

Kystvandrådsarbejdet for Hjarbæk Fjord, Skive Fjord, Lovns Bredning, Risgårde Bredning og Bjørnsholm Bugt

Modeludvikling og scenarioanalyse

December 2023

>



Kystvandrådsarbejdet for Hjarbæk Fjord, Skive Fjord, Lovns Bredning, Risgårde Bredning og Bjørnsholm Bugt

Modeludvikling og scenarioanalyse

Kontaktperson:	Anders Erichsen, aer@dhigroup.com
Projektleder	Anders Erichsen
Kvalitetsansvarlig	Trine Larsen
Udarbejdet af	Anders Erichsen
Projektnummer	11828567
Godkendt af	Anders Erichsen
Godkendelsesdato	12. december 2023
Revision:	Final 1.0
Filnavn	HjarbaekFjord-ModelUdvikling_v2.docx

Indholdsfortegnelse

1	Introduktion	5
2	Modeludvikling	6
2.1	Hydrodynamisk modeludvikling.....	6
2.1.1	Indledning.....	7
2.1.2	Modelområde.....	7
2.1.3	Datainput til modellen.....	9
2.1.4	Modelkalibrering.....	10
2.2	Biogeokemisk modeludvikling.....	10
2.2.1	Randværdier.....	11
2.2.2	Forceringer.....	11
2.2.3	Næringsstofftilførsel.....	11
2.2.4	Initialbetingelser.....	11
2.2.5	Modelkalibrering.....	12
3	Modelscenarier	13
4	Metode	14
4.1	Årsækvivalenter.....	15
5	Resultater og konklusioner	17
5.1	Effekter fra naboområder og -lande.....	17
5.2	Lokale reduktioner og ækvivalenter.....	17
6	Referencer	19

Figurer

Figur 2.1	Beregningsnet i Limfjordsmodellen. Bemærk den højere opløsning især i vandområderne Bjørnholms Bugt, Risgårde Bredning, Skive Fjord og Lovns Bredning og Hjarbæk Fjord.....	7
Figur 2.2	Limfjordsbathymeti.....	8
Figur 2.3	Eksempel på tværsnit i Hvalpsund i Limfjorden, der viser det lodrette modelmaske bestående af fem sigmalag ned til -5m, z-lag med 1m opløsning under -5m (her ned til den lokale dybde på -20m).....	9
Figur 2.4	Fordeling af ferskvandskilder anvendt i Limfjordsfjordmodellen.....	10
Figur 4.1	Skematisk illustration af beregning af dosis-respons. Bemærk, at figuren alene beskriver relative forskelle, således at nutidig tilførsel og indikator tilstand udgør 100 %, mens reduktioner beregnes som relative i forhold til dagens tilførsler og tilstand. Derfor har dosis-responsenheden %-ændring i sommer-klorofyl-a koncentration per %-ændring i TN-tilførsel i figureksemplet.....	14
Figur 4.2	Skematisk illustration af beregning af dosis-respons. Bemærk, at figuren beskriver relative forskelle på indikatoren, mens tilførsler opgøres i absolutte tilførsler. Derfor har dosis-respons enheden %-ændring i sommer-klorofyl-a koncentration per tons ændring i TN-tilførsel i figureksemplet.....	15
Figur 4.3	Skematisk illustration af beregning af dosis-respons. Bemærk, at figuren beskriver relative forskelle på indikatoren, mens tilførsler opgøres i absolutte tilførsler. Derfor har dosis-respons enheden %-ændring i sommer-klorofyl-a koncentration per tons ændring i TP-tilførsel i figureksemplet.....	16

Tabeller

Tabel 5.1	Samlet P-reduktion, ændring i indsatsbehov og ækvivalenter for reduktioner i TP-tilførsler til helårs TN-tilførsler.	18
-----------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

1 Introduktion

Som en del af arbejdet i Kystvandsrådet for Hjarbæk Fjord og Skive Fjord, Lovns Bredning, Risgårde Bredning og Bjørnsholm Bugt er DHI A/S blevet bedt om at opstille modelscenarier, udviklet igennem diskussioner i Teknikergruppen foruden resultaterne af arbejdet i parallelle arbejdsgrupper.

Modelsценarierne er baseret på en tidligere mekanistisk model for hele Limfjorden, udviklet og anvendt under arbejdet med vandområdeplanerne 2021-2027 (DHI 2019a og DHI 2020), og nærværende rapport beskriver kort den anvendte model, de besluttede scenarier foruden metode og resultater til benyttelse i Kystvandsrådets anbefalinger fremadrettet.

2 Modeludvikling

Den mekanistiske model, som anvendes til scenarioanalysen i det forberedende arbejde for kystvandsrådet, bygger på den hydrodynamiske model (DHI 2019a) og biogeokemiske (økologiske) model (DHI 2020), som er blevet udviklet af DHI og benyttet i arbejdet bag vandområdeplanerne 2021-2027.

Mekanistiske modeller muliggør dynamiske beskrivelser af biogeokemi (økosystemer) og interaktioner mellem naturlige påvirkninger og menneskeskabte presfaktorer, som f.eks. næringsstofpåvirkninger. Derfor kan mekanistiske modeller anvendes til forudsigelser af ændringer i specifikke komponenter, såsom fx sommer-klorofyl-a-koncentrationer, på grund af klimatiske ændringer eller ændringer i næringsstofflørsler.

De økologiske forhold i marine farvande er bestemt af en række forskellige faktorer såsom vandudskiftning, lagdeling, vandtemperatur, næringsstofftilgængelighed, sedimentkarakteristika, struktur af fødenettet osv. Derudover udgør en række menneskeskabte faktorer, såsom næringsstofflørsel, fiskeri osv., ligeledes en påvirkning af økosystemet og dermed også af den økologiske tilstand.

I det følgende beskrives de anvendte modeller kort, mens der henvises til DHI (2019a) og (DHI 2020) for en mere detaljeret beskrivelse af model og modelvalidering.

Selve modelkomplekset for Limfjorden – og dermed også vandområderne Bjørnholms Bugt, Risgårde Bredning, Skive Fjord og Lovns Bredning (vandområde 157) og Hjarbæk Fjord (vandområde 158) – består af tre modeller:

1. En hydrodynamisk model
2. En bølgemodel
3. En biogeokemisk model

Modeludviklingen består af en 3D hydrodynamisk model, der beskriver det fysiske system; vandstand, strøm, saltholdighed og vandtemperaturer. Efter udviklingen af den hydrodynamiske model følger udviklingen af den biogeokemiske (økosystem) model, der beskriver de styrende biogeokemiske pelagiske og bentiske parametre og processer som fytoplankton, opløst ilt, primærproduktion osv. Der er også introduceret en bølgemodel, som er inkluderet for at kunne beskrive presset fra bølger på bunden (resuspension) og bundplanter, herunder ålegræs. Modelstrukturen er modulær, hvilket betyder, at en hydrodynamisk model er udviklet uafhængigt af den biogeokemiske model.

De tre modeller er baseret på modelleringssoftwaren MIKE og indeholder altså en hydrodynamisk model, MIKE 3 HD FM, en bølgemodel (MIKE SW) og en biogeokemiske model opbygget i MIKE ECO Lab. Hele modelkomplekset er baseret på en fleksibel mesh-tilgang.

2.1 Hydrodynamisk modeludvikling

Den hydrodynamiske model er baseret på den numeriske løsning af de tre-dimensionelle (3D) inkompressible Reynolds gennemsnitlige Navier-Stokes ligninger, der påberåber sig antagelserne om Boussinesq og hydrostatisk tryk.

Modellen består således af kontinuitets-, momentum-, temperatur-, salt-holdigheds- og tæthedsligninger, og den er lukket af et turbulent lukkeskema. Den frie overflade tages i betragtning ved hjælp af en sigma-koordinat transformationstilgang. Den videnskabelige dokumentation af MIKE 3 HD FM er givet i DHI (2017).

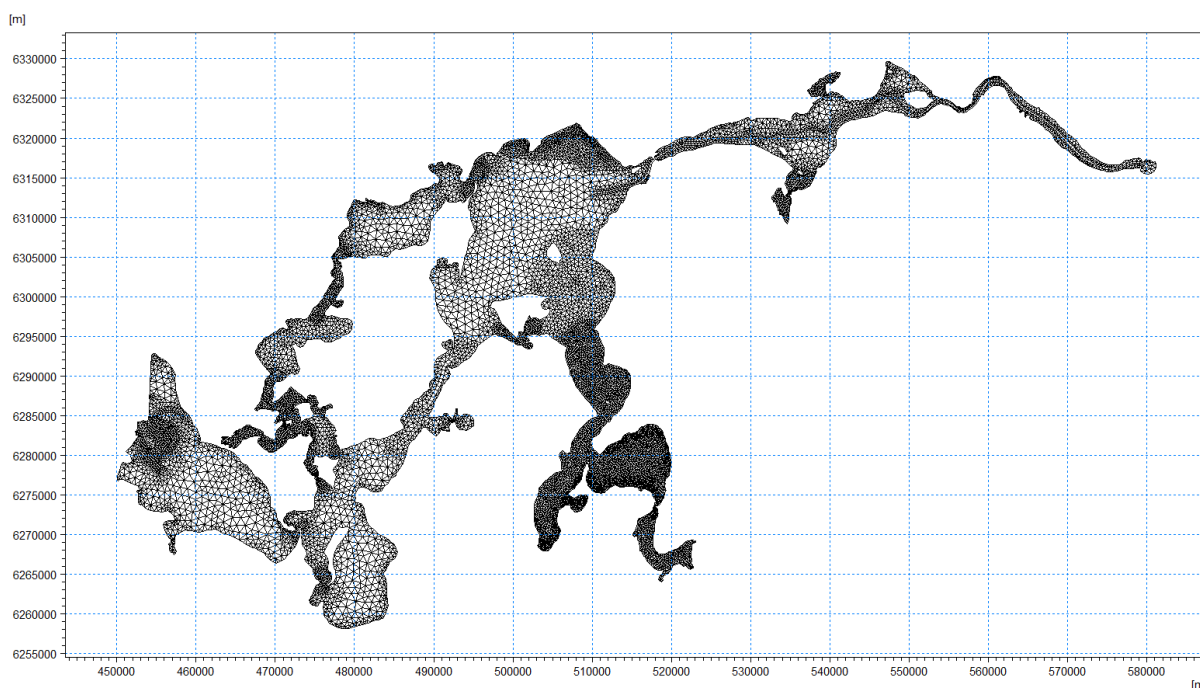
2.1.1 Indledning

Modelopsætningen omfatter definition af modelområdet, etablering af modelberegningsnet, udarbejdelse af modelpåvirkninger i form af åbne randforhold, atmosfærisk forcering og ferskvandstilstrømning, udarbejdelse af startbetingelser og selve opstilling af modellen.

Den anvendte model er opstillet for perioden 2002-2016, hvilket betyder, at alle modelforceringer skal dække denne periode. Resultaterne af modelscenarier analyseres alene for den sidste del af perioden for at sikre, at ændringer i fx næringsstoffilførsler kommer til syne i modellen.

2.1.2 Modelområde

Modelområdet er fastlagt i overensstemmelse med modelundersøgelsens interesseområde, hvilket betyder, at modellen er opstillet, så den dækker hele Limfjorden. I kystvandsrådsarbejdet er det alene vandområderne Bjørnholms Bugt, Risgårde Bredning, Skive Fjord og Lovns Bredning og Hjarbæk Fjord, der er i fokus, men den anvendte model inkluderer altså hele Limfjorden, og afgrænsningen udgøres af de to åbne grænser: grænsen mod vest ved Thyborøn, som er placeret i den smalle åbning, der forbinder Limfjorden med Nordsøen, og den østlige grænse (Hals), som er placeret i den smalle åbning, der forbinder Limfjorden med Kattegat (Figur 2.1).



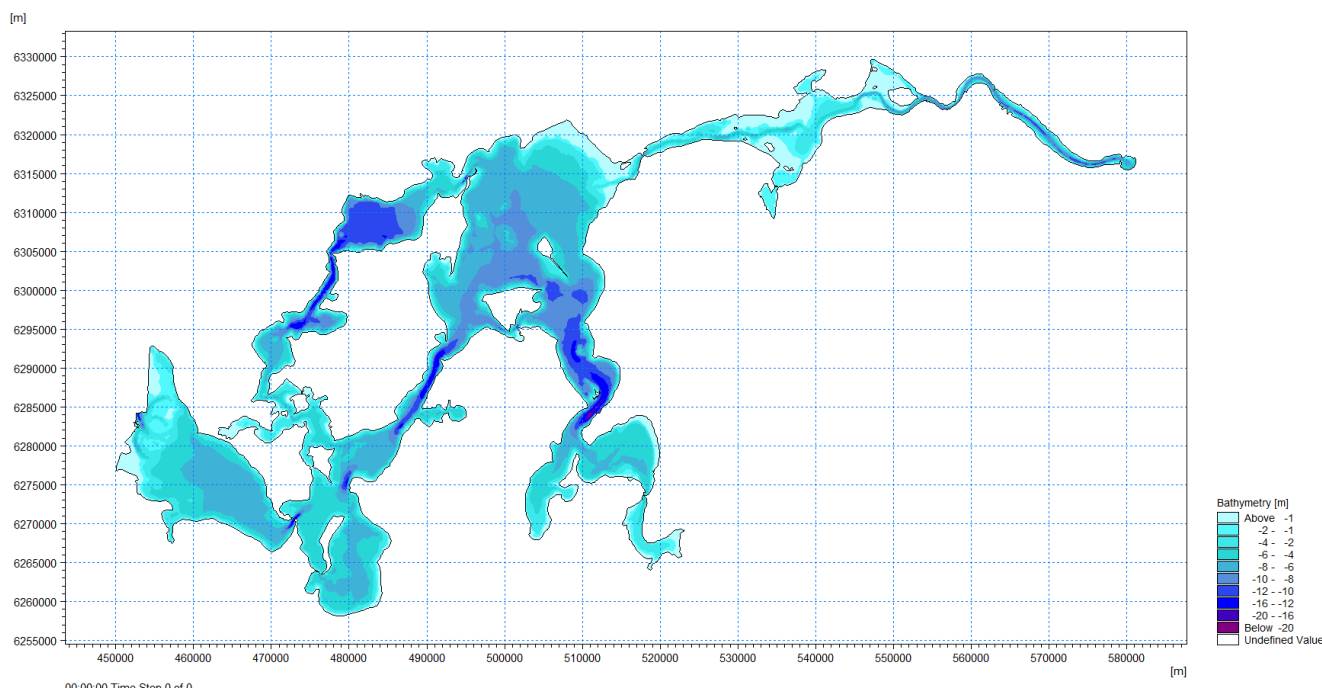
Figur 2.1 Beregningsnet i Limfjordsmodellen. Bemærk den højere opløsning især i vandområderne Bjørnholms Bugt, Risgårde Bredning, Skive Fjord og Lovns Bredning og Hjarbæk Fjord.

Generelt er Limfjorden en lavvandet fjord med en gennemsnitlig dybde omkring 5 meter og en maksimal dybde på 24 meter.

Den horisontale modelopløsning (Figur 2.1) udgøres af et ustruktureret beregningsnet og er generelt sammensat af trekantede elementer, men kan også omfatte firkantede elementer. For Limfjordsmodellen er størstedelen af området dækket af et trekantet net. I fire områder er der brugt firkantede elementer til at lede vandstrømmen (fra Kattegatskel til Løgstør bred, i Salling sund, Oddesund og Vildsund). Kortprojektion er givet af ETRS-1989-UTM-32.

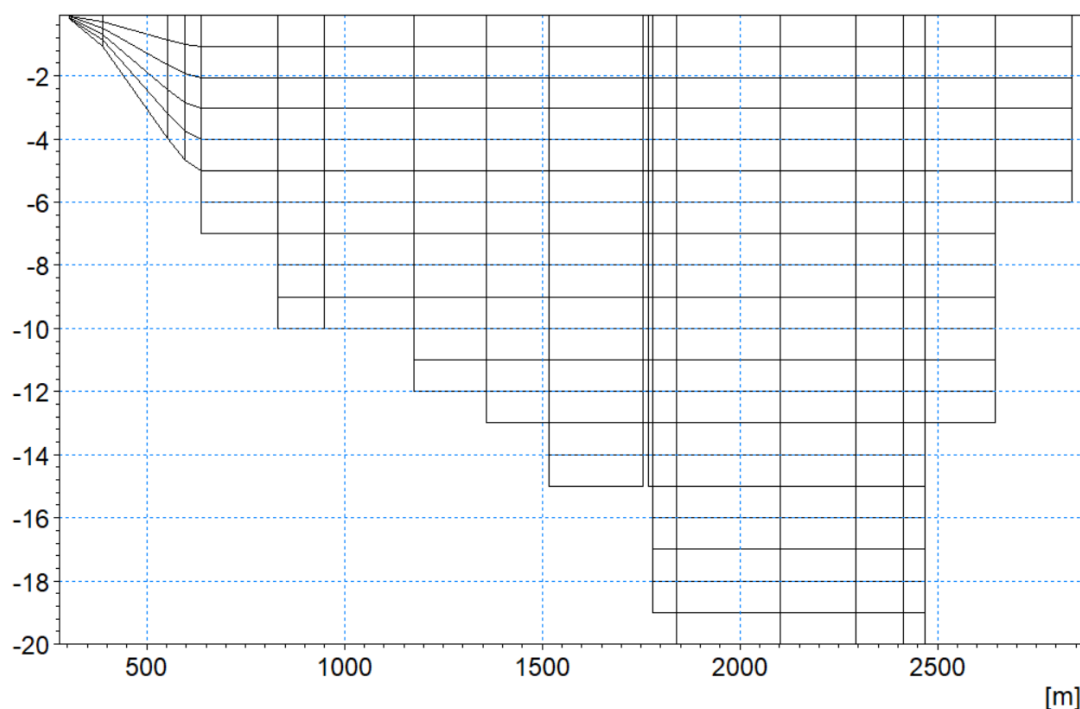
Den horisontale opløsning varierer gradvist fra 150-200 meter til ca. 1.000 meter. Områder vigtige for ålegræsvækst/genopretning har højere opløsning, f.eks. Skive og det nordlige Løgstør) og snævre områder eller områder med komplicerede strømninger (fx nord for Mors) og batymetri (fx vestlige del af Nissum bredning) (Figur 2.1).

Modelbatymetrien (modeldybder) vist i Figur 2.2 (nedenfor) er baseret på en kombination af C-Map navigationskortdata og Kyststyrelsens undersøgelsesdata. Datum for batymetrien er DVR90.



Figur 2.2 Limfjordsbathymeti.

Den vertikale opløsning er struktureret og består af enten sigma-lag eller en kombination af sigma- og z-lag. I Limfjordsmodellen påføres i alt 20 modellag. Vandsøjlen fra overfladen til -5 meter under middelhavoverfladen (MSL) opløses af fem sigma-lag, mens vandsøjlen nedenunder opløses med op til 15 z-lag, med en lagtykkelse på 1 meter. Ved dybde >-20 meter tilpasser bundlaget sig til den faktiske dybde.



Figur 2.3 Eksempel på tværsnit i Hvalpsund i Limfjorden, der viser det lodrette modelmaske bestående af fem sigmalag ned til -5m, z-lag med 1m opløsning under -5m (her ned til den lokale dybde på -20m).

2.1.3 Datainput til modellen

Modellen har to åbne grænser: Den vestlige grænse, der forbinder Limfjorden med Vesterhavet (Thyborøn) og den østlige grænse, der forbinder Limfjorden med Kattegat (Hals).

Modelgrænser er beskrevet ved vandstand, saltholdighed og temperatur.

For Thyborøn-grænsen er vandstandsdata hentet fra Kystdirektoratets målestationer ved Thyborøn Kyst og Thyborøn Havn. Målestation RBK65 (placeret i åbningen mod Nordsøen) bruges til at beskrive randværdier for saltholdighed, og temperaturer fra 2000-2009 og fra 2010-2017 er data udtrukket fra DHIs operationelle Nordsømodel, se DHI 2019b.

For Hals anvendes DMI-data for vandstand fra målestation ved Hals som randværdi, mens målestation NOR4011 bruges som saltholdigheds- og temperaturrandværdier fra 2000-2009, og fra 2010-2017 er data udtrukket fra DHIs operationelle Nordsømodel, se DHI 2019b.

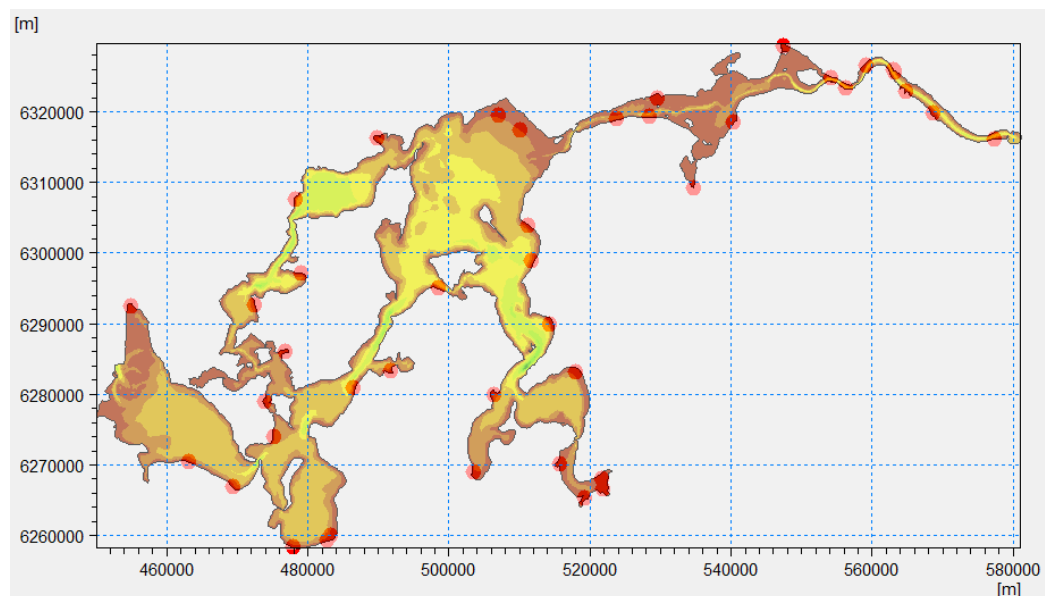
Den atmosfæriske forcering af Limfjordsmodellen er leveret af StormGeo i form af tidsmæssigt og rumligt varierende felter af:

- Vind
- Atmosfærisk tryk
- Nedbør
- Lufttemperatur
- Skydække

De anvendte atmosfæriske data er fra StormGeo WRF meteorologiske model, der dækker Nordatlanten. Dataene leveres i en opløsning på $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ i timetrin.

StormGeo-dataene er kun tilgængelige fra 2009 og frem. Derfor blev der anvendt meteorologiske felter fra Vejr2 i Danmark ($0,15^\circ$, timevis) for perioden 2005-2009, mens meteorologiske felter fra Climate Forecast System Re-analysis (CFSR) ($0,3-0,5^\circ$, timevis) er anvendt for perioden 2002-2005. DMI-målinger fra Thyborøn bruges som atmosfæriske temperaturmålinger. Der anvendes en konstant relativ luftfugtighed på 85 %.

Limfjordsmodellen omfatter en række modelkilder, der repræsenterer ferskvandsafstrømningen fra land til åmundingen. Ferskvandsdataene er tilgængelige baseret på data fra DCE (Aarhus Universitet) for hele Danmark på 4. ordens vandniveau. Disse data blev fordelt ud fra opland og viden om specifikke punktkilder og inkluderet i modellen i henhold til Figur 2.4.



Figur 2.4 Fordeling (røde markeringer) af ferskvandskilder anvendt i Limfjordsfjordmodellen. Kilderne udgør i modellen de største åer som løber til fjorden, og indeholder både diffust bidrag af næringsstoffer og bidrag fra punktkilder.

2.1.4 Modelkalibrering

Den hydrodynamiske model er kalibreret og valideret i henhold til målinger i perioden 2002-2016, se DHI 2019a for detaljer. Derudover har modellens kvalitet været vendt i Teknikergruppen bag kystvandsrådet, og der er udarbejdet to supplerende notater af DHI i den forbindelse (Erichsen 2023a og Erichsen 2023b).

2.2 Biogeokemisk modeludvikling

Den biogeokemiske model bygger oven på den hydrodynamiske model i den numeriske 3D-ligningsløser MIKE ECO Lab. I MIKE ECO Lab beskrives de relevante biogeokemiske processer i modelleringssystemet. Hovedkomponenterne og processerne, der bestemmer status for vandkvaliteten og responsen i økosystemet (f.eks. ændringer i ålegræsbiomassen), indgår i den

biogeokemiske model. De er baseret på eksterne faktorer (meteorologi og næringsstofforsyning). Modellen beskriver omsætningen af organisk materiale og næringsstoffer, både i den pelagiske (vandsøjle) og den bentiske fase (havbund eller sediment). Den pelagiske fase omfatter fytoplankton og næringsstoffer, og bundafdelingen dækker sedimentpuljer af næringsstoffer og udveksling af næringsstoffer mellem sediment- og vandfasen. Endvidere beskriver den bentiske del af modellen biomassen og væksten af bentisk vegetation ved havbunden. Mekanismerne bag den biogeokemiske model og de anvendte ECO Lab-skabeloner er beskrevet i Erichsen & Birkeland (2019).

Som en del af det forberedende arbejde under Kystvandsrådet er der blevet udarbejdet et notat, der gennemgår status og presfaktorer for vandområde Hjarbæk Fjord og Bjørnholms Bugt, Risgårde Bredning, Skive Fjord og Lovns Bredning i Limfjorden, herunder intern belastning (Timmermann & Erichsen, in prep.).

2.2.1 Randværdier

Limfjordsmodellen har, som beskrevet ovenfor, to åbne rande. Randen mod vest ved Thyborøn, og den østlige grænse ved Hals. Profildata af biogeokemiske tilstandsvariabler på randen er udtrukket fra DHIs Nordsømodel. Dokumentation om randbetingelser for den biogeokemiske modeludvikling er givet i DHI (2020).

2.2.2 Forceringer

Data for solstråling beregnes ud fra skydække og anvendes som en tidsmæssig og rumlig varierende forcering, der dækker hele modelområdet.

Arealfordelt atmosfærisk deposition af kvælstof (N) er leveret af AU, Institut for Miljøvidenskab, og afstemt med HELCOM-depositioner (se DHI 2020).

For at estimere koncentrationer af suspenderet sediment er en dynamisk bundforskydnings-spændingsinformation nødvendig. Bølgeparametre fra en Spektral Bølgemodel indgår som modelforcering, herunder signifikant bølgehøjde, bølgeperiode og middelbølgeretning, sammen med strømforhold fra de hydrodynamiske modelresultater.

Dokumentation om modelforcering er givet i DHI (2020).

2.2.3 Næringsstofflørsel

Limfjordsmodellen omfatter kilder med landbaserede næringsstofbelastninger. På Figur 2.4 er kildernes placering vist. Ferskvandsafstrømning fra land indgår i det hydrodynamiske modul, mens koncentrationer af kulstof, kvælstof og fosfor indgår i den biogeokemiske model.

Modelkilderne er angivet som tidsserier med daglige belastninger af uorganiske og organiske næringsstoffer, herunder også totalkvælstof (TN) og totalfosfor (TP). De landbaserede næringsstofbelastninger er baseret på data fra DCE/AU, Institut for Biovidenskab på et 4. ordens farvandsniveau.

Flere detaljer er inkluderet i DHI (2020).

2.2.4 Initialbetingelser

For at kunne initiere en modelsimulering korrekt kræver modellen startbetingelser for de forskellige tilstandsvariable. Startværdier i den pelagiske fase anvendt i Limfjordsmodellen blev estimeret baseret på målinger inden for

Limfjordsområdet. De tilgængelige målinger fra omkring 2002 blev anvendt som ensartede værdier i hele modelområdet, og modellen blev genkørt fire gange for år 2002, inden den blev brugt til kalibrering/validering.

Initialfelter af havbundssedimenter er baseret på sedimentdata fra EMODnet (2016). Initialværdier af bentisk vegetation (f.eks. ålegræs) blev estimeret ved at køre MIKE ECO Lab-modellen med defineret initial biomasse for hele modelområdet i en treårig simuleringsperiode.

I DHI (2020) gives yderligere detaljer om initialværdier.

2.2.5 Modelkalibrering

Den biogeokemiske model er kalibreret og valideret i henhold til målinger i perioden 2002-2016, se DHI (2020) for detaljer. Derudover har modellens kvalitet været vendt i Teknikergruppen bag Kystvandsrådet, og der er udarbejdet to supplerende notater af DHI i den forbindelse (Erichsen 2023a og Erichsen 2023b)

3 Modelscenarier

Som en del af Miljøstyrelsens projekter bag vandområdeplanerne 2021-2027 er det tidligere blevet fastslået, at vandområderne Bjørnholms Bugt, Risgårde Bredning, Skive Fjord og Lovns Bredning og Hjarbæk Fjord er følsomme overfor fosfor og den mængde næringsstoffer, der udledes især i løbet af vækstsæsonen. Det sidste er især gældende for Hjarbæk Fjord, men tidligere analysere har sandsynliggjort, at dette også kan være tilfældet i Bjørnholms Bugt, Risgårde Bredning, Skive Fjord og Lovns Bredning (Erichsen et al. 2021a).

Derfor har der i arbejdet med scenarieudvælgelsen været fokus på at identificere især virkemidler, der kan reducere fosfor igennem vækstsæsonen i begge vandområder. Selve arbejdet bag scenarierne er udført som en del af kystvandsrådsarbejdet, og kommer til at indgå som del af kystvandsrådets rapportering.

Opsummeret er følgende scenarier blevet besluttet og afviklet i den mekanistiske model for Bjørnholms Bugt, Risgårde Bredning, Skive Fjord og Lovns Bredning og Hjarbæk Fjord.

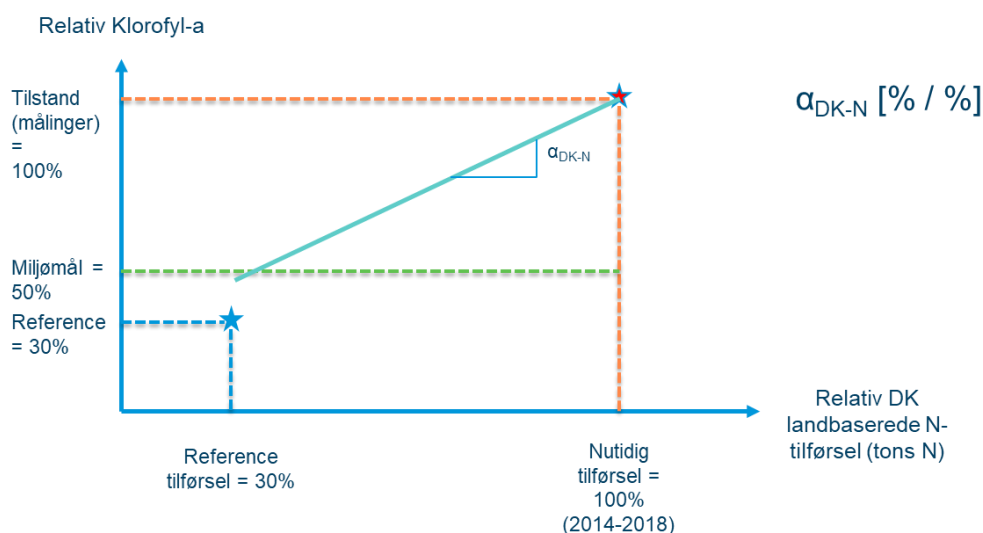
To P scenarier blev identificeret og gennemregnet med den mekanistiske model: Et minimums- og et maksimumsreduktionsscenario. I Hjarbæk Fjord fjernes der henholdsvis ca. 5,5 og 2,7 ton P årligt i maksimum og minimumscenarierne (ca. 13 og 6%), mens der i Bjørnholmsbugt, Risgårde Bredning, Skive Fjord og Lovns Bredning fjernes ca. 9,9 og 2,7 ton årligt (ca. 16 og 5%). Reduktionerne er fordelt stort set jævnt hen over året, dog ses der for maksimumscenariet en lidt større relativ reduktion hen over de sene sommermåneder (juni til oktober).

Punktkildebidraget til Bjørnholms Bugt, Risgårde Bredning, Skive Fjord og Lovns Bredning og Hjarbæk Fjord er relativt beskedent, og det er altovervejende den diffuse tilførsel, som er bestemmende for miljøtilstanden i de to vandområder. Dette gør sig især gældende for kvælstof og i mindre grad for fosfor.

4 Metode

I forrige afsnit er modelscenarierne kort beskrevet. Disse scenarier er afviklet, og modelresultater er oparbejdet og opgjort som effekter på sommer-klorofyl-a og K_d i vækstsæsonen beregnet på tilsvarende måde som beskrevet i Erichsen et al. (2021b).

Som beskrevet i Erichsen et al. (2021b) benyttes modelscenarier i arbejdet bag vandområdeplanerne 2021-2027 i udgangspunktet til at beregne en dosis-respons på de to indikatorer sommer-klorofyl-a og K_d i vækstsæsonen. I Erichsen et al. (2021b) beregnes dosis-respons i forhold til ændringer i årstilførslerne af TN og TP ud fra en forudsætning om, at en reduktion i årstilførslen fordeles %-vis jævnt over året. Det betyder, at en årsreduktion på 10 % i TN-tilførslen fordeles med en 10 % reduktion i januar-tilførslen, 10 % i februar-tilførslen osv. Dosis-respons og tilhørende sammenhænge mellem tilførsel og sommer-klorofyl-a er vist i Figur 4.1.



Figur 4.1 Skematisk illustration af beregning af dosis-respons. Bemærk, at figuren alene beskriver relative forskelle, således at nutidig tilførsel og indikatortilstand udgør 100 %, mens reduktioner beregnes som relative i forhold til dagens tilførsler og tilstand. Derfor har dosis-responsenheden %-ændring i sommer-klorofyl-a koncentration per %-ændring i TN-tilførsel i figureksempel.

Beskrivelsen i Erichsen et al. (2021b) forholder sig til ændringer i TN- og TP-årstilførsler, og indgår i den overordnede fastsættelse af målbelastninger til de danske marine vandområder, men det er alene reduktioner i kvælstoftilførsler, som udregnes som egentlige målbelastninger og indsatsbehov, jf. vandområdeplanerne 2021-2027.

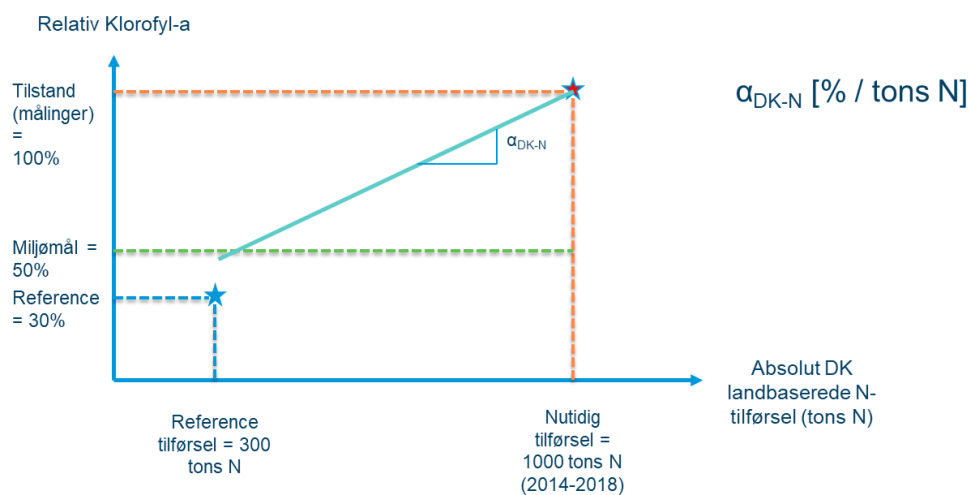
På tilsvarende måde er der, som del af arbejdet bag Kystvandsrådet, udviklet en tilsvarende metode-logik for vandområderne Bjørnholms Bugt, Risgårde Bredning, Skive Fjord og Lovns Bredning og Hjarbæk Fjord. Her benyttes resultater fra scenarieløserne til at beregne en årsækvivalent (eller vekselkurs) mellem specifikke P-reduktioner og helårs TN-tilførsel.

4.1 Årsækvivalenter

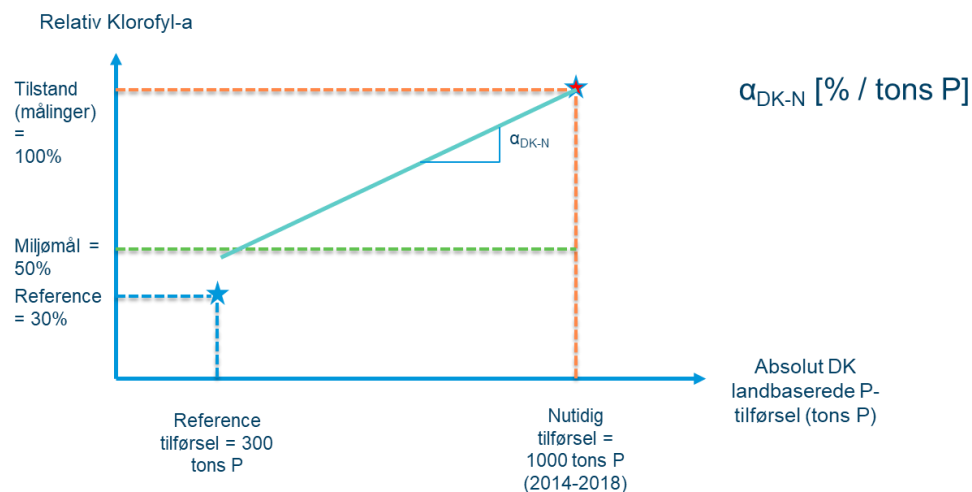
For at evaluere effektiviteten af at reducere i TP-tilførslerne sammenlignes effekterne på indikatorerne sommer-klorofyl-a og K_d i vækstsæsonen med tilsvarende modelresultater bag vandområdeplanerne 2021-2027.

I Erichsen et al. (2021b) blev reduktioner i helårsreduktioner regnet som relative ændringer i både næringsstofftilførsler og i effekter på indikatorerne. I forhold til arbejdet bag kystvandsrådet justeres denne metode, således at der stadigvæk beregnes relativt i forhold til indikatorerne, mens ændringerne i tilførslerne nu opgøres i absolutte reduktioner, se Figur 4.2 og Figur 4.3.

Dermed ændres enheden på dosis-responskurven til fx %-ændring i sommer-klorofyl-a koncentration per tons ændring i henholdsvis TN-tilførsel og %-ændring i sommer-klorofyl-a koncentration per tons ændring i TP-tilførsel, afhængigt af, om der reduceres i TN- eller TP-tilførslerne.



Figur 4.2 Skematisk illustration af beregning af dosis-respons. Bemærk, at figuren beskriver relative forskelle på indikatoren, mens tilførsler opgøres i absolutte tilførsler. Derfor har dosis-respons enheden %-ændring i sommer-klorofyl-a koncentration per tons ændring i TN-tilførsel i figureksempel.



Figur 4.3 Skematisk illustration af beregning af dosis-respons. Bemærk, at figuren beskriver relative forskelle på indikatoren, mens tilførsler opgøres i absolutte tilførsler. Derfor har dosis-respons enheden %-ændring i sommer-klorofyl-a koncentration per tons ændring i TP-tilførsel i figureksemplet.

I dette studie har vi afviklet P-scenarier som beskrevet i afsnit 3, og dermed kan vi sammenligne hældningerne mellem reduktioner i TN (Figur 4.2) og hældninger i TP (Figur 4.3), og beregne en TP-ækvivalent til helårs TN-tilførsler:

$$\text{Ækvivalent} = \alpha_{\text{DK-P}} / \alpha_{\text{DK-N}}$$

Det er denne ækvivalent, som kan benyttes i kystvandsrådets arbejde med reduktionsscenarier i oplandet til vandområderne Bjørnholms Bugt, Risgårde Bredning, Skive Fjord og Lovns Bredning og Hjarbæk Fjord.

5 Resultater og konklusioner

5.1 Effekter fra naboområder og -lande

I den centrale del af Limfjorden, Bjørnholms Bugt, Risgårde Bredning, Skive Fjord og Lovns Bredning og Hjarbæk Fjord er det stort set alene næringsstofftilførsler, tilført fra de tilhørende oplande, der er bestemmende for miljøtilstanden i de to vandområder.

I Timmermann & Erichsen (in prep.) er miljøtilstand, de overordnede næringsstofftilførsler og massebudgetter beskrevet i flere detaljer. Selvom de direkte næringsstofftilførsler er de mest betydende for indikatorerne sommer klorofyl-a og K_d i vækstsæsonen i de to vandområder, vil der også være en effekt af reduktioner i de to vandområder fra reduktioner i nedstrøms vandområderne Nissum Bredning, Kaas Bredning og Venø Bugt, Thisted Bredning og Løgstør Bredning.

Tilsvarende indgår reduktioner i næringsstofftilførsler til Bjørnholms Bugt, Risgårde Bredning, Skive Fjord og Lovns Bredning og Hjarbæk Fjord i de resulterende reduktioner i nedstrøms vandområder, det vil især sige Løgstør Bredning og Langerak (se Erichsen et al. (2021c) for detaljer).

De estimerede reduktionsbehov til andre dele af Limfjorden end Bjørnholms Bugt, Risgårde Bredning, Skive Fjord og Lovns Bredning og Hjarbæk Fjord er imidlertid mindre, hvorfor eventuelle ændringer i indsatser til de to vandområder forventeligt ikke vil påvirke andre dele af Limfjorden sænderligt. Ændres indsatserne væsentligt, kan det dog ikke afvises at det vil påvirke indsatsbehovene i især Løgstør Bredning og Langerak.

5.2 Lokale reduktioner og ækvivalenter

Baseret på modelscenarierne beskrevet i afsnit 3 og metodebeskrivelsen i afsnit 4.1 er ækvivalenter for reduktioner i TP-tilførsler til helårs TN-tilførsler beregnet. Resultaterne er inkluderet i Tabel 5.1. Det er vigtigt at understrege, at modellerne har været afviklet fra 2002-2016, men det er alene modelresultater fra de sidste 5 år, der indgår i analysen. Dette er gjort med henblik på at sikre, at ændringer i næringsstofftilførslerne fra land kan nå at virke over en årrække og dermed sikre at den interne belastning (se Timmermann & Erichsen (in prep.) for beskrivelse af den interne belastning) kan indstille sig i en ny ligevægt.

Tabel 5.1 Samlet P-reduktion, ændring i indsatsbehov og ækvivalenter for reduktioner i TP-tilførsler til helårs TN-tilførsler.

	Fosfor reduktion i kg		Reduktion i indsatsbehov i tons N		Ækvivalent
	P _{min}	P _{max}	P _{min}	P _{max}	
Hjarbæk Fjord	2774	5495	62	123	22
Bjørnholms Bugt, Risgårde Bredning, Skive Fjord og Lovns Bredning	2701	9930	48	175	18

6 Referencer

- /1/ DHI (2017). MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM. Hydrodynamic and Transport Module. Scientific Documentation (http://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast_and_Sea/MIKE_321_FM_Scientific_Doc.pdf, link working on 12-11-2018)
- /2/ DHI 2019a. Development of Mechanistic Models – Mechanistic Model for Limfjorden – Hydrodynamic model documentation, DHI rapport, projektnr. 11822245
- /3/ DHI 2019b. Development of Mechanistic Models – Mechanistic Model for the North Sea – Hydrodynamic model documentation, DHI rapport, projektnr. 11822245
- /4/ Erichsen AC & Birkeland M (2019). Development of Mechanistic Models. Short Technical Description of the Biogeochemical Models Applied for the Mechanistic Model Development. DHI rapport, projektnr. 11822245
- /5/ DHI 2020. Development of Mechanistic Models – Mechanistic Model for Limfjorden – Technical documentation on biogeochemical model, DHI rapport, projektnr. 11822245
- /6/ EMODnet Bathymetry Consortium (2016). EMODnet Digital Bathymetry (DTM) (<http://doi.org/10.12770/c7b53704-999d-4721-b1a3-04ec60c87238>, link working 15-11-2018).
- /7/ Erichsen AC, Nielsen SEB, Timmermann K, Højberg AL, Eriksen J & Pedersen BF (2021a). Muligheder for optimeret regulering af N- og P-tilførslen til kystvandene med fokus på tilførslen i sommerhalvåret. Analyse og kvantificering. [Development og Mechanistic Models, RBMP 2021-2027 \(au.dk\)](#)
- /8/ Erichsen AV, Timmermann K, Larsen TC, Markager S & Christensen J (2021b). Application of the Danish EPA's Marine Model Complex and Development of a Method Applicable for the River Basin Management Plans 2021-2027. Conceptual Method for Estimating Maximum Allowable Inputs. [Development og Mechanistic Models, RBMP 2021-2027 \(au.dk\)](#)
- /9/ Erichsen AC, Timmermann K, Larsen TC, Christensen J, Nielsen SEB & Markager S (2021c). Application of the Danish EPA's Marine Model Complex and Development of a Method Applicable for the River Basin Management Plans 2021-2027. Management Scenario 2e – Land-based nutrient scenarios (additional Wadden Sea P reductions). [Development og Mechanistic Models, RBMP 2021-2027 \(au.dk\)](#)
- /10/ Erichsen AC (2023a). Hjarbæk Fjord. Kort notat omkring iltsvindsmodellering, intern belastning og økosystemforståelse. DHI-notat (projekt nr. 11828567)
- /11/ Erichsen AC (2023b). Hjarbæk Fjord. Kort notat omkring Virksund-dæmningens betydning for iltsvind i Hjarbæk Fjord. DHI-notat (projektnr. 11828567)
- /12/ Timmermann K & Erichsen AC (in prep.). Status og presfaktorer for vandområde Hjarbæk Fjord og Bjørnholms Bugt, Risgårde Bredning, Skive Fjord og Lovns Bredning i Limfjorden.