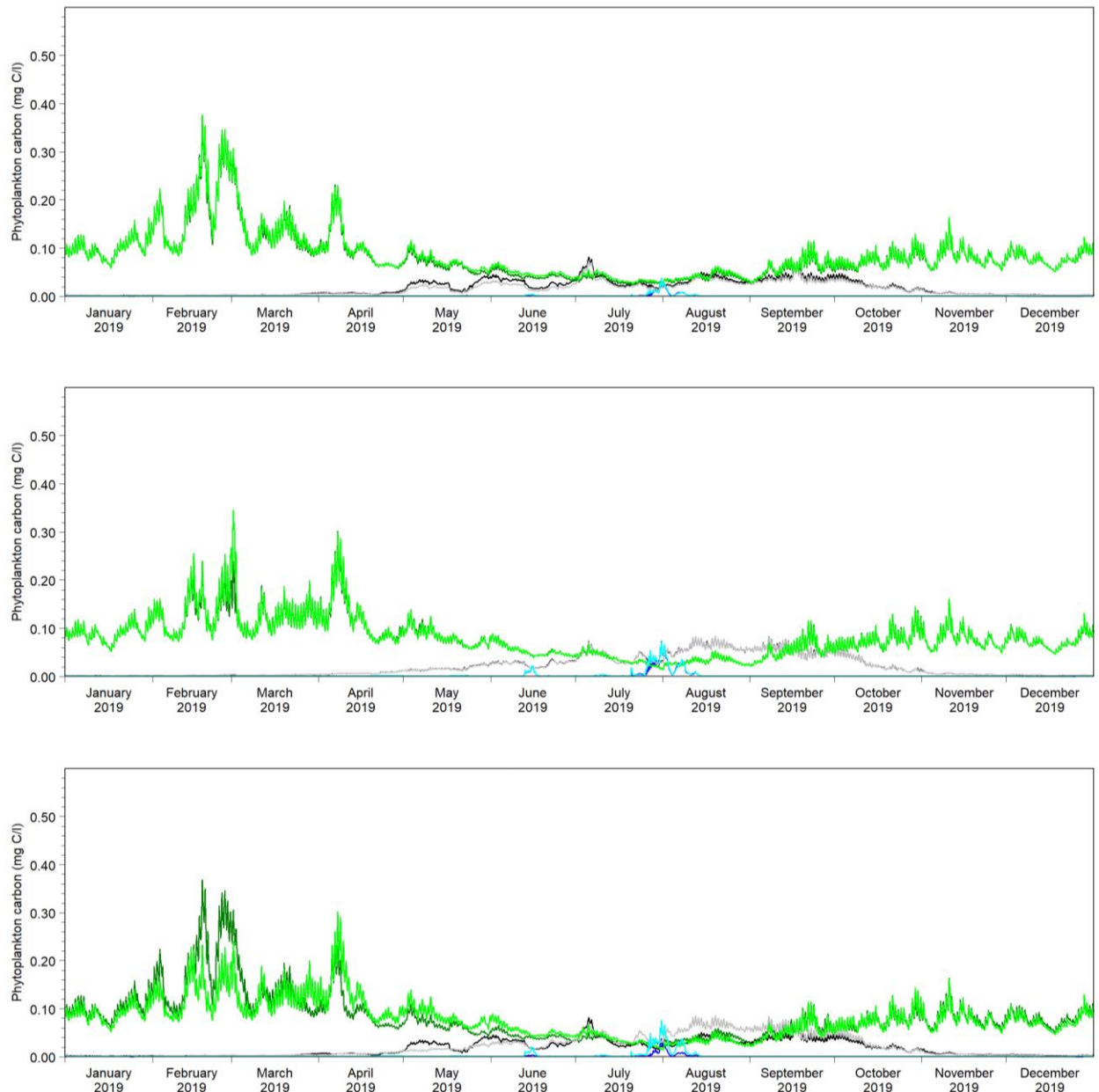
Perioden for dominans af cyanobakterier er overordnet set som forventet fra målinger og litteraturen, se for eksempel Wåhlstrøm et al., 2024, med dominans i Arkona Bassinet, Bornholmer Bassinet og Østlige Gotlands Bassin i sommermånederne (juni-august) og fravær af cyanobakterie dominans i Kattegat pga. højere saltholdighed.

Årlig variation og ændringer pga. forbindelserne og klima, i fytoplanktonsamfundet i HELCOM sub-bassin "Kattegat", "Arkona", "Bornholmer Bassinet" og "Østlige Gotlands Bassin" for 2019 med og uden forbindelser, 2100 med og uden forbindelser og 2019 og 2100 uden forbindelser er vist i Figur 5-37, Figur 5-38, Figur 5-39 og Figur 5-40.

I alle bassiner er ændringen i perioden med dominans af cyanobakterier pga. forbindelserne marginal, både under 2019 og 2100 forhold. I "Kattegat", "Arkona", "Bornholmer Bassinet" og "Østlige Gotlands Bassin" medfører forbindelserne således en ændring i perioden med dominans af cyanobakterier på $< \pm 1$ dage (Tabel 5-9, Tabel 5-10, Tabel 5-11 og Tabel 5-12).

I "Arkona Bassinet", "Bornholmer Bassinet" og "Østlige Gotlands Bassin" er ændringen i perioden med dominans af cyanobakterier pga. klimaændringer markant. Her medfører klimaændringer således en forøgelse i perioden med dominans af cyanobakterier på hhv. 14-17 dage, 24-25 dage og 22 dage. Det bemærkes endvidere at klimaændringer medfører en øgning i koncentration af cyanobakteriekulstof fra maksimale værdier på omkring 0,25 mgC/L til 0,50 mgC/L og derved omkring en fordobling af den pelagiske cyanobakterie C pulje.

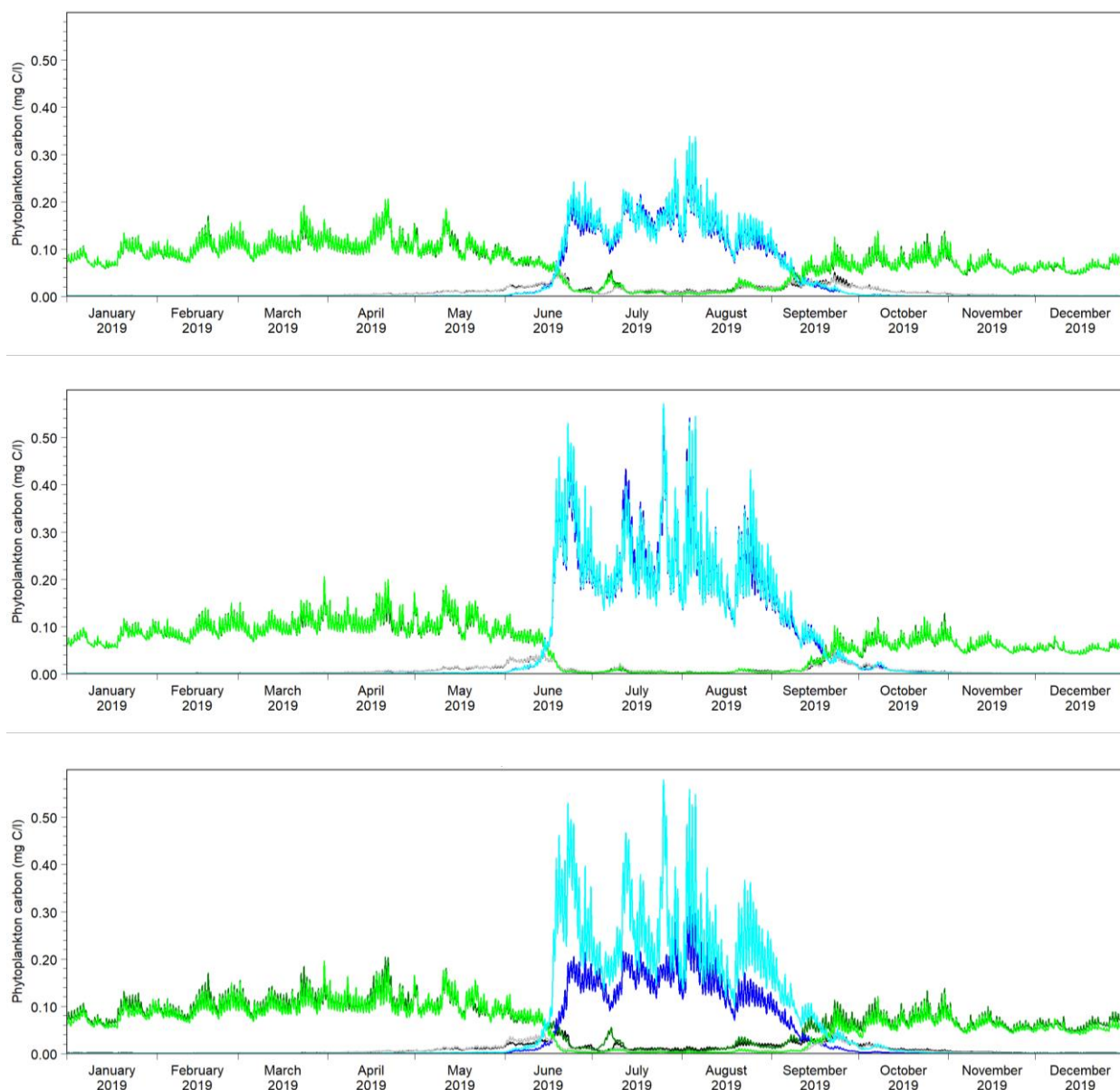
Ændringer i perioden med dominans af cyanobakterier skyldes primært ændringer i perioden med fosfor-overskud, øget vandtemperatur og reduceret saltholdighed i overfladevandet.



Figur 5-37 Årlig udvikling og variation i fytoplanktonsamfundet (gC/L) repræsenteret ved flagellater (sort og grå linje), diatomer (mørkegrøn og lysegrøn linje) og cyanobakterier (mørkeblå og lyseblå linjer) i HELCOM sub-bassin "Kattegat". Øverst: 2019 med og uden forbindelser. Midten: 2100 med og uden forbindelser. Nederst: 2019 og 2100 uden forbindelser.

Tabel 5-9 Start dato, slut dato og varighed af perioden med cyanobakterie dominans i HELCOM sub-bassin "Kattegat", ved 2019 og 2100 med og uden forbindelser.

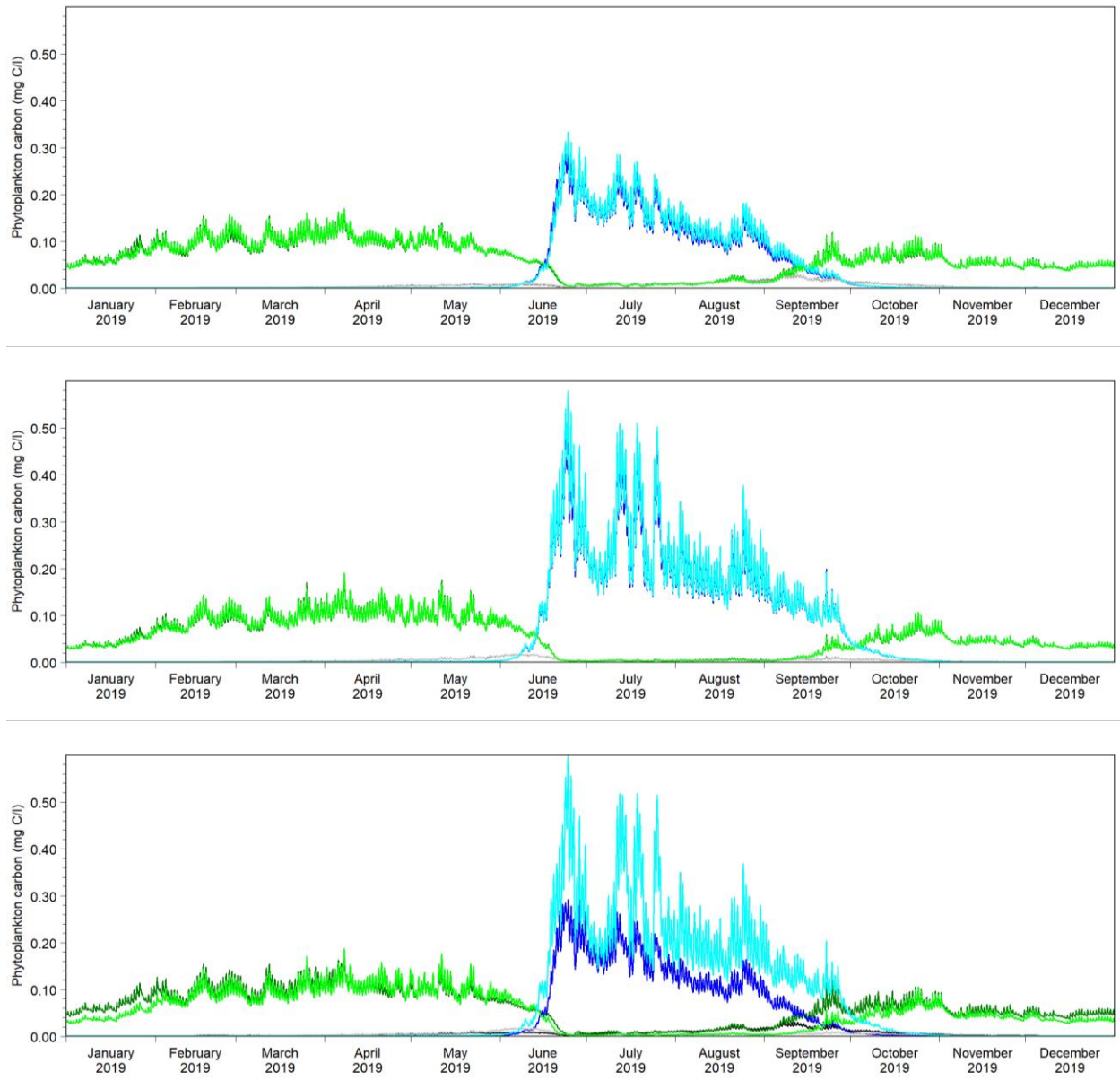
Østersø Model	Start dato	Slut dato	Varighed (dage)
2019 uden forb.	-	-	0
2019 med forb.	-	-	0
2100 uden forb.	30-07-2019	02-08-2019	3
2100 med forb.	30-07-2019	02-08-2019	3
2100 uden forb. test	30-07-2019	02-08-2019	3
2100 med forb. test	30-07-2019	02-08-2019	3



Figur 5-38 Årlig udvikling og variation i fytoplanktonsamfundet (gC/L) repræsenteret ved flagellater (sort og grå linje), diatomer (mørkegrøn og lysegrøn linje) og cyanobakterier (mørkeblå og lyseblå linjer) i HELCOM sub-bassin "Arkona Bassinet". Øverst: 2019 med og uden forbindelser. Midten: 2100 med og uden forbindelser. Nederst: 2019 og 2100 uden forbindelser.

Tabel 5-10 Start dato, slut dato og varighed af perioden med cyanobakterie dominans i HELCOM sub-bassin "Arkona Bassinet", ved 2019 og 2100 med og uden forbindelser.

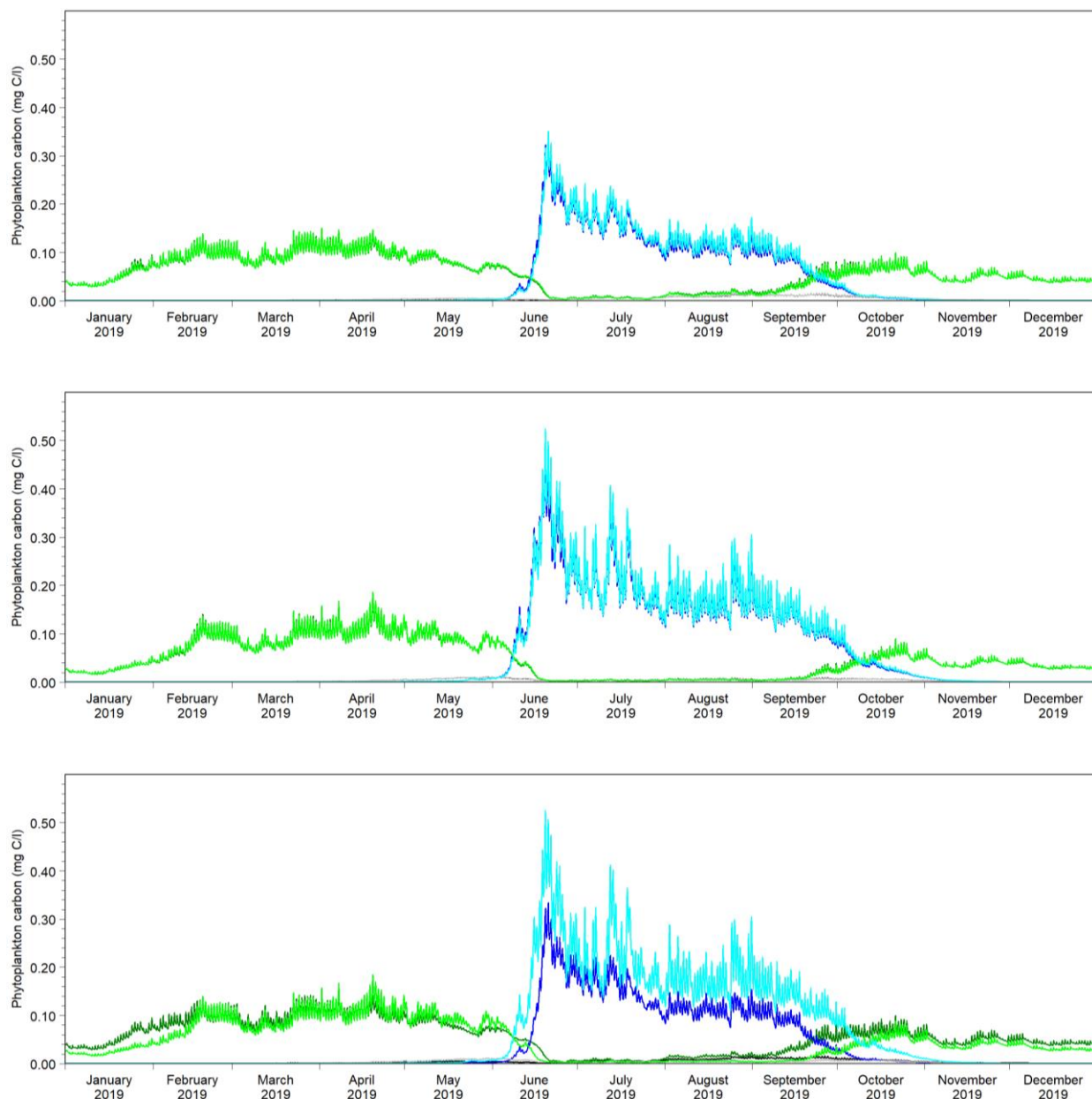
Østersø Model	Start dato	Slut dato	Varighed (dage)
2019 uden forb.	19-06-2019	09-09-2019	82
2019 med forb.	19-06-2019	06-09-2019	79
2100 uden forb.	15-06-2019	19-09-2019	96
2100 med forb.	15-06-2019	19-09-2019	96
2100 uden forb. test	16-06-2019	17-09-2019	93
2100 med forb. test	16-06-2019	18-09-2019	94



Figur 5-39 Årlig udvikling og variation i fytoplanktonsamfundet (gC/L) repræsenteret ved flagellater (sort og grå linje), diatomeer (mørkegrøn og lysegrøn linje) og cyanobakterier (mørkeblå og lyseblå linjer) i HELCOM sub-bassin "Bornholmer Bassinet". Øverst: 2019 med og uden forbindelser. Midten: 2100 med og uden forbindelser. Nederst: 2019 og 2100 uden forbindelser.

Tabel 5-11 Start dato, slut dato og varighed af perioden med cyanobakterie dominans i HELCOM sub-bassin "Bornholmer Bassinet", ved 2019 og 2100 med og uden forbindelser.

Østersø Model	Start dato	Slut dato	Varighed (dage)
2019 uden forb.	15-06-2019	11-09-2019	88
2019 med forb.	15-06-2019	11-09-2019	88
2100 uden forb.	13-06-2019	03-10-2019	112
2100 med forb.	12-06-2019	03-10-2019	113
2100 uden forb. test	13-06-2019	29-09-2019	108
2100 med forb. test	13-06-2019	29-09-2019	108



Figur 5-40 Årlig udvikling og variation i fytoplanktonsamfundet (gC/L) repræsenteret ved flagellater (sort og grå linje), diatomer (mørkegrøn og lysegrøn linje) og cyanobakterier (mørkeblå og lyseblå linjer) i HELCOM sub-bassin "Østlige Gotlands Bassin". Øverst: 2019 med og uden forbindelser. Midten: 2100 med og uden forbindelser. Nederst: 2019 og 2100 uden forbindelser.

Tabel 5-12 Start dato, slut dato og varighed af perioden med cyanobakterie dominans i HELCOM sub-bassin "Østlige Gotlands Bassin", ved 2019 og 2100 med og uden forbindelser.

Østersø Model	Start dato	Slut dato	Varighed (dage)
2019 uden forb.	13-06-2019	22-09-2019	101
2019 med forb.	13-06-2019	22-09-2019	101
2100 uden forb.	07-06-2019	08-10-2019	123
2100 med forb.	07-06-2019	08-10-2019	123
2100 uden forb. test	07-06-2019	05-10-2019	120
2100 med forb. test	07-06-2019	05-10-2019	120

5.3.3 Torsk - Det reproduktive volumen

Det reproduktive volumen beregnes som det vandvolumen, hvor ilt koncentrationen > 2 ml/L, temperaturen $> 1,5$ °C - < 14 °C og saltholdigheden > 11 ‰. Dette volumen bliver i dag brugt som indikator i f.eks ICES og Copernicus.

Årlig variation og ændringer, pga. forbindelserne og klima, i torskens reproduktive volumen i HELCOM sub-bassin "Kattegat", "Arkona", "Bornholmer Bassinet" og "Østlige Gotlands Bassin" for 2019 med og uden forbindelser, 2100 med og uden forbindelser og sensitivitetstest 2100 (benævnt Hf) med og uden forbindelser er vist i Figur 5-41, Figur 5-42, Figur 5-43 og Figur 5-44.

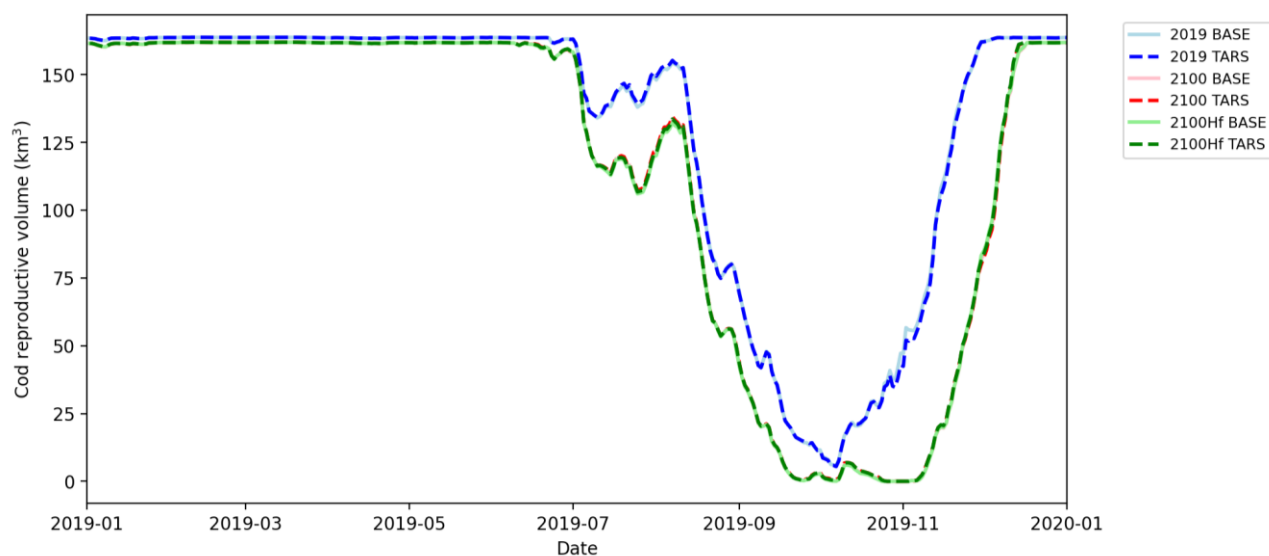
I alle bassiner er den gennemsnitlige årlige ændring i det reproduktive volumen pga. forbindelserne positiv eller neutral, både under 2019 og 2100 forhold. I "Kattegat", "Arkona", "Bornholmer Bassinet" og "Østlige Gotlands Bassin" medfører forbindelserne således en gennemsnitlige årlige ændring af det reproduktive volumen på hhv. 0 km^3 , 0 km^3 , $+4 \text{ km}^3$ og $+15\text{-}16 \text{ km}^3$ (Tabel 5-13, Tabel 5-14, Tabel 5-15 og Tabel 5-16).

Den positive ændring af det reproduktive volumen i Bornholmer Bassinet" og "Østlige Gotlands Bassin", skyldes en stigning i saltholdighed i bundlaget i "Bornholmer Bassinet", og en stigning under haloklinen i "Østlige Gotlands Bassin", pga. stigning i bundlaget i Kattegat. Stigningen i bundlaget i Kattegat 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 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.

I alle bassiner er ændringen i det reproduktive volumen pga. klimaændringer markant negative. I "Kattegat", "Arkona", "Bornholmer Bassinet" og "Østlige Gotlands Bassin" medfører klimaændringer således på årsbasis en gennemsnitlig reduktion af det reproduktive volumen på hhv. 16 km^3 , 8 km^3 , 59 km^3 og 307 km^3 (Tabel 5-13, Tabel 5-14, Tabel 5-15 og Tabel 5-16). Den største reduktion af det reproduktive volumen ses i det Østlige Gotlands Bassin.

Ændringerne i det reproduktive volumen skyldes primært ændringer i iltforhold (hhv. større og mindre områder med < 2 ml/L pga. klimaændringer og forbindelser, jf. afsnit 5.3.1 og Tabel 5-5, Tabel 5-6, Tabel 5-7 og Tabel 5-8) og øget temperatur pga. klimaændringer (for samlet overblik over betydningen af de begrænsende faktorer for torskens reproduktive volumen, se Bilag A).

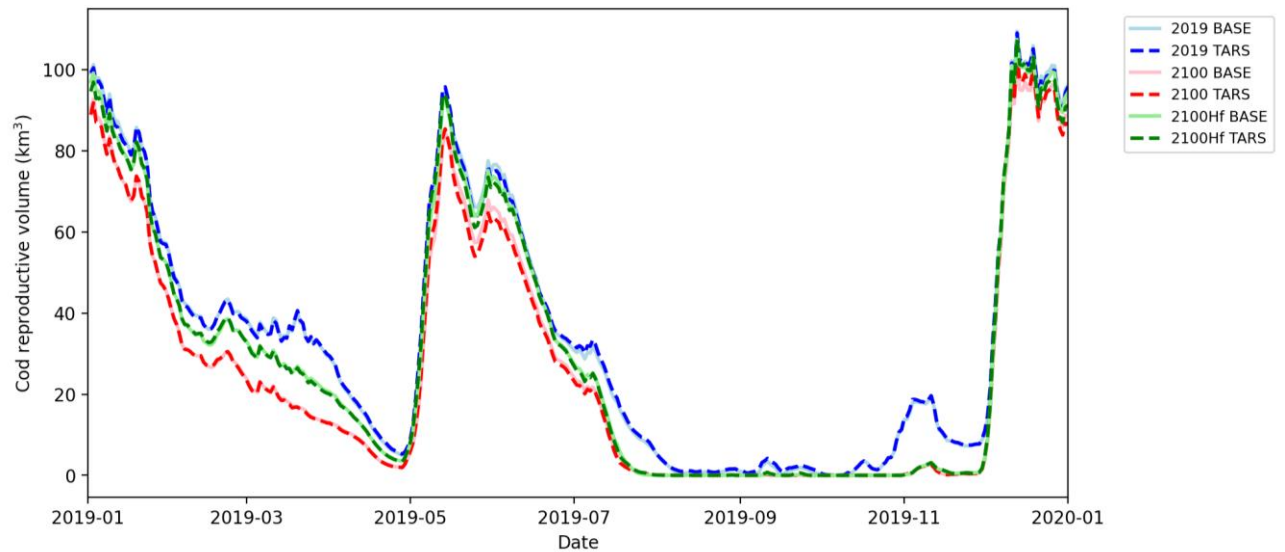
Det skal bemærkes at det totale vandvolumen på vanddybder > 20 m, er lavere i 2100 pga. land/havbundshævninger sammenlignet med 2019. Således vil volumen være reduceret med hhv. 182 km^3 , 38 km^3 , 183 km^3 og 716 km^3 i Kattegat, Arkona Bassinet, Bornholmer Bassinet og Østlige Gotlands Bassin i 2100 (se Figur 3-1).



Figur 5-41 Årlig udvikling og variation i torskens reproduktive volumen i HELCOM sub-bassin "Kattegat": 2019 med og uden forbindelser (stiplet mørkeblå linje og optrukket lyseblå linje), 2100 med og uden forbindelser (stiplet rød linje og optrukket lyserød linje), og sensitivitetstest 2100 (benævnt Hf) med og uden forbindelser (stiplet mørkegrøn linje og optrukket lysegrøn linje). Graferne angiver km^3 af sub-bassinets samlede volumen på vanddybder $> 20 \text{ m}$ (163.81 km^3 i 2019 og 161.99 km^3 i 2100). Bemærk at den blå kurve (2019 Tårs) og den grønne kurve (2100Hf Tårs) delvist dækker for de andre kurver.

Tabel 5-13 Torskens reproduktive volumen i HELCOM sub-bassin "Kattegat", ved 2019 og 2100 med og uden forbindelser opgjort i km^3 af sub-bassinets samlede volumen på vanddybder $> 20 \text{ m}$.

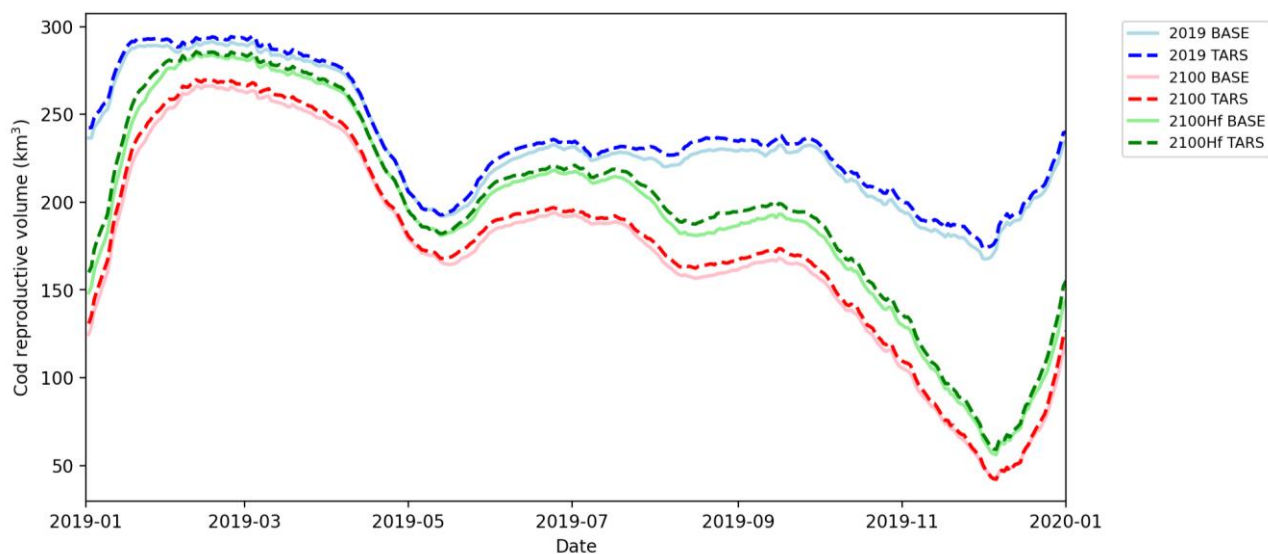
Østersø Model	Reproduktivt volumen (km^3), gns	Reproduktivt volumen (km^3), max	Reproduktivt volumen (km^3), min
2019 uden forb.	130	164	6
2019 med forb.	130	164	5
2100 uden forb.	114	162	0
2100 med forb.	114	162	0
2100 uden forb. Test	114	162	0
2100 med forb. Test	114	162	0



Figur 5-42 Årlig udvikling og variation i torskens reproduktive volumen i HELCOM sub-bassin "Arkona Bassinet": 2019 med og uden forbindelser (stiplet mørkeblå linje og optrukket lyseblå linje), 2100 med og uden forbindelser (stiplet rød linje og optrukket lyserød linje), og sensitivitetstest 2100 (benævnt Hf) med og uden forbindelser (stiplet mørkegrøn linje og optrukket lysegrøn linje). Graferne angiver km³ af sub-bassinets samlede volumen på vanddybder > 20 m (142.71 km³ i 2019 og 142.33 km³ i 2100).

Tabel 5-14 Torskens reproduktive volumen i HELCOM sub-bassin "Arkona Bassinet", ved 2019 og 2100 med og uden forbindelser opgjort i km³ af sub-bassinets samlede volumen på vanddybder > 20m.

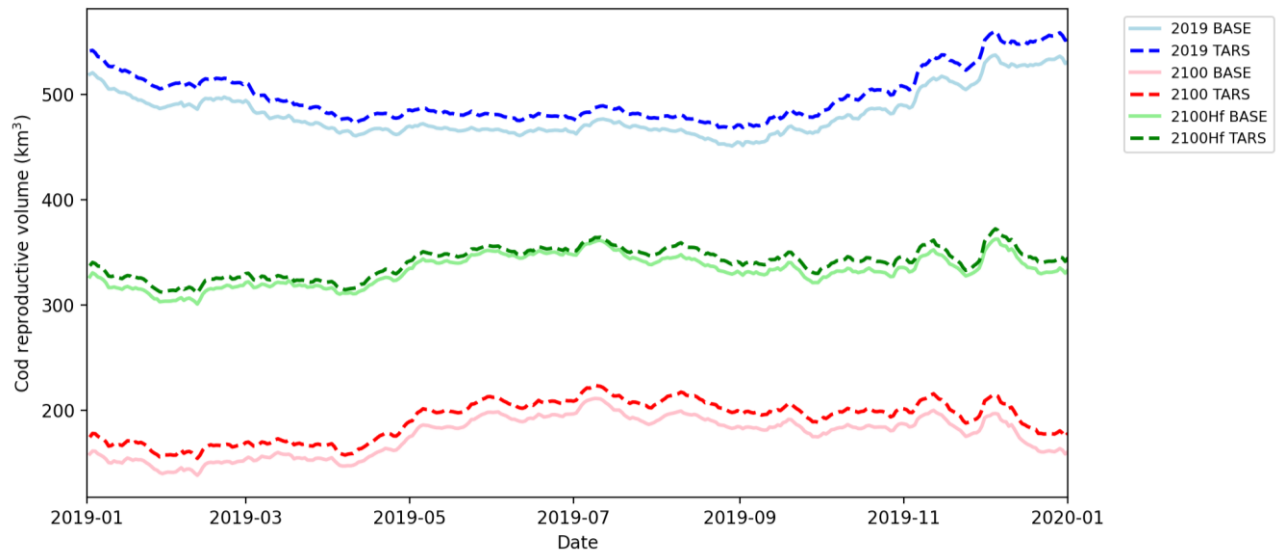
Østersø Model	Reproduktivt volumen (km ³), gns	Reproduktivt volumen (km ³), max	Reproduktivt volumen (km ³), min
2019 uden forb.	34	109	0
2019 med forb.	34	109	0
2100 uden forb.	26	102	0
2100 med forb.	26	104	0
2100 uden forb. test	30	107	0
2100 med forb. test	30	108	0



Figur 5-43 Årlig udvikling og variation i torskens reproduktive volumen i HELCOM sub-bassin "Bornholmer Bassinet": 2019 med og uden forbindelser (stiplet mørkeblå linje og optrukket lyseblå linje), 2100 med og uden forbindelser (stiplet rød linje og optrukket lyserød linje), og sensitivitetstest 2100 (benævnt Hf) med og uden forbindelser (stiplet mørkegrøn linje og optrukket lysegrøn linje). Graferne angiver km³ af sub-bassinets samlede volumen på vanddybder > 20 m (1023.42 km³ i 2019 og 1021.59 km³ i 2100).

Tabel 5-15 Torskens reproduktive volumen i HELCOM sub-bassin "Bornholmer Bassinet", ved 2019 og 2100 med og uden forbindelser opgjort i km³ af sub-bassinets samlede volumen på vanddybder > 20m.

Østersø Model	Reproduktivt volumen (km ³), gns	Reproduktivt volumen (km ³), max	Reproduktivt volumen (km ³), min
2019 uden forb.	232	291	168
2019 med forb.	236	295	174
2100 uden forb.	173	266	42
2100 med forb.	177	270	42
2100 uden forb. test	195	284	56
2100 med forb. test	199	286	59



Figur 5-44 Årlig udvikling og variation i torskens reproduktive volumen i HELCOM sub-bassin "Østlige Gotlands Bassin": 2019 med og uden forbindelser (stiplet mørkeblå linje og optrukket lyseblå linje), 2100 med og uden forbindelser (stiplet rød linje og optrukket lyserød linje), og sensitivitetstest 2100 (benævnt Hf) med og uden forbindelser (stiplet mørkegrøn linje og optrukket lysegrøn linje). Graferne angiver km³ af sub-bassinets samlede volumen på vanddybder > 20 m (4079.78 km³ i 2019 og 4072.62 km³ i 2100).

Tabel 5-16 Torskens reproduktive volumen i HELCOM sub-bassin "Østlige Gotlands Bassin", ved 2019 og 2100 med og uden forbindelser opgjort i km³ af sub-bassinets samlede volumen på vanddybder > 20m.

Østersø Model	Reproduktivt volumen (km ³), gns	Reproduktivt volumen (km ³), max	Reproduktivt volumen (km ³), min
2019 uden forb.	482	538	451
2019 med forb.	498	560	468
2100 uden forb.	176	211	138
2100 med forb.	191	224	154
2100 uden forb. test	333	363	301
2100 med forb. test	341	372	311

5.4 Sensitivitetstest

En sensitivitetstest er udført med alle de bestemte klimaændringer, men hvor afstrømningen fra land kun er 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, og derved også tilførslerne af N og P, som mindskes i sensitivitetstesten.

For hydrografien, viser sensitivitetstesten at de beregnede saltholdighedsprofiler i sensitivitetstesten er tæt på de profiler, 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 samtidigt beregnes omtrentligt de samme oprindelige profiler i 2019.

Sensitivitetstesten skal således primært ses i relation til halvering af tilførsler med næringsstoffer ift. økologi og miljøforhold. Resultater af sensitivitetstesten fremgår i Tabel 5-1 - Tabel 5-16 og omfatter analysen af HELCOM's "core indicators" og supplerende indikatorer.

Overordnet viser sensitivitetstesten en tilsvarende mindre respons på de eutrofi-erings relaterede indikatorer, sammenlignet med scenariet med forøgelse i afstrømning (og tilførsler) til Østersøen på +19%. Cyanobakterier og ilt i bundvandet viser dog en svagere respons, da disse indikatorer i højre grad er temperaturfølsomme og temperaturen som nævnt ikke er ændret i sensitivitetstesten.

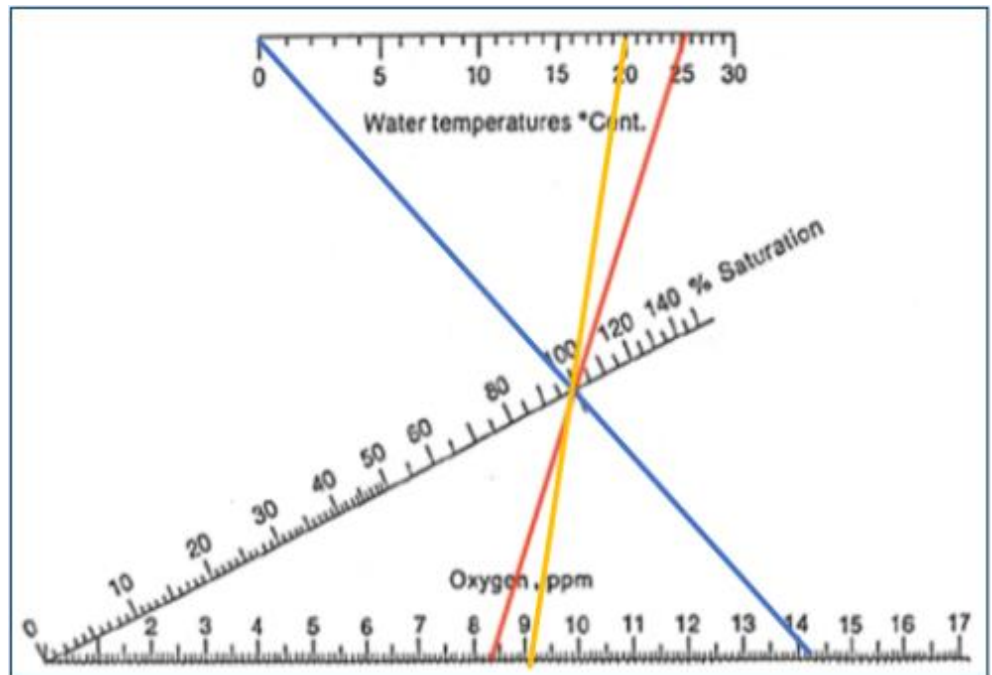
5.5 Samlet betragtning af økologisk påvirkning

Det findes generelt, at de økologiske forhold (klorofyl, næringsstoffer, sigtdybde, ilt, cyanobakterier og torskens reproduktive volumen) påvirkes marginalt ($\pm$) af de undersøgte infrastrukturprojekter, både i et nutidigt og fremtidigt klima. For eksempel bliver torskens reproduktive volumen, marginalt forbedret af infrastrukturprojekter. Klimaændringerne påvirker i udpræget grad havmiljøet i Østersøen og resulterer bl.a. i øget klorofyl og næringsstofkoncentrationer og betydeligt ringere iltforhold.

Påvirkningen fra klimaændringer på økologien er betydelig. De ændrede økologiske forhold er af en størrelse, der vil kunne måles og dokumenteres i fremtidige monitoreringsprogrammer. De ændrede økologiske og hydrografiske forhold forårsaget af klimaændringerne forventes dermed at have en betydelig påvirkning på miljøet i Østersøen. En væsentlig hydrografisk ændring er vandtemperaturstigningen, som vil bevirke et mindre iltindhold (se Figur 5-45) og et hurtigere forbrug af ilten i havvandet, altså et skift mod iltfattigere forhold i bundlagene i Østersøen, hvilket bl.a. vil medføre en reduktion i den akkumulerede indikator torskens reproduktive volumen.

Endvidere vil vandtemperaturstigningen og øget fosfor-overskud medføre øget dominans af cyanobakterier i Østersøens fytoplankton samfund, hvilket vil facilitere øget fiksering af atmosfærisk kvælstof. Dette vil, i samspil med en potentiel øgning i næringsstofftilførsler, medføre øget pelagisk primærproduktion og forstærke skiftet mod iltfattigere forhold i bundlagene i Østersøen yderligere.

De ændrede hydrografiske forhold forårsaget af klimaændringerne er kvantificeret i den parallelle hydrografiske rapportering (Sund & Bælt, 2025A).



Figur 5-4546 Statisk metode til bestemmelse af iltkoncentration ved forskellige temperaturer og mætningsgrader. Sammenhæng mellem 100% mætning og temperaturer på 0°C, 20°C og 25°C er vist.

Overordnet viser 2100-sensitivitetstesten en tilsvarende mindre respons på de eutrofierings relaterede indikatorer (klorofyl, næringsstoffer, sigtdybde) sammenlignet med scenariet med forøgelse i afstrømning (og tilhørende tilførsler) til Østersøen på +19%. Cyanobakterier og ilt i bundvandet viser dog en svagere respons, da disse indikatorer i højre grad er temperaturfølsomme, og temperaturen som nævnt ikke er ændret i sensitivitetstesten.

Påvirkningen fra forbindelserne på økologien og miljøforholdene er marginale. De ændrede økologiske forhold fra forbindelserne, som overvejende repræsenteres af meget små positive ændringer, er af en så marginal størrelse, at ændringen ikke forventes at kunne måles og dokumenteres i fremtidige monitoreringsprogrammer.

6 Diskussion

6.1 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 benyttet i dette arbejde, så 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:

- De marginalt ændrede hydrografiske forhold forårsaget af forbindelserne giver kun en marginal påvirkning ($\pm$) af økologien i Østersøen. Dette gælder for "Core indicators" (sommer klorofylkoncentration, vinter DIN og DIP koncentrationer og sigtdybde) og supplerende indikatorer (ilt i bundvandet, cyanobakterier og torskens reproduktive volumen)
- De betydeligt ændrede hydrografiske forhold forårsaget af klimaændringerne og øget næringssalttilførsel giver en betydelig afledt påvirkning af økologien i Østersøen. Dette gælder for "Core indicators" (sommer klorofylkoncentration, vinter DIN og DIP koncentrationer og sigtdybde) og supplerende indikatorer (ilt i bundvandet, cyanobakterier og torskens reproduktive volumen)

Den positive ændring af det reproduktive volumen i Bornholmer Bassinet" og "Østlige Gotlands Bassin" pga. forbindelserne, skyldes en stigning i saltholdighed i bundlaget i "Bornholmer Bassinet", og en stigning under haloklinen i "Østlige Gotlands Bassin", pga. stigning i bundlaget i Kattegat. Stigningen i bundlaget i Kattegat 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 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. Resultatet er også beregnet med den konceptuelle model og understøttes således af uafhængige og forskellige modeller og beregningsmetoder.

Påvirkningen fra klimaændringer på hydrografien og økologien er behæftet med stor spredning (2024F og 2025A), især på grund af spredningerne for klimaændringerne. Den tilsvarende spredning på infrastrukturprojekternes påvirkninger er væsentlig mindre og overskygges af klimaændringernes spredning. Anvendelse af 3 statistiske test viser at prognoser for de hydrauliske forhold i år 2100 i

høj grad er ensartet, hvad enten infrastrukturprojekterne inddrages i beregningerne eller ikke. Prognosen er domineret af klimaændringernes spredninger.

Hydrografen og økologien i Østersøen varierer på både kort og lang tidsskala, herunder vandføring, salttransport, lagdeling og iltforhold. 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 naturlig langperiodisk variation i alle de parametre der betragtes i dette arbejde, for eksempel vandføring, salttransport, lagdeling og iltforhold. Grundlæggende vurderes effekten af forbindelserne således kun at afhænge ganske lidt af det enkelte års hydrografi. Hvis forbindelserne reducerer vandgenemstrømningen, så gør forbindelserne det både i milde og kraftige hydrografiske år. Således vurderes det heller ikke som væsentligt at have meget forskellige hydrografiske år inkluderet. I denne sammenhæng bemærkes det, at 2019 er et rimeligt repræsentativt år.

6.2 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 hydrografen 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 økologien er marginal, både med og uden klimaændringer. Tilsvarende findes det i de hydrografiske analyser (Sund & Bælt, 2025A), at infrastrukturernes påvirkning af hydrografen er marginal, både med og uden klimaændringer.

Hvorvidt sådanne resultater i en senere miljøkonsekvensvurdering leder til, at infrastrukturprojekterne vurderes 'ikke alene eller kumulativt med andre planer og projekter at påvirke hydrografen 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 skal ikke besvares fyldestgørende på baggrund af dette projekt. Men påvirkningerne fra infrastrukturprojekterne er fundet at være marginale, hvormed menes, at ændringerne er så små, at de ikke vil kunne måles og dokumenteres i fremtidige monitoreringsprogrammer.

6.3 Opholdstid og miljøforhold i Østersøen og forsinkelse i signal

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

med en forsinkelse på 5 – 30 år. For økologien forventes denne forsinkelse at være meget længere, og det er tvivlsomt om det overhovedet giver mening at forsøge at sætte tal på hvornår klimaændringernes påvirkning af økologien vil være fuldt udviklet.

Denne tidsforsinkelse er i en vis udstrækning fjernet ved at gentage beregningen af 2019 og 2100 tyve gange (svarende til 20 år under samme vejrforhold). Således er det beregnede hydrografiske og økologiske signal i 2100 uden hele denne forsinkelse (og variationer fra år til år, som vil 'drukne' signalet).

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

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

6.4 Miljømål for Østersøen

Østersøhandleplanen, er HELCOMs strategiske program for foranstaltninger og handlinger for at opnå en god økologisk tilstand i Østersøen (Baltic Sea Action Plan - HELCOM, 2021).

I Østersøhandleplanen betragtes Østersøen integreret og holistisk, dvs. at hele Østersøens økosystem betragtes med dets tilstand og påvirkninger (og igen med henvisning til en referencetilstand). 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.

Østersøhandleplanen opdelt i fire segmenter med specifikke mål:

- Biodiversitet, med dets mål om et "Østersøens økosystem er sundt og modstandsdygtigt",
- Eutrofiering, med dets mål om et "Østersøen upåvirket af eutrofiering"
- Farlige stoffer og affald med dets mål om et "Østersøen upåvirket af farlige stoffer og affald", og
- Havbaserede aktiviteter, med dets mål om "Miljømæssigt bæredygtige havbaserede aktiviteter".

Hvert af de fire segmenter er struktureret omkring de opdaterede HELCOM økologiske- og forvaltningsmål og indeholder konkrete tiltag og handlinger, der skal implementeres senest i 2030.

I Østersøhandleplanen opereres med såkaldte "core indicators" for vandkvalitet. Hver "core indicator" har fastlagte målkriterier og der er indsatsplaner til regulering af særligt kvælstof og fosforudledninger, som skal lede til målopfyldelse.

Hvis statusværdien for en indikator forringes, betyder dette, at der skal laves flere forvaltningsmæssige tiltag (i praksis større næringsstofreduktioner), så

miljømålet opnås. Det er uklart om miljømålene i fremtiden justeres, som følge af klimaændringer, ligesom det er uklart om miljømålene ville kunne ændres, hvis de hydrografiske forhold ændres. Dette ville i så fald kræve en politisk beslutning af landende omkring Østersøen.

7 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.
- Carstensen, J., Conley, D.J., Almroth-Rosell, E., Asmala, E., Bonsdorff, E., Fleming-Lehtinen, V., Gustafsson, B.G., Gustafsson, C., Heiskanen, A.S., Janas, U., Norkko, A., Slomp, C., Villnas, A., Voss, M., Zilius, M., 2019. Factors regulating the coastal nutrient filter in the Baltic Sea. *Ambio* 2020, 49:1194–1210 <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01282-y>.
- DHI, 2020a: Development of Mechanistic Models: Mechanistic Model for the Inner Danish Waters. Technical documentation on biogeochemical model. DHI technical report (project no. 11822245)
- DHI, 2020b. Development of Mechanistic Models. Short Technical Description of the Biogeochemical Models Input Data. DHI technical report (project no. 11822245)
- DHI & COWI, 2024: Ingeniørvurdering af layout.
- Hansen, J.W. & Rytter, D. 2024. Iltsvind i danske farvande 29. august – 25. september 2024. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 23 s. Rådgivningsnotat nr. 2024|53
- Heikinheimo, O. 2008. Average salinity as an index for environmental forcing on cod recruitment in the Baltic Sea. *Boreal Environmental Research* 13: 457–464.
- HELCOM 1986. BALTIC SEA ENVIRONMENT PROCEEDINGS No. 16. WATER BALANCE OF THE BALTIC SEA. A Regional Cooperation Project of the Baltic Sea States. International Summary Report. BALTIC MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMISSION. HELSINKI COMMISSION, June 1986
- HELCOM 2023. Chlorophyll-a. HELCOM core indicator report. Online. [Date Viewed], [Web link]. ISSN 2343-2543
- HELCOM 2023. Dissolved inorganic nitrogen (DIN). HELCOM core indicator report. Online. [Date Viewed], [Web link]. ISSN 2343-2543.
- HELCOM 2023. Dissolved inorganic phosphorus (DIP). HELCOM core indicator report. Online. [Date Viewed], [Web link]. ISSN 2343-2543.
- HELCOM 2023. Oxygen debt. HELCOM core indicator report. Online. [Date Viewed], [Web link]. ISSN 2343-2543.

- HELCOM 2023. Water clarity. HELCOM core indicator report. Online. [Date Viewed], [Web link]. ISSN 2343-2543.
- 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., 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.
- 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 krydstogstterminal, VVM – Teknisk baggrundsrapport nr. 3, Marine miljøkonsekvensvurderinger, marts 2009. Udarbejdet for Københavns Kommune og Kystdirektoratet af DHI.
- Mackenzie, B., John, St. M., Wieland, K. 1996. Eastern Baltic cod: perspectives from existing data on processes affecting growth and survival of eggs and larvae. Mar Ecol Prog Ser. Vol. 134: 265-281.
- Maljutenko, I., Raudsepp, U., Lagemaa, P. 2023. PRODUCT USER MANUAL. Baltic Sea Cod Reproductive volume BALTIC_OMI_HEALTH_codt_volume. Issue 3.0. 2023/09/01
- 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.
- Plikshs, M, Hinrichsen, HH., Elferts, D., Sics, I., Kornilovs, G., Køster, FW. 2015. Reproduction of baltic cod, *Gadus morhua* (actinopterygii: gadiformes: gadidae), in the gotland basin: causes of annual variability. *Acta ichthyologica et piscatoria* (2015) 45 (3): 247-258
- Sund & Bælt, 2018: Undersøgelse af fremskudt færgehavn ved Tårs. Udarbejdet for Sund & Bælt Holding A/S af COWI.
- Sund & Bælt, 2022: Forundersøgelse af en Kattégatforbindelse, 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. Effekter fra infrastrukturprojekter og klimaændringer på den central Østersø (findes kun som kladde). Udarbejdet for Sund & Bælt Holding A/S af COWI og DHI.
- Wåhlstrøm, I., Almroth-Rosell, E., Edman, M., Olofsson, M., Eilola, K., Fleming, V., Grøger, M., Arneborg, L., Meier, M. 2024. Increased nutrient retention and cyanobacterial blooms in a future coastal zone. Estuarine, Coastal and Shelf Science. Volume 301, June 2024, 108728.

Bilag A Begrænsende faktorer for torskens reproduktive volumen

