

Open source 3D modellering af Horsens fjord med pyGETM

Fagligt notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

Dato: 26. januar 2023 | **04**



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Fagligt notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

Kategori: Rådgivningsnotat

Titel: Open source 3D modellering af Horsens fjord med pyGETM

Forfattere: Trolle D.¹, Andersen T.K.¹, Nielsen A.¹, Thodsen H.¹, Tornbjerg H.¹, Bruggeman J.², Bolding K.¹

Institution: ¹Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience, ²Bolding & Bruggeman Aps

Udgiver: Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL: <http://dce.au.dk>

Faglig kommentering: Jesper Philip Aagaard Christensen
Kvalitetssikring, DCE: Signe Jung-Madsen

Ekstern kommentering: Notatet har ikke været i ekstern kommentering.

Bedes citeret: Trolle D., Andersen T.K., Nielsen A., Thodsen, H. Tornbjerg, H., Bruggeman, J., Bolding K., 2023. Open source 3D modellering af Horsens fjord med pyGETM. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 19 s – Fagligt notat nr. 2023|04
https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2023/N2023_04.pdf

Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse

Sammenfatning: Notatet redegør for opsætning og test af den hydrodynamiske General Estuarine Transport Model (pyGETM) for Horsens fjord.

Emneord: Hydrodynamisk modellering, fjorde, open source, 3D.

Foto forside: Dennis Trolle

Sideantal: 19

Indhold

Forord	4
Sammenfatning	5
1 Indledning	6
1.1 Baggrund	6
1.2 Formål og afgrænsning	7
2 Metoder	8
2.1 Modelbeskrivelse	8
2.2 Modelkode og installation	9
2.3 Datagrundlag	9
3 Resultater	12
3.1 Gridstørrelse og beregningstid	12
3.2 Simulering af temperatur og saltdynamik	12
3.3 Tracer eksperiment	16
4 Perspektiver	18
4.1 Perspektiver for brugen af pyGETM for danske fjorde	18
5 Referencer	19

Forord

Dette korte notat er skrevet på baggrund af et mindre forskningsprojekt finansieret igennem Promilleafgiftsfonden, og er gennemført via et samarbejde mellem Aarhus Universitet (AU) og SEGES Innovation. Projektets formål var at opsætte og teste den nye generation af den hydrodynamiske model General Estuarine Transport Model (pyGETM) for Horsens fjord. Tilvejebringelse og processering af data, opsætning og kørsel af model blev foretaget af AU. SEGES har bidraget med diskussioner af datatilgængelighed og model output undervejs i projektet, herunder et afsluttende møde ved Horsens Kommune i december 2022. Notatet beskriver kort baggrunden for modellen der er brugt, samt antagelser og datagrundlag for modelopsætningen til Horsens fjord. Indholdet af notatet har hovedsageligt til formål at dokumentere at modelopsætning for Horsens fjord er gennemført, samt redegøre for datagrundlaget herfor.

Sammenfatning

Notatet redegør kort for baggrunden for den hydrodynamiske model pyGETM, samt antagelser og datagrundlag for modelopsætningen til Horsens fjord. Det er første gang at den nye generation af GETM modellen, nu kaldet pyGETM, testes for et dansk område. Det er samtidig første skridt på vejen, ift. at også at kunne opsætte og teste en økologisk model, som er koblet til den tre-dimensionelle pyGETM model. Notatet dokumenterer, at modelopsætningen er gennemført. Ud over at teste det nye ligningsapparat i pyGETM var et af formålene med projektet også at teste muligheden for at gennemføre simuleringer, der dækker lange tidsperioder. Forskellige gridopløsninger varierende fra 115 m til 345 m opløsning blev testet. Ved en gridopløsning på 345 m er der lavet modelsimuleringer for en 20-årig periode (1994-2014), hvilket tager ca. 60 timer på en workstation computer med flere kerner. Denne gridopløsning betyder at der især ved indsnævring, som i området ved den dybe sejlrende i den østlige del af fjorden, blot er få gridbokse på tværs af vandområdet. Modellen var i stand til at simulere lagdeling i temperatur og salt i området ved den nærmeste målestation umiddelbart øst for udmundingen af fjorden, og også den ikke-lagdelte del af inderfjorden. Den relativt grove gridopløsning i sejlrenden betød dog at pyGETM i mindre grad var i stand til at simulere lagdelingen i den smalle sejlrende i den østlige del. Dette kunne til en vis grad udbedres ved at modificere gridet omkring sejlrenden og gøre dette dybere, hvilket er en fremgangsmetode, som også tidligere er brugt i et modelstudie for fjorden. Modellens formåen til at simulere lagdeling i sejlrenden kan sandsynligvis forbedres ved at modificere gridet yderligere, eller ved at anvende en finere gridopløsning, hvilket så imidlertid vil gøre modellen mere beregningstung. I slutning af projektperioden blev der udgivet en batymetri med en opløsning på 50 m for den danske økonomiske zone. Data herfra kunne inddrages i en eventuel fremtidig opdatering af modellen.

1 Indledning

1.1 Baggrund

Koblede hydrodynamiske-økologiske modeller udvikles og anvendes i dag indenfor både forskning og forvaltning. Dette indebærer typisk, at modeller opsættes og kalibreres til det enkelte system, som de tilsigter at beskrive (eksempelvis Horsens Fjord), hvilket samtidig muliggør en målrettet forvaltning af netop dette område. Der findes i dag en lang række forskellige modelværktøjer, med forskellige styrker og svagheder. Når et større vandområde skal simuleres, hvor der er væsentlige gradienter i salt, temperatur m.m. i både horisontal og vertikal retning, er det ofte nødvendigt med en tre-dimensionel (3D) model for at kunne opløse området med disse gradienter. Modellen *General Estuarine Transport Model* (GETM) er netop én af disse modeller. Denne model udmærker sig ved at den er gennemtestet for danske farvande og anvendes bl.a. operationelt af Forsvarets Center for Operativ Oceanografi (FCOO). Samtidig kan GETM via Framework for Aquatic Biogeochemical Models (FABM) af Bruggemann og Bolding (2014) kobles til forskellige økologiske modeller som eksempelvis Water Ecosystems Tool (WET) af Hu et al. (2016) og Schnedler-Meyer et al. (2022). Første version af GETM blev udviklet i 00erne (Burchard et al. 2004, Stips et al. 2004). Modellen er open source og udvikles løbende, og en ny generation af modelkoden, *pyGETM*, er netop udviklet, og testet i dette projekt.

Strømninger i de danske farvande og fjorde

For at beskrive strømningerne i en fjord, som er under indflydelse af tilstrømmende ferskvand, tidevand, corioliskraft, samt termo- og halokline cirkulationer, er det nødvendigt med gode randbetingelser ved fjordens udmunding. De nationale overvågningsprogrammer, som har eksisteret siden 1989, har tilvejebragt et detaljeret datagrundlag for danske fjorde og søer. Der er typisk indsamlet profil data fra en række stationer inde i fjorden samt i det omgivende farvand hver anden uge eller én gang om måneden. Dette giver et udmærket datasæt til eksempelvis validering af modellens formåen ift. at simulere lagdeling og algernes sæsondynamik. Det er imidlertid ikke nødvendigvis en passende opløsning som randbetingelse til en hydrodynamisk fjordmodel, hvor eksempelvis tidevandsdynamik og saltholdighed kan variere væsentligt imellem de enkelte prøvetagninger. Når en detaljeret fjordmodel skal opsættes, anvendes der derfor typisk også en større og ofte grovere modelopsætning for et langt større område (eksempelvis hele Nordsø og Østersøområdet), som kan give randbetingelser til en fjordmodel i en langt finere rummelig opløsning.

Storskaladynamikker som har indflydelse på fjorde

Danmark er omgivet af hav til alle sider, og de danske fjorde er under indflydelse af storskaladynamikker i Nordsøen (Vesterhavet), Skagerrak, Kattegat, Bælthavet og Østersøen. Vandet i Kattegat er en blanding af vand fra Skagerrak (og dermed Nordsøen og Atlanterhavet) og vand fra Bælthavet (og dermed Østersøen). Derudover er der lokale processer som har indvirkning på f.eks. temperatur, salt og næringssalte. Hvordan fordelingen er af henholdsvis vand fra Nordsø og Østersø er komplekst og et resultat af en række forskellige

processer, der hver især skal beskrives korrekt, for at det samlede billede er retvisende.

Normalt er vandet fra nord karakteriseret ved at være salt og "varmt" - mens vandet fra syd er karakteriseret ved at være mere ferskt og koldt. Dynamikken i systemet betyder at det tunge vand fra nord vil have en tendens til at strømme langs bunden ind i Kattegat og det lette vand fra Østersøen vil flyde nordpå i overfladen. Dette skaber en to-lags struktur, som hele tiden varierer på grund af den blanding, der foregår i Kattegat - som funktion af f.eks. vind-opblanding og blanding på grund af turbulens ved bunden. Det er vigtigt at denne to-lags struktur også er passende beskrevet, når dette anvendes som randbetingelse til en fjordmodel.

Mængden af henholdsvis vand fra nord og vand fra syd skifter hele tiden og er på kortere tidsskala bestemt hovedsageligt af de meteorologiske forhold over hele Nordsø-Østersø regionen. Visse forhold vil medføre indstrømning fra nord mod syd og derfor en større mængde af saltvand, hvorimod andre forhold vil medføre udstrømning fra Østersøen med lavere salinitet til følge. Tidsskalaen for disse variationer er typisk på en til to uger svarende til lavtrykspassager henover Skandinavien.

Vigtigheden af de lokale processer varierer afhængig af hvilke variable det drejer sig om. Vandtemperaturen er hovedsageligt bestemt af de lokale processer, som foregår i overgangszonen mellem atmosfæren og vandet, hvor temperaturen vil være en funktion af de varmefluxe der forekommer - latent, sensible og netto langbølget stråling. Desuden er den direkte opvarmning fra solens stråler - som trænger ned i vandet - også vigtig. For saliniteten er forholdene anderledes, idet saltholdigheden er en funktion af processer, der typisk foregår langt væk. Kilden til ferskvand er især vandløb - hvis vi et øjeblik ser bort fra forskellen mellem nedbør og fordampning - og vandet fra disse vandløb vil til sidst transporteres til Kattegat. Et transekt fra Nordsøen til den nordligste del af den Botniske bugt viser generelt en gradient i salinitet fra ca. 35 PSU til omkring 0. For næringssalte kompliceres tingene yderligere idet næringssalte transformeres via biogeokemiske processer under transporten - hvorimod salt er konservativt.

1.2 Formål og afgrænsning

Formålet med dette projekt er at opstille og teste den nyeste generation af pyGETM modellen for Horsens Fjord. Projektet omhandler udelukkende en opsætning og test af den hydrodynamiske model, herunder tilvejebringelse og formatering af alt data til modelopsætning. Projektet tilsigter at lave en modelopsætning baseret på åbne tilgængelige datakilder, og samtidig eksperimentere med effekten af forskellige grid-detajleringsgrader på modellens beregningstid, hvor det tilsigtes at muliggøre lange simuleringer (f.eks. 10-20 år). pyGETM modellen kan via FABM desuden kobles til forskellige økologiske modeller, herunder WET, hvilket dog ligger udenfor rammerne af nærværende projekt. Dette projekt er imidlertid første skridt på vejen ift. at opsætte og kalibrere en koblet hydrodynamisk-økosystem model.

2 Metoder

2.1 Modelbeskrivelse

Den nye generation af GETM-modellen, *pyGETM*, er en re-implementering af GETM-koden, som har mere end 20 års udvikling bag sig. Baggrunden for re-implementeringen skyldes hovedsageligt to ting: 1) softwareudvikling har ændret sig meget over de sidste 20 år og nye værktøjer er kommet til, som gør kodevedligehold og kodetestning topprioriteter, 2) den gamle version var blevet svær at vedligeholde og der eksisterede ikke én "master" version, hvor forskellige nye features umiddelbart kunne samles.

Den oprindelige version er skrevet 100 % i Fortran. Den nye version er implementeret delvist i Fortran og delvist i Python. Brugen af Python kan potentielt gøre det væsentlig nemmere at opsætte, afvikle og plote output fra en ny model. Valget af denne opsplitning kan dog umiddelbart stadig virke lidt mærkelig for en beregningstung tre-dimensionel model – når Python beviseligt er langsommere end kompileret Fortran kode. Der er derfor lagt et stort arbejde i at implementere de beregningstunge elementer i Fortran og lade Pythonkoden, som er væsentlige nemmere at læse, være ansvarlig for infrastruktur og konfiguration. En yderligere faktor – som ikke skal underestimeres – er at antallet af Pythonudviklere er mange gange større end Fortranudviklere. Så jo mere der kan gøres i Python, jo større fremtidig udviklingspotentiale er der.

pyGETM løser de styrende RANS – Reynolds Averaged Navier Stokes – ligninger på et beregningsgrid. De prognostiske variable er vandstand, tre hastighedskomponenter, salt og temperatur. Derudover er der mulighed for en række diagnostiske output. RANS er et sæt af koblede ikke-lineære partielle differentiale-ligninger som for at kunne løses kræver: 1) initial betingelser for de prognostiske variable, 2) randbetingelser på modelområdet åbne rande (hvis sådanne findes), 3) randbetingelse ved bund og ved air-sea interface. Se afsnit 2.2 for yderligere information om nødvendige konfigurations- og input-data.

Modellen fremskrives i tid ved at ligningerne integreres ved numerisk integration med et integrationstidsskridt typisk i størrelsesordenen 10 sekunder. Modelområdet i *pyGETM* opløses horisontalt i et equidistant lat/lon grid. I den vertikale retning opløses modelområdet i "sigma koordinater", hvilket i praksis betyder at grid vil følge det fysiske forløb i dybdekurverne, og at mere lavvandede områder får en højere opløsning, da antallet af vertikale beregningslag er det samme uanset total dybde.

Realistiske - lange - simuleringer kræver typisk store computerressourcer. *pyGETM* er udviklet til at kunne bruge flere CPU'er til simulering af et setup. Dette gøres ved "subdomain decomposition", hvor det oprindelige modelområde opdeles i en række mindre delområder, hvor beregning i hver af disse delområder udføres af en enkelt CPU. Denne opdeling kræver stadig udveksling af data mellem de enkelte subdomæner således at horisontale gradienter kan beregnes korrekt.

pyGETM kan kobles til bio-geokemiske modeller, der opfylder specifikationerne i FABM. Kobling foregår ved at der inkluderes en FABM-konfigurationsfil. Derudover skal der også specificeres eksterne data, som er nødvendige for en given bio-geokemisk model såsom næringssalttilførsel.

2.2 Modelkode og installation

Hele ligningsapparatet og koden bag pyGETM er open source og der anvendes Git-versionskontrol til at holde styr på ændringer i koden. Procedure for download og kompilation af modelkoden er beskrevet nærmere på: <https://github.com/BoldingBruggeman/getm-rewrite>. Når pyGETM er mere modnet og testet til version 1.0, vil koden flytte til et andet permanent sted på Github.

For at arbejde med modellen anvendes Anaconda Python distributionen (gratis tilgængelig), samt eksempelvis en gratis Intel Fortran compiler, som kan downloades via Intel's oneAPI Toolkit. Når disse er installeret opsættes et lokalt Python-miljø, som indeholder alle nødvendige Python-biblioteker til eksekvering af model. Selve modeleksekvering kan afvikles via et Python-terminal vindue, eller via en grafisk Python-brugerflade så som Spyder, der også er en del af Anaconda Python distributionen.

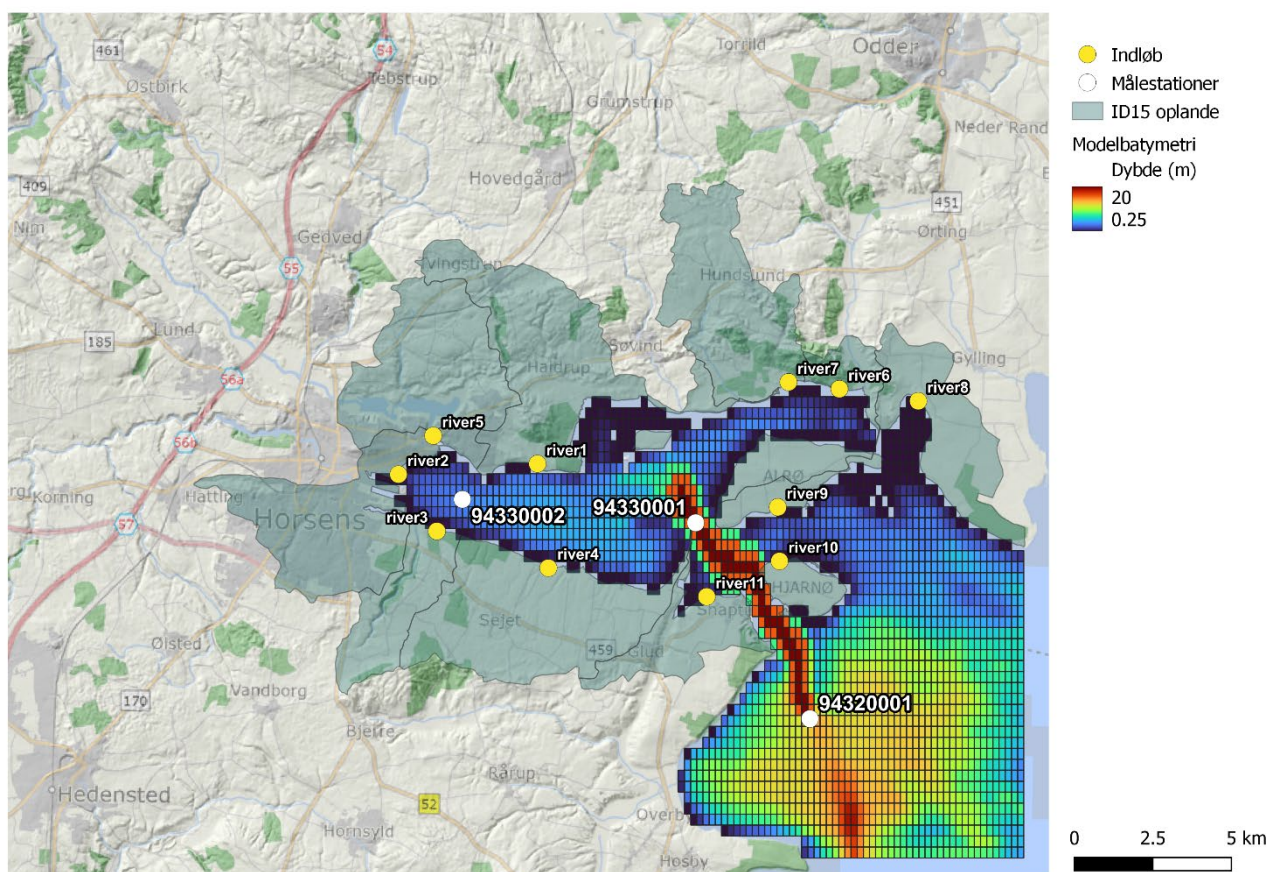
2.3 Datagrundlag

For at kunne opsætte og køre pyGETM modellen kræves som minimum en række inputdata, der inkluderer:

- Batymetri (dybdekort) – som definerer det fysiske modelområde
- Meteorologiske forhold
- Randbetingelse ved fjordens udmunding (varierende vandstand, salt og temperaturprofiler i eksempelvis time-opløsning)
- Vandføring i indløb
 - Temperatur og saltindhold i indløb (option)
 - Ekstern næringssaltbelastning (kun nødvendigt hvis pyGETM modellen skal kobles med økologisk model som f.eks. WET).

Batymetri

For batymetri findes der forskellige åbne kilder. På globalt plan er GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) et af de meste anerkendte dybdekort. Her kan dybdekort for de danske farvande downloades i relativt grov opløsning (ca. 450 x 450m). For det europæiske område er datasættet fra EMODnet (European Marine Observation and Data Network) lige nu det mest detaljerede åbne datasæt. Her kan dybde data fra alle danske fjorde downloades i en opløsning på ca. 115 x 115 m (via denne portal: <https://portal.emodnet-bathymetry.eu/>). I dette projekt er der derfor anvendt dette datasæt til at generere batymetriske kort i forskellige gridopløsninger (hhv. 115 m, 230 m og 345 m). QGIS blev anvendt til at resample gridstørrelserne, og Serval plugin blev desuden anvendt til at lave mindre justeringer (eksempelvis til at lukke forbindelsen mellem Alrø og Jylland, hvor den landfaste overgang ikke var synlig i det originale EMODnet data). Mod slutningen af dette projekt (november 2022) har Styrelsen for Dataforsyning og Infrastruktur netop frigivet Danmarks Dybdemodel (DDM), som er en digital model med middeldybder, der dækker Danmarks eksklusive økonomiske zone (EEZ). Denne dybdemodel har en opløsning på 50 meter, og er nu også frit tilgængelig.



Figur 1. Batymetri repræsenteret i modelgrid i 345 m opløsning, hvor sejlgrende er tydeliggjort, samt placering af NOVANA-overvågningsstationer (det er hovedsageligt 9433002 i den indre fjord i vestlige ende, samt 94330001 som er placeret i den dybe sejlgrende sydvest for Alrø, som har konsistente lange tidsserier).

Meteorologiske forhold

Meteorologiske data er tilgængelige fra forskellige kilder, herunder eksempelvis observationer fra Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) og reanalyseret modeldata fra European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). ERA5-data fra ECMWF, har den fordel, at det er kvalitetssikret og reanalyseret tilbage i tid baseret på observationer (Dee et al. 2011), og dermed udgør en konsistent og sammenhængende tidsserie (1-times intervaldata startende i 1950 i en opløsning på ca. 30 x 30 km), som principielt kan tilvejebringes for alle positioner på kloden. I dette projekt er der anvendt lokal ERA5-data for Horsens Fjord. pyGETM tillader en vis fleksibilitet ift. hvilke meteorologiske data og enheder der indlæses. I dette projekt anvendes:

- 10 m vindhastighedskomponent i x-retning (U10, m/s)
- 10 m vindhastighedskomponent i y-retning (V10, m/s)
- Lufttryk (hPa)
- 2 m luft temperatur (°C)
- Dugpunktstemperatur (på Engelsk *dew-point temperature*, °C)
- Skydække fraktion (varierende mellem 0-1).

Randbetingelser

Enhver lokal modelopsætning har behov for specifikation af randbetingelser. Typisk vil disse være baseret på enten observationer eller data fra en anden

model, der dækker et større område og hvorfra relevante variable kan udtrækkes og benyttes. Yderligere er der den mulighed at foreskrive en analytisk løsning af randværdi problemet. Dette kan f.eks. være - zero-gradient - hvilket vil sige at modellen antager at værdien på randen (som jo er ubekendt) er lig med værdien lige inden for randen. Det er en type rand, der giver god mening, hvis strømmingen udelukkende er i én retning - f.eks. ved en å/flod. Det er dog ikke en optimal løsning, hvis strømmen hen over randen kan være i begge retninger, da det så ikke er muligt at få import af f.eks. salt ind i model området. På grund af de generelle forhold der gælder i Kattegat, som også har indflydelse på randen ved Horsens Fjord, er det nødvendigt med randbetingelser i relativ høj tidsopløsning - således at man kan tage højde for de variationer der er - som er en funktion af mængden af henholdsvis Nordsø- og Østersøvand.

Som randbetingelse ved fjordens udmunding har der derfor anvendt data fra Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS), som er et reanalyseret datasæt i tidslig opløsning på en time, og rummelig opløsning på ca. 4 km for de danske farvande. Det er SMHI (Sveriges Meteorologiske og Hydrografiske Institut), som er ansvarlig for modelafviklingen - data kan downloades via Copernicus Marine Data Store, <https://doi.org/10.48670/moi-00013>).

Indløb fra opland

For at beskrive tilførslen af vand fra oplandet er der i dette projekt anvendt data fra mindre deloplande på ca. 1500 ha (ID15-oplande). Vandtilførslen fra hvert ID15 er baseret på en kombination af måledata og data fra DK-modellen - en national hydrologisk modelopsætning, som genererer vandføring i daglig opløsning. Data på ID15-niveau kombinerer data fra DK-modellen for arealer nedstrøms målestationer, med målte afstrømninger for arealer opstrøms målestationer. Dertil adderes data fra eventuelle punktkilder med udløb direkte til havet (Stisen et al., 2019; Thodsen et al. 2021).

3 Resultater

3.1 Gridstørrelse og beregningstid

Der blev udført en række eksperimenter med forskellige gridstørrelser, for at kvantificere effekten af gridopløsning på beregningstiden for pyGETM. De viser naturligvis at beregningstiden stiger jo højere en opløsning der anvendes (Tabel 1).

Tabel 1. Simuleringstid ved brug af forskellige gridopløsninger for Horsens Fjord. Bemærk at disse tider kun dækker simulering af fysikken.

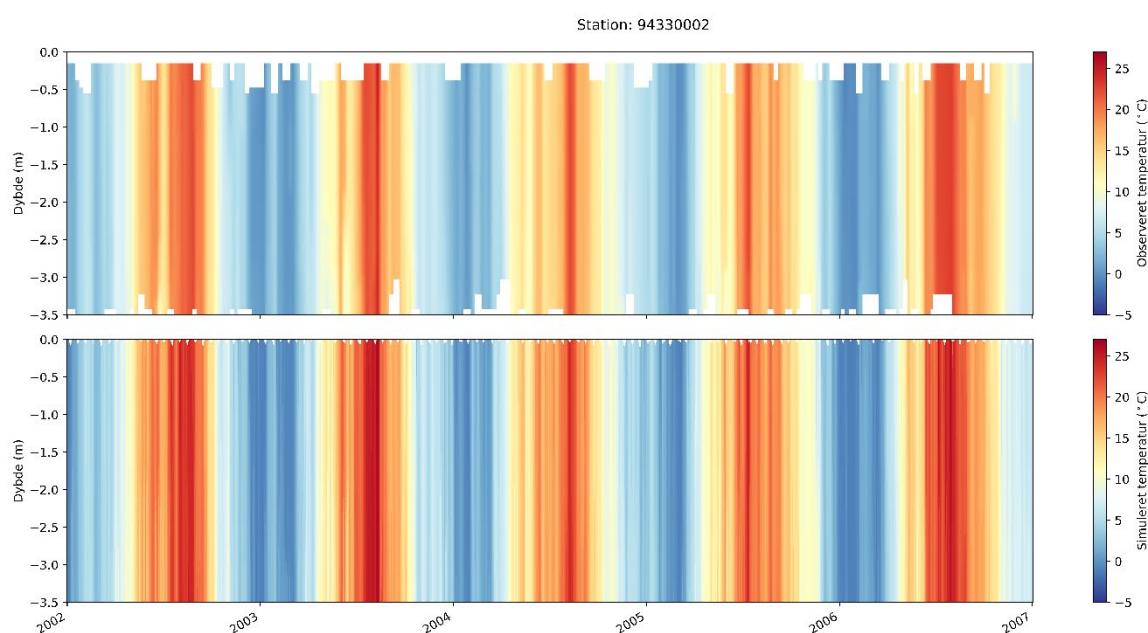
Gridopløsning	SYPD (Simulated Years Per Day)
115 m (24 cores)	~1
230 m (24 cores)	6.5
345 m (12 cores)	8.5

For at kunne afvikle en lang simulering på 20 år, som vil muliggøre sammenligninger mellem model og observationer af temperatur og salt i et langt tidsperspektiv, blev det besluttet at anvende et modelgrid i 345 m opløsning, og med 20 vertikale lag. En 20-årig simulering med denne opløsning tager ca. 60 timer, når modelområdet er opdelt i 12 subdomæner, som hver især kører på en CPU-core (kerne). Der blev også eksperimenteret med modelkørsler med inddeling i forskellige antal subdomæner. Jo flere subdomæner der anvendes, jo flere kerner kan der anvendes til beregningen, men til gengæld stiger tiden der bruges på at kommunikere og udveksle data imellem de enkelte subdomæner. I dette projekt sås at 12 subdomæner gav den mindste beregningstid. Det optimale antal subdomæner vil sandsynligvis ændre sig, hvis pyGETM kobles til en økologisk model, og derfor vil kræve flere beregninger i den enkelte celle.

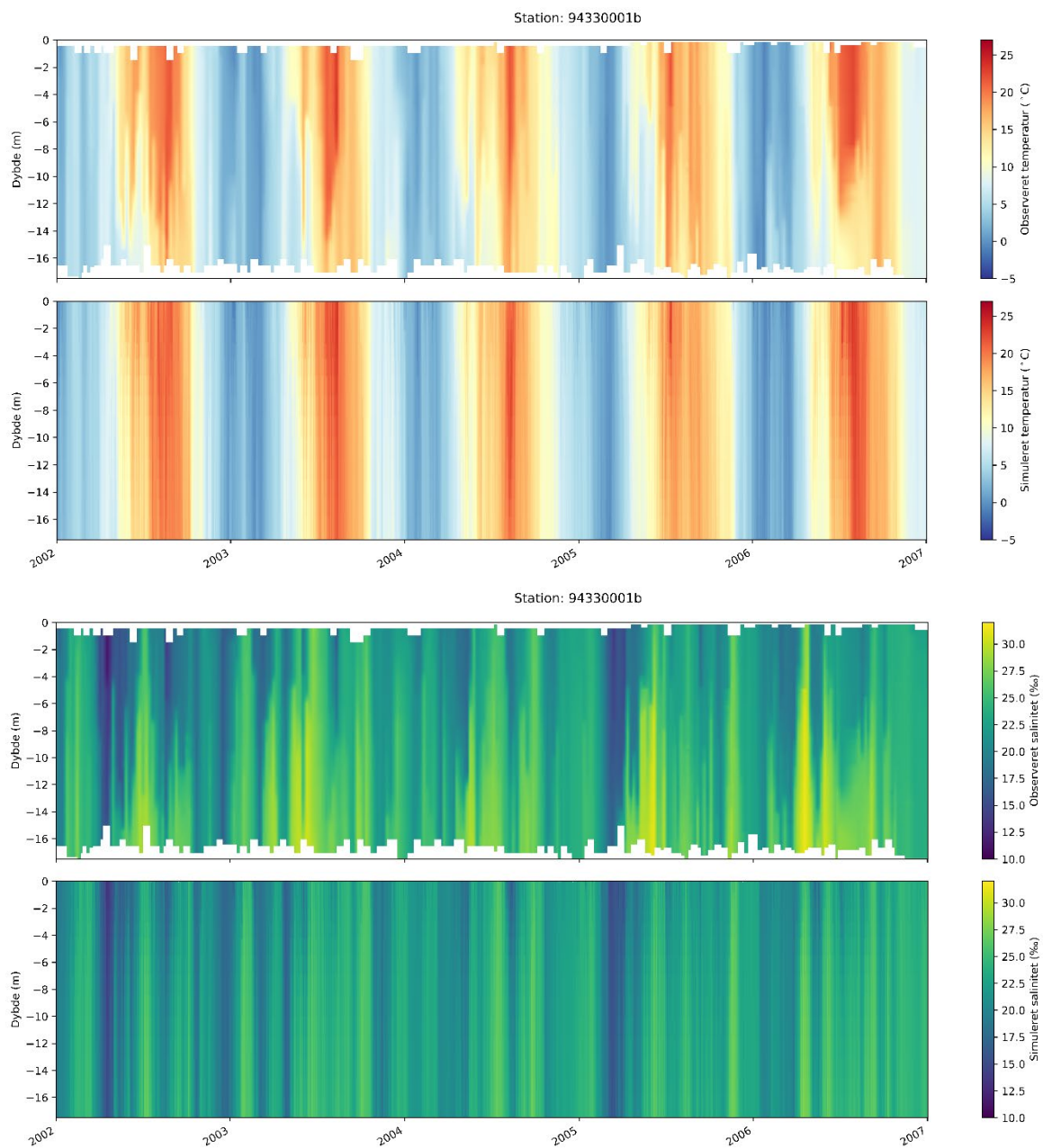
3.2 Simulering af temperatur og saltdynamik

For at vurdere pyGETM modellens evne til at simulere thermo- og saltdynamik samt strømninger, og de resulterende temperaturer og salinitetsprofiler forskellige steder i fjorden, er der gennemført en simulering over længere tid (1994-2014), og samtidig i mindre grad kalibreret på en af de få parametre ($k_{\min}$) der typisk justeres på i en ren fysisk model. Ud over en kalibrering af de fysiske parametre i pyGETM er der også eksperimenteret med forskellige måder at repræsentere sejlrenden i Horsens Fjord. Den er vigtig for transporten af salt ind i fjorden. Ved brug af en gridopløsning på 345 m, som muliggør meget lange simuleringer, bliver de dybeste steder i sejlrenden midlet ud over et større gridområde, og dermed mere lavvandede. Dette resulterede i en for lav transport af salt ind i bunden af fjorden, og dermed også mindre lagdeling. For bedre at kunne repræsentere sejlrenden og dens effekter på vand og saltudveksling, blev Serval plugin brugt til at modificere batymetrien repræsenteret i modellen, og derved lave en dybere rende i modellen (tilsvarende et tidligere 3D-modelstudie af Horsens Fjord af Larsen et al. 2013). Dette resulterede i en lidt bedre beskrivelse af dynamikken i salinitet ved bunden, og også en bedre simulering af fjordens lagdeling. Modellen er generelt i stand til at simulere den sæsondynamik, der ses i både temperatur og salt i inderfjorden (Fig. 2), og også i nogen grad den lagdeling, der forekommer lige ved

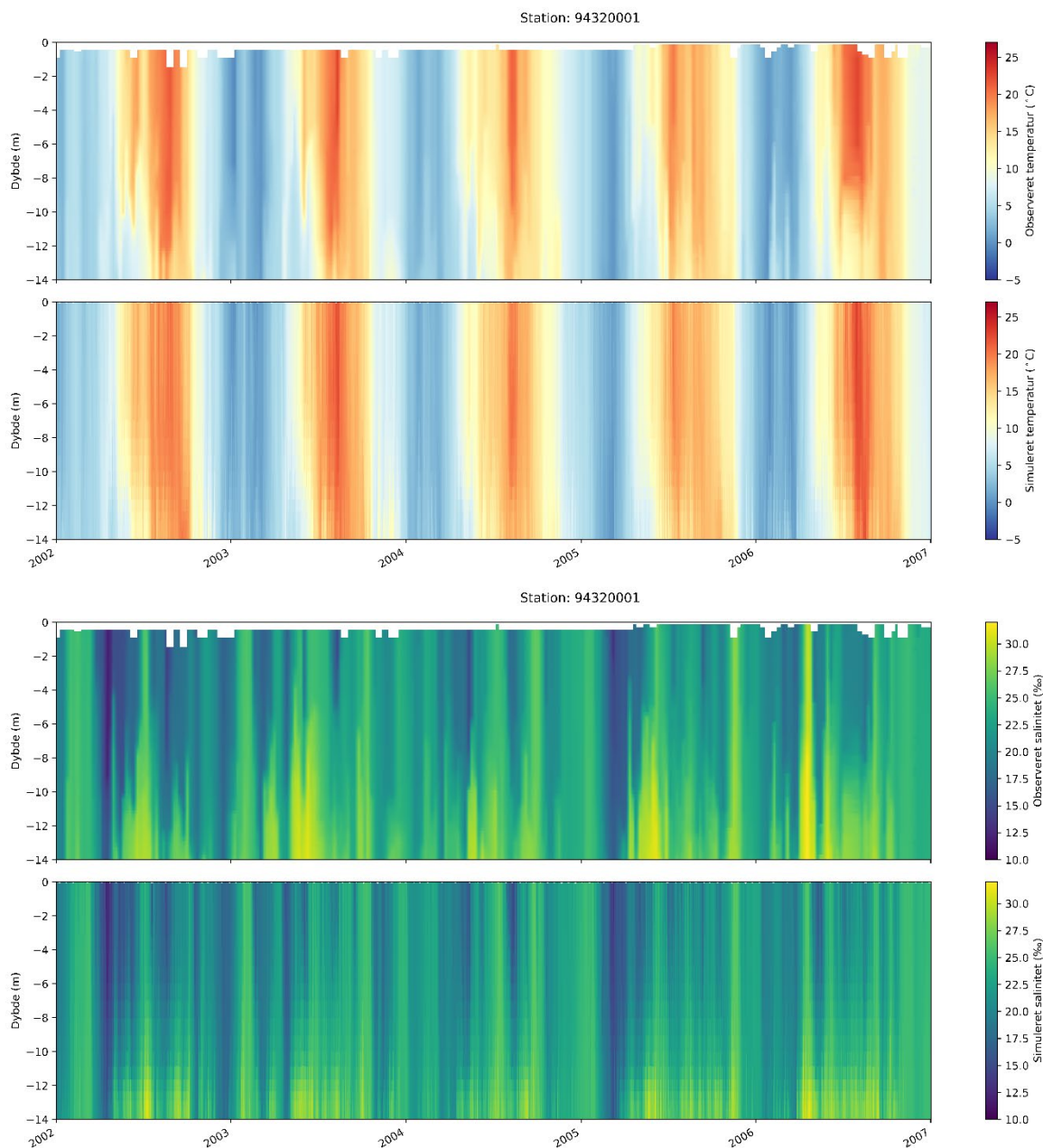
sejlrenden – dog underestimeres de vertikale koncentrationsgradienter i salinitet generelt ved sejlrenden, hvilket er medvirkende til at modellen også i mindre grad kan simulere temperaturlagdelingen lokalt i sejlrenden (Fig. 3). I området umiddelbart øst for udmundningen af fjorden simulerer modellen bedre den observerede lagdeling i både salt og temperatur (Fig. 4).



Figur 2. Observeret og simuleret daglig temperatur (øverst) og saltdynamik (nederst) for den inderste del af fjorden (st 94330002). Observerede profilmålinger er lineært interpoleret over dybde og tid for at være sammenlignelig med model output.



Figur 3. Observeret og simuleret daglig temperatur (øverst) og saltdynamik (nederst) for stationen i sejlrende i den østlige del af fjorden (st 94330001). Observerede profilmålinger er lineært interpoleret over dybde og tid for at være sammenlignelig med model output.

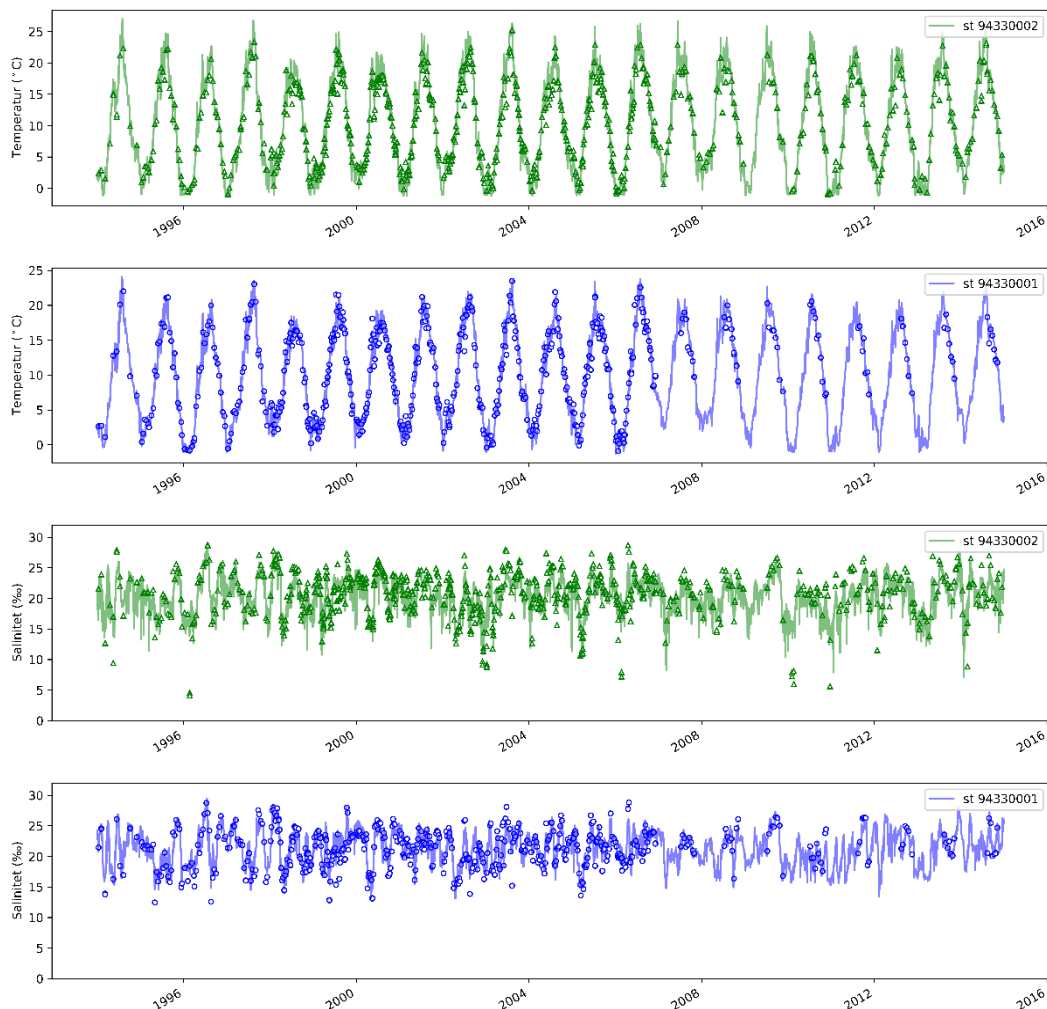


Figur 4. Observeret og simuleret daglig temperatur (øverst) og saltdynamik (nederst) ved nærmeste målestation umiddelbart øst for fjordens udmunding (st 94320001). Observerede profilmålinger er lineært interpoleret over dybde og tid for at være sammenlignelig med model output.

Til kalibrering af pyGETM modellen indstilles typisk blot på meget få parametre, inklusiv "Jerlov" typen, som er et udtryk for vandets generelle klarhed, $k_{\min}$ (minimum turbulent kinetisk energy [m^2/s^2]), og i nogle tilfælde også korrektionsfaktorer til justering af meteorologisk forcering (f.eks. til at justere en mulig systematisk bias i forceringsdata). Relativt eutrofe områder som Horsens Fjord har typisk en høj lysdæmpning grundet bl.a. alger, hvilket kan afspejles i Jerlov type III. Derfor blev der anvendt Jerlov type III for Horsens Fjord modellen, samtidig med $k_{\min}$ blev nedjusteret (til $1\text{e-}8$) i et forsøg på at forbedre modellens evne til at simulere lagdeling i sejlrenden.

Der findes tidligere eksempler på tre-dimensionel hydrodynamisk modellering af Horsens Fjord, men disse har typisk kun simuleret et enkelt år. Det er således yderst sjældent at der laves modelkørsler, som beskrevet i dette notat,

der forløber sig over 20 år. Igennem hele den 20-årige periode er modellen generelt i høj grad i stand til at gengive sæson- og år-til-år variationen i temperatur og saltindhold i overfladen på de to stationer i fjorden (Fig. 5.). Der ses ikke en systematisk opadgående eller nedadgående bias i den simulerede salinitet, hvilket indikerer, at den simulerede vand- og saltudveksling over den åbne rand er retvisende.



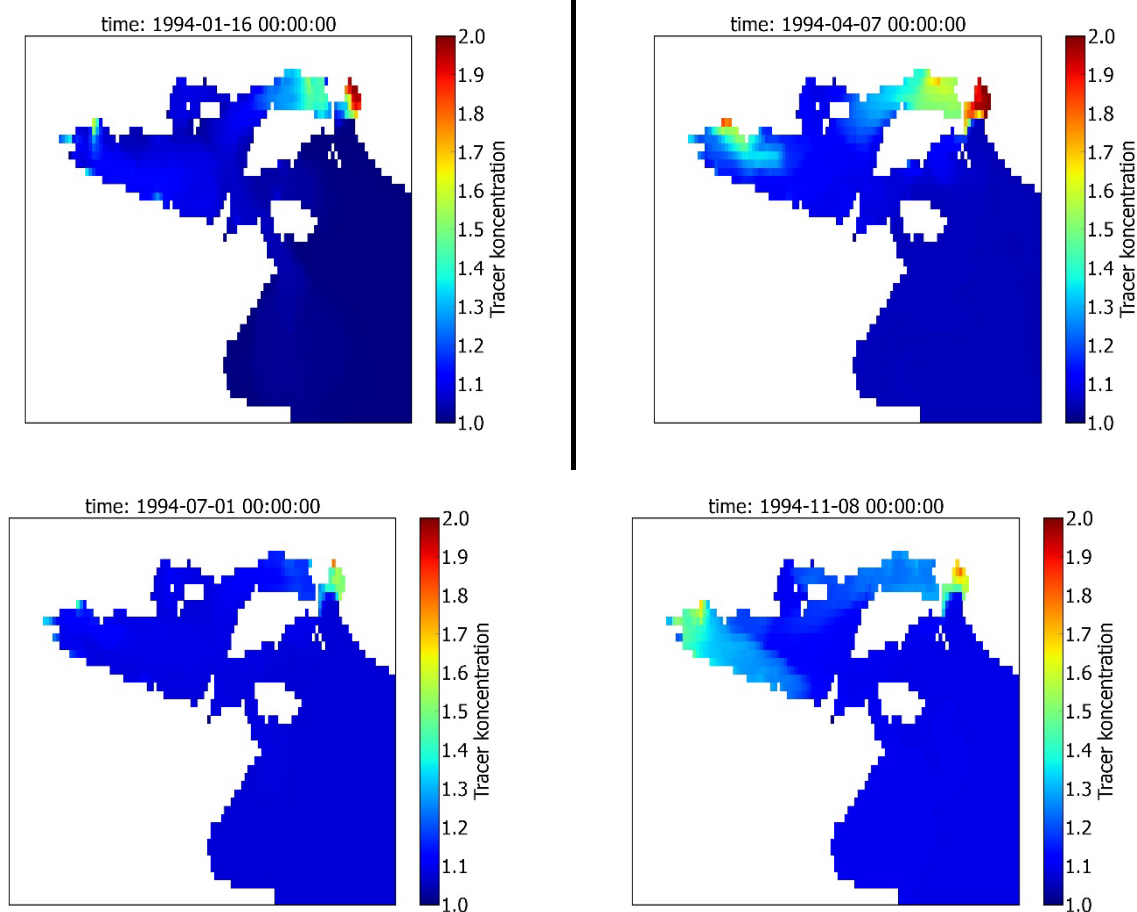
Figur 5. Simuleret (linjer) og observeret temperatur (cirkler og trekanten) i overfladevandet i den indre del af fjorden (vest, station 94330002) samt ved den dybe sejlrende for perioden 1994-2014 (station 94330001).

3.3 Tracer eksperiment

For at illustrere hvordan et stof, som tilføres via vandløb, vil spredes inde i fjorden ifølge modellen, er der udført et simpelt tracer eksperiment. Fjorden er initialiseret med en tracer med en baggrunds-koncentration på 1. Fra alle 11 indløb (se Fig. 1 for deres placering) sættes koncentrationen i det tilførte vand til 2. Herefter foretages en simulering på ét år, som viser hvordan det tilførte vand ændrer koncentrationen inde i fjorden. På den åbne rand er der benyttet 0-gradient således at tracer-koncentration ikke ændres ved den åbne rand. Denne specifikation betyder at koncentrationen inde i fjorden over tid vil indstille sig på værdien specificeret via tilløbene.

Tracer-eksperimentet viser koblingen med FABM, som via en simpel konservativ tracemodel illustrerer, hvorledes stof flyttes rundt i fjorden, og også

hvordan vand fra tilløbene i forskellige grad spredtes inde i fjorden. Den totale mængde konservativt stof der tilføres fjorden, er givet ved summen af vandføringen i alle tilløb ganget med koncentrationen 2. Tilløbenes indflydelse på koncentrationen i fjorden er afvigelsen fra initialbetingelsen på 1. Som forventet er inderfjorden og områderne tæt på tilløbene mere påvirket af tracer input, da koncentrationen af tracer her typisk er højere end i andre områder af fjorden. I en simulering med fuld bio-geokemi vil koncentrationer i tilløb skulle erstattes med faktiske informationer for f.eks. næringssalte.



Figur 6. Simuleret koncentration af en konservativ tracer i det øverste lag af fjorden på nogle udvalgte dage (øverst, venstre: 16. januar 1994; øverst højre: 7. april 1994, nederst venstre: 1. juli 1994, nederst højre: 8. november 1994). Traceren kommer ind i fjorden via alle tilløb i modelopsætningen.

4 Perspektiver

4.1 Perspektiver for brugen af pyGETM for danske fjorde

Som illustreret i dette projekt lykkedes det at opsætte en model, og afvikle en simulering for en 20-årig periode. Det krævede en relativt grov gridopløsning (345 m) for at kunne afvikle den lange modelkørsel inden for en rimelig beregningstid på en workstation (ca. 60 timer). Denne gridopløsning betød, at der kun er få beregningsgrid på tværs af vandområdet omkring indsnævringen ved sejlrenden i den østlige del af fjorden, hvilket i første omgang resulterede i en mindre grad af lagdeling i modellen sammenlignet med observationer. Dette kunne i nogen grad udbedres ved at manipulere med griddet og gøre det dybere i området ved sejlrenden. Flere forbedringer kunne sandsynligvis opnås ved yderligere manipulation af griddet i pyGETM, eller ved at anvende en finere gridopløsning, hvilket imidlertid vil resultere i en mere beregningstung model. Såfremt målet på den længere bane er at koble en økologisk model til pyGETM, vil beregningstiden stige yderligere. Den bedste fremgangsmåde, såfremt pyGETM skal anvendes for flere fjorde, og også kobles til en økologisk model for lange tidsperioder, vil således være at finde et passende kompromis mellem gridopløsning og beregningstid, og evt. lave eksperimenter med forskellige tilpasninger af modelgrid således lagdeling og vandudveksling kan simuleres i passende grad for den enkelte fjord.

5 Referencer

Bruggeman, J., Bolding, K. 2014. A general framework for aquatic biogeochemical models, *Environmental Modelling and Software*, 61: 249–265.

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., Vitart, F. (2011), The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137: 553–597.

Hu, F., Bolding, K., Bruggeman, J., Jeppesen, E., Flindt, M. R., van Gerven, L., Janse, J. H., Janssen, A. B. G., Kuiper, J. J., Mooij, W. M., Trolle, D. 2016. FABM-PCLake – linking aquatic ecology with hydrodynamics, *Geoscientific Model Development*, 9: 2271–2278.

Larsen, J., Mohn, C., Timmermann, K. 2013. A novel model approach to bridge the gap between box models and classic 3D models in estuarine systems. *Ecological Modelling* 266: 19–29.

Burchard, H., Bolding, K., and Villarreal, M.R. 2004. Three-dimensional modelling of estuarine turbidity maxima in a tidal estuary. *Ocean Dynamics*, 54: 250–265.

Stips, A., Bolding, K., Pohlman, T., and Burchard, H. 2004. Simulating the temporal and spatial dynamics of the North Sea using the new model getm (General Estuarine Transport Model). *Ocean Dynamics*, 54: 266–283.

Stisen S., Ondracek M., Troldborg L., Schneider R.M.J, van Til M.J., (2019). National Vandressource Model - Modelopstilling og kalibrering af DK-model 2019. GEUS rapport 2019/31. s 125. DANMARKS OG GRØNLANDS GEOLOGISKE UNDERSØGELSE RAPPORT 1997/110 (vandmodel.dk)

Thodsen, H., Tornbjerg, H., Rolighed, J., Baattrup-Pedersen, A., Larsen, S.E., Ovesen, N.B., Blicher-Mathiesen, G. & Kjeldgaard, A. 2021. Vandløb 2020. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 82 s. - Videnskabelig rapport nr. 473 <http://dce2.au.dk/pub/SR473.pdf>