# Fra operationel oceanografi til digital oceanografi – et modelleringsperspektiv

Operationel oceanografi leverer marine data- og informationstjenester via integreret datamodellering for at sikre effektive marine- og kystoperationer, økosystembaseret forvaltning og tilpasning til klimaændringer. Grøn omstilling medfører desuden nye udfordringer til havmodellering, og en hastig udvikling i digitale teknologier medfører nye løsninger, tjenester og muligheder.

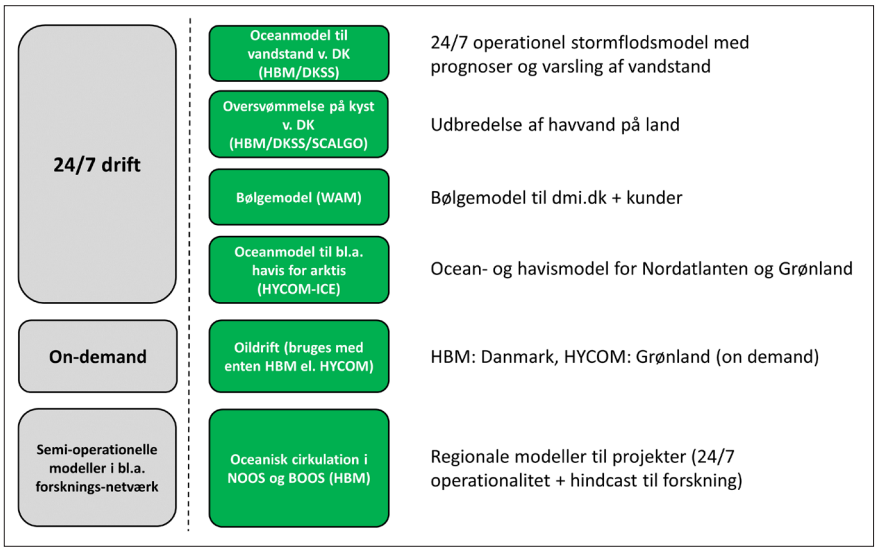
Jun She, Morten A.D. Larsen, Jacob W. Nielsen, Till S. Rasmussen, Jens Murawski, Vilnis Frishfeld & Ole K. Leth

## Introduktion til operationel oceanografi

Havet har en stor betydning for Danmark og har medvirket til at forme landets identitet, økonomi og kultur. Kysten i Danmark er aldrig længere væk end 52 km. Der er i Danmark 1.419 øer og en kystlinje på 8.750 km, som byder på fantastiske naturlandskaber og tiltrækker turister fra hele verden. Desuden spiller havet en afgørende rolle i reguleringen af Danmarks klima, påvirker vejrmønstre og giver muligheder for produktion af vedvarende energi gennem havvindmølleparker. Ud over økonomiske og miljømæssige faktorer har havet også en kulturel betydning for danskerne som inspiration for kunst, litteratur og traditioner, der er dybt forankret i den maritime arv.

Havmiljøet kan være barskt, hvilket kan udsætte maritime operationer og infrastrukturer for høj risiko og slitage. Havets økosystem er skrøbeligt over for menneskeskabte ændringer især i et klima under forandring. Præcis og rettidig information om havmiljøet er derfor afgørende for at sikre sikkerhed og effektivitet i maritime aktiviteter på forskellige fronter samt et bæredygtigt havøkosystem. Operationel oceanografi er i stand til at imødekomme mange af disse udfordringer igennem en videnskabelig og teknologisk tilgang.

Et operationelt oceanografisk system kan inddeles i fem del-elementer: 1) overvågning, der viser havets reelle tilstand, 2) datahåndtering, der sikrer rettidig og kvalitetssikret datalevering, opdagelse, tilgængelighed og formidling, 3) modeller, der beskriver fortidens, nutidens og fremtidens havstatus, 4) operationel produktion, der kører modellerings- og assimileringssystemer på beregningsplatforme for at generere de operationelle produkter, og 5) formidlingstjenester, der designer, genererer og formidler data og produkter til bruger. Alt dette støtter op om kystnære maritime operationer, bedre hav- og kystmiljø, tilpasning til klimaforandringer og bevarelse af havets sundhed /1/.

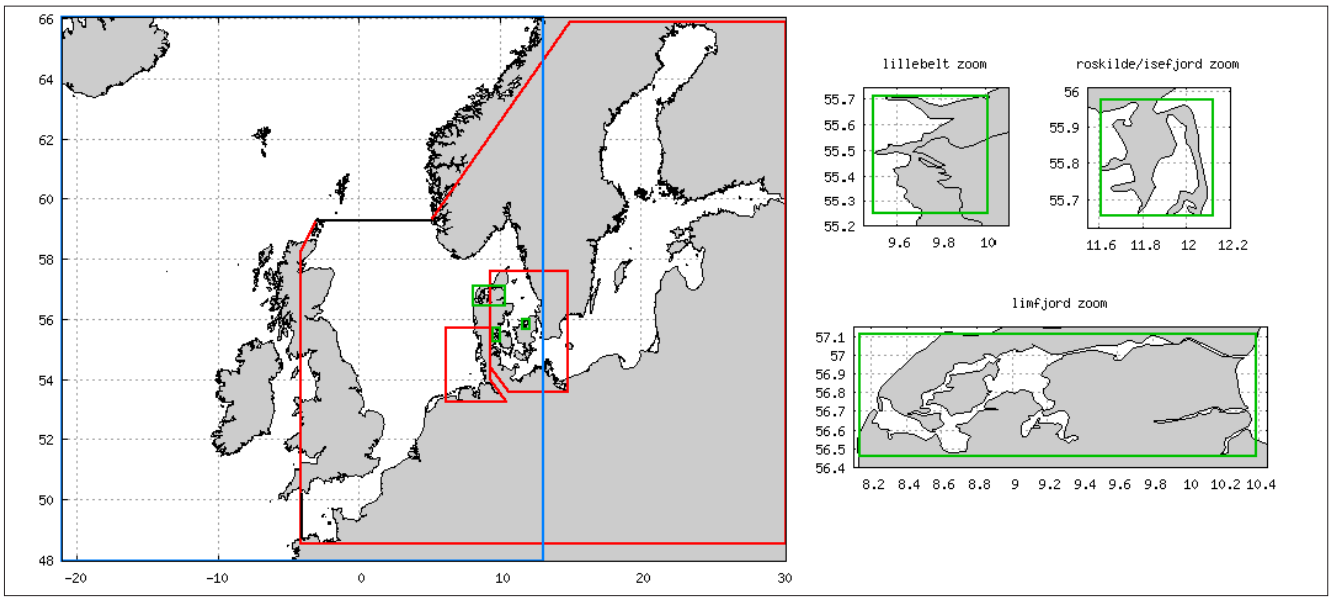



*Figur 1. Oceanografiske operationelle modeller på DMI.*

## Civil operationel oceanografi i Danmark

Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) blev grundlagt i 1872 og er i dag omdrejningspunktet for den danske oceanografiske tjeneste. Kaptajn Niels H.C. Hoffmeyer, der var den første direktør for DMI, organiserede, hvad der kan kaldes den første havvejrtjeneste /2/. Han etablerede et observationsnetværk for havvejr, der dækkede Grønland, Island, Færøerne og Danmark. Der var mere end 200 frivillige observatører, der arbejdede for DMI. Marine observationer (havniveau, vandtemperatur, saltholdighed og strømme) blev målt ved manuel aflæsning. I 1906 overtog DMI desuden ansvaret for overvågning af havis.

Før 1990 omfattede DMI's operationelle oceanografiske tjeneste hovedsageligt arbejde inden for detektering af havis og varsling af stormflod. Sidstnævnte blev oprettet som konsekvens af den alvorlige stormflod i Holland i 1953. Ligesom Holland har Danmark




*Figur 2. Domæneopsætning af DMI's operationelle hav og havis model HBM for Nordsøen og Østersøen.*

lavtliggende områder, der kun er beskyttet mod havet af diger. I 1990'erne begyndte DMI at bruge todimensionelle hydrodynamiske modeller i kombination med realtidsdata om havniveau og meteorologi for at give pålidelige prognoser for det forventede havniveau. I løbet af de sidste 30 år er der sket en stor udvikling af regnekraft og satellitovervågning, hvilket giver et godt grundlag for udvikling af driftmodeller. Siden 2005 har stormflodsmodellerne været tredimensionnelle, hvilket har øget kvaliteten betragteligt. Udover stormflodsvarslingen har DMI også udviklet henholdsvis havis og bølge modeller. De indgår nu i havprognoser og klimatjenester i farvandene omkring Danmark og Grønland. DMIs havmodeller dels er offentligt tilgængelige via websted og frie data, samt at de fungerer som input til DMIs operationelle varsling

Internationalt samarbejde er afgørende for at kunne dele omfattende marine observationer, udvikle fælles modeller og rekvirere ressourcer til forskning og udvikling. Således er DMI en af de førende partnere i europæisk operationel oceanografi, f.eks. i EuroGOOS (European Global Ocean Observing System /3/), BOOS (Baltic Sea Operational Oceanographic System /4/) og Copernicus Marine Service /5/. Antallet af havmodellører på DMI er steget fra fire i 1998 til mere end 20 i dag.

## Operationelle oceanmodeller på DMI

DMI driver en række af operationelle hav-is-bølge-oliedriftsmodeller i Østersøen-Nordsøen og Arktis-Nordatlanten, som vist i figur 1. Disse modeller producerer historiske-, prognose- og klimaprojektions-data til en række marine anvendelser i nationale, regionale og europæiske farvande.

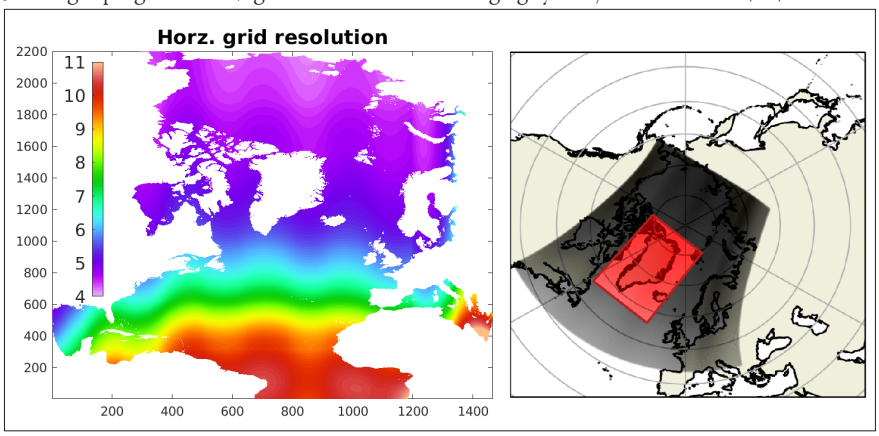
**Operationel konfiguration:** Den regionale 3D-havmodel HBM (figur 1) for Nordsøen og Østersøen er kendetegnet ved fleksible modelgitre (såkaldt to-vejs nesting) for numerisk at repræsentere den komplekse geografi omkring flodmundinger, estuarier, kyster og åbent hav. Den operationelle opsætning består pt. af syv modelområder (figur 2), herunder to regionale havområder (Nordatlanten og Østersøen-Nordsøen i 5-10 km opløsning), to subregionale områder (indre danske farvande og Vadehavet i 1 - 2 km opløsning) og tre lokale områder (Roskilde/Isefjord, Limfjorden og Lillebælt i 0,2 - 0,4 km).

Herudover dækker DMI-HYCOM-CICE-konfigurationen Arktis og Atlanterhavet nord for 15°S for havet (figur 3) og DMI's bølgemodel WAM har en indlejret konfiguration, der dækker områder i spændet fra globalt-, nordatlantisk-, europæisk- til dansk farvand med opløsninger i spændet 25 til 1 km.

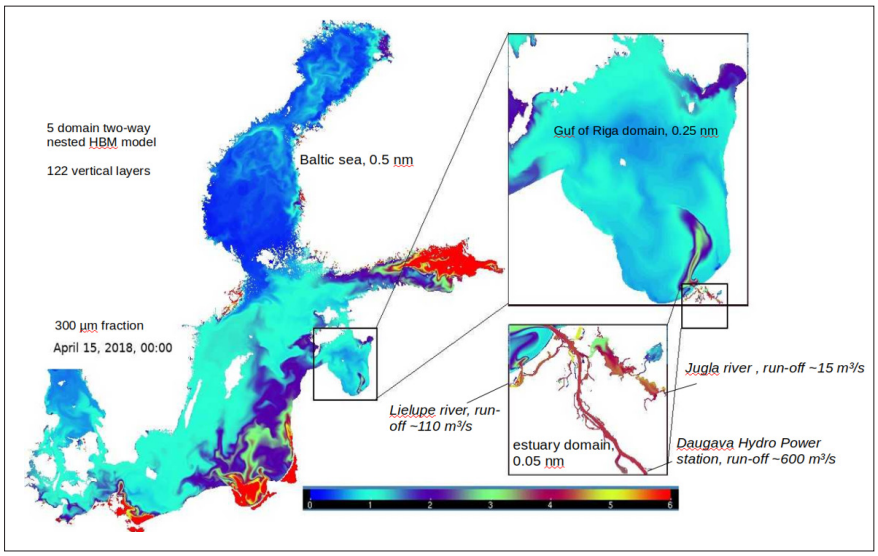
**Længde af forudsigelse:** Den operationelle konfiguration kører HBM, HYCOM-CICE og WAM 2-4 gange om dagen og producerer en 5-6 dages prognose for hav og havis og en 5-10-dages prognose for bølger.

**High performance computering (HPC):** DMI's modeller er igennem årene blevet stress-testet og har undergået standardisering og optimering. Ydeevnen for HBM er f. eks. blevet forbedret med en faktor 65 i perioden 2007-2016 /6/. Tests af skalerbarheden af HBM på HPC model Cray XE6 viste, at modellen kunne skaleres på op til 16.000 kerner og at Amdahl parallel scoren nåede 99,95% /7/. CICE-modellen har desuden en version som benytter GPU for at drage fordel af denne type HPC-ressourcer.

**Dataassimilering:** Det er vigtigt at assimilere observationer i modeller for at reducere modelfejl. Flere ordninger er blevet anvendt i HBM til at assimilere hav-overfladetemperatur (SST), havniveau, dybere temperatur og saltholdighedsprofiler, bl.a. til produktion af reanalyse-produkter som spænder flere årtier /8/, /9/. Ingen assimilering er dog blevet benyttet i operationelle prognoser i Østersøen og Nordsøen. DMI-HYCOM-CICE assimilerer satellitbaseret haviskoncentration og SST i operationelle prognoser. Assimileringssystemet er et nudging-system, som beskrevet i /10/.




*Figur 3. Venstre: Havdomæne og opløsning i km. Højre: Mørkt område er havis-grid med samme opløsning som havmodellen.*




*Figur 4. Domæner med høj opløsning i Østersø-domænet. Farvekortet repræsenterer den modellerede overfladekoncentration af 300 µm MP-partikler d. 15/4/2018, der viser Daugava-flodens sky efter en oversvømmelse (Frishfelds et al., 2022). Modelopløsningen i underregioner er 1 km for Østersøen, 0,5 km for Rigabugten og 0,1 km for de lettiske indre farvande.*

**Ensemble-prognoser:** Prognoseensembler kan give et usikkerhedsestimat af prognoserne, hvilket er meget nyttigt ved forudsigelse af stormflod og havtilstand, og kan baseres på ensembler fra forskellige forceringer eller forskellige modelkoder. Et ensemble-prognosesystem er blevet implementeret til stormflods- og bølgeprognoser hvor HBM/WAM er forceret af et antal vejrmodelprognoser (ensembler). Derudover er der udviklet et multi-model-ensemble til at levere paneuropæiske havprognoser til FRONTEX ved at aggregere Copernicus Marine Service-prognoser og nationale prognoser til den europæiske grænse- og kystvagt (FRONTEX) /11/.

**Kvalitetssikring:** Operationelle modeller kalibreres og valideres før lancerin. DMI's modeller har gennemgået omfattende valideringer af både interne og eksterne brugere siden 1990'erne. Udover den regelmæssige, offline validering af variabler i operationelle modeller, udføres også en online modelvalidering af havniveau, både for løbende niveauer samt for ekstreme begivenheder. Detaljeret validering for hvert kalenderår siden 1997 ved danske tidevandsmålestationer /12/. DMI-WAM verificeres på daglig og 6-måneders rutinebasis i forhold til bøjedata. DMI-WAM indgår desuden i automatisk månedlig validering igennem ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). De omfattende valideringer i de seneste årtier har vist, at DMI's havprognosekvalitet løbende er blevet forbedret.

## På vej mod digital oceanografi: Aktuel forskning og fremtidige retninger

Med stigende tilgængelighed af open source marine data, software (f.eks. modeller) og cloud-baseret virksomhedsarbejdsmiljø med cloud computing, docker-container, grafisk brugergrænseflade, jupyter notebook og virtuel modelkodning, vil brugerne være i stand til at opnå løsninger på 'what-if' scenarier og specifikke ansøgningssager på en nemmere og mere effektiv måde. Traditionelt blev disse opgaver ofte behandlet via eksterne konsulentprojekter, hvilket kan være både tidskrævende og bekosteligt. Eksisterende operationelle modeller kan videreudvikles til 'on-demand' brug med en fleksibel natur og med automatisk eksekvering. Hurtig udvikling af datadrevne modeller inden for geovidenskab baseret på ML/AI-teknologi giver også billige alternativer til komplicerede numeriske modeller. Udviklingen på dette område kaldes ofte for 'digital oceanografi' og sigter mod at udvikle en kapacitet, der giver brugerne mulighed for effektivt at bruge havinformation til applikationer i en digital verden og et virtuelt arbejdsmiljø. Det er der især brug for i en tid med informationssamfund og hurtige klima- og miljøforandringer, hvor den grønne omstilling giver mange nye udfordringer.

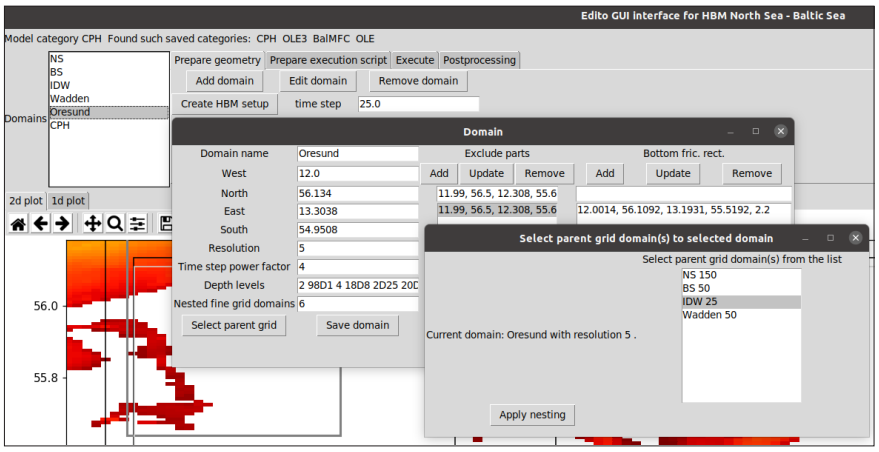
Med det formål at opbygge fremtidens digitale oceanografi har DMI fokuseret på at udvikle nye modelleringskapaciteter for grøn omstilling (nul forurening, marine veje til $CO_2$-neutralitet og naturbaseret løsning). Der er gjort fremskridt i forskningen inden for 'seamless' modellering, forureningsmodellering, effektmodellering og on-demand modellering. Til seamless modellering udvikler vi en enkelt model HBM til at løse land-hav akvatisk kontinuum og synopisk-til-klima skalaer /13/-/14/.

Med fordel af den seamless model udviklede vi yderligere ny forureningsmodelleringskapacitet til at forudsige at forudsige skæbne og veje for landbaseret mikroplast i havet, herunder kortlægning af kilder, biofouling af partikler og bølgeinduceret transport /15/-/16/ (Fig. 4). Sammen med DMI's eksisterende værktøj til modellering af olieudslip muliggør modellerne en samlet suite til at simulere forurening i havmiljøet.

Den "Impact simulering" har til formål at modellere påvirkningen fra storskala infrastruktur og vegetation, f.eks. havvindmølleparker (OWF), akvakulturfarme, diger og havgræs og simuleres normalt ved hjælp af Computational Fluid Dynamics (CFD) med meget høj opløsning (i meter). DMI er ved at udvikle parametriseringer af vindmøller, tangrækker og havgræs i DMI HBM/WAM-modellerne, så de akkumulerede virkninger af disse strukturelle tiltag og havgræsset kan simuleres og vurderes. Dette er især vigtigt, når OWF'er, lavtrofiske akvakulturfarme, 'blåt kulstof' og naturbaserede løsninger betragtes som vigtige marint-baserede strategier hen imod et emissionsneutralt fremtidigt klima. Dette arbejde foregår i øjeblikket bl.a. i det EU Horizon-støttede projekt OLAMUR.

Baseret bl.a. på støtte fra Horizon-projektet EDITO Model Lab videreudvikles HBM til et flytbart, automatisk nedskalerbart modelleringsværktøj, der giver en to-vejs indlejret løsning til on-demand kystmodellering. Resultater herfra har vist at en konfiguration i Østersø-Nordsø-regionen giver resultater af samme kvalitet som et operationelt produkt baseret på open source HBM kode, batymetri og kystlinje-definition. Produktet giver desuden brugerne mulighed for at oprette underdomæner i Østersøen og Nordsøen med en opløsning på op til 50 m og indeholder også 'model builder' scripts til bl.a. en automatisk generering af modelgitre, forcering, randbetingelser, vandløbs-input samt en grafisk brugergrænseflade (GUI, figur 5). Denne on-demand HBM konfiguration forventes at blive lanceret som åben platform i 'EDITO_infra'.

DMI vil i fremtiden udvikle modelleringsværktøjer for jordsystemet, datadrevne (AI/ML) og hybride modelle sideløbende med den fortsatte indsats indenfor udviklingen af numeriske 'seamless', 'what-if', og 'on-demand' modeller indenfor hav-, bølger- og is. I digital oceanografi kan det være nødvendigt at samle tværfaglige modeller (f.eks. hav-, bølge-, is-, biogeokemiske, økologiske, fiskerimæssige, morfologiske, sedimentære, atmosfæriske og




*Figur 5. Grafisk brugergrænseflade udviklet på DMI til on-demand HBM modellering i Østersøen og Nordsøen for semi-øvede brugere.*

socioøkonomiske) for til fulde at kunne beskrive komplekse what-if-scenarier, hvilket ikke er foreneligt med en traditionel og afkoblet tilgang. Det er derfor nødvendigt at etablere en multidisciplinær modelramme for at lette digitale applikationer. Derudover har AI-baserede modeller produceret resultater, der kan sammenlignes med numeriske modeller i 2D-variabler som havniveau, SST og bølger. Nogle metoder, såsom ODFnet, CNN og FFNN, har vist lovende resultater med rekonstruktion og forudsigelse af 3D-felter. DMI leder desuden en (ocean-) machine learning-arbejdsgruppe i Østersøregionen sammen med finske, svenske, estiske, polske og tyske partnere. I de kommende år forventes det, at AI-baseret datasimuleringsfusion, nedskalering og forudsigelseskapacitet vil blive væsentligt forbedret.

Andre igangværende operationelle forsknings-projekter og –initiativer inkluderer desuden et initiativ som, sideløbende med fuldførelse af en række forpligtelser i Copernicus Marine Service, udvikler og analyserer NEMO-modellen til brug i operationel sammenhæng for bl.a. vandstands-modellering. Andre potentielle fremtidige perspektiver inkluderer en dynamisk kobling af HBM og WAM for en bedre numerisk opløsning af kystnære processer samt en kobling til DMI's nyligt initierede hydrologiske modelsystem for bedre prognoser og varsling af koblede hændelser hvor den kombinerede forekomst af vand fra flere sider er med til at øge oversvømmelsesrisici i kystzonen.

## Litteratur


/1/. She, J., Allen, I., Buch, E., Crise, A., Johannessen, J. A., Le Traon, et al. (2016): Developing European operational oceanography for Blue Growth, climate change adaptation and mitigation, and ecosystem-based management, Ocean Sci., 12, 953–976, https://doi.org/10.5194/os-12-953-2016.

/2/. Bidstrup J.: Stamtvl. over familierne Haüberg og Arboe, 1911 14f. Ed. Erslev i Geografisk t. VII, 1883–84 83–86. Ph. Weilbach i III.tid. 24.2.1884. https://biografiskleksikon.lex.dk/Niels_H._Hoffmeyer

/3/. Woods, J D, H Dahlin, L Droppert, M Glass, SVallerga, and N C Flemming, 1996. The Strategy for EuroGOOS. EuroGOOS Pub.No. 1. Southampton Oceanography Centre.132pp. + Annexes. ISBN 0-904175-22-7

/4/. Buch, E, and H Dahlin, 2000. BOOS Plan,Baltic Operational Oceanographic System 1999-2003. EuroGOOS Publication No.14. 51pp.ISBN 0-904175-41-3

/5/. Bahurel P, Adragna F, Bell MJ, Jacq F, Johannessen JA, Le Traon P-Y, Pinardi N, She J. 2010. Ocean Monitoring and Forecasting Core Services, the European MyOcean Example. In Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society (Vol. 1), Venice, Italy, 21–25 September 2009, Eds Hall J, Harrison DE, Stammer D. ESA Publication WPP-306, doi:10.5270/ OceanObs09.pp.0

/6/. Berg, P., K. Raman and J. Weismann Poulsen (2016). Complete HBM model runs on Intel R Xeon R processors and Intel R Xeon PhiTM processors - part I. DMI Tech. Rep. 16-20. 76pp. ((Available at: https://www.dmi.dk/fileadmin/user_upload/Rapporter/TR/2016/16-20.pdf)

/7/. Poulsen, J.W., Berg, P., and Karthik, R. (2014). Better Concurrency and SIMD On The HIROMB-BOOS-MODEL (HBM) 3D Ocean Code" In: J. Jeffers and J. Reinders (eds.).High Performance Parallelism Pearls: Multicore and Many-core Programming Approaches. Morgan Kaufmann Publishing.

/8/. Fu, W., She, J., Dobrynin, M. (2012). A 20-year reanalysis experiment in the Baltic Sea using three-dimensional variational (3DVAR) method. Ocean Science 8 (5), 827-844

/9/. Madsen, K.S., Høyer, J.L., Fu, W. and Donlon, C. (2015), Blending of satellite and tide gauge sea level observations and its assimilation in a storm surge model of the North Sea and Baltic Sea, J. Geophys. Res. Oceans, 120, 6405–6418

/10/. Rasmussen, T. A. S., Høyer, J. L., Ghent, D., Bulgin, C. E., Dybkjær, G., Ribergaard, M. H., et al. (2018). Impact of assimilation of sea-ice surface temperatures on a coupled ocean and sea-ice model. Journal of Geophysical Research: Oceans 123, 2440–2460. doi:https://doi.org/10.1002/2017JC01348

/11/. Frishfelds, V., She, J., Murawski, J., Nielsen J.W. (2023). Aggregating sea surface hydrodynamic forecasts from multi-models for European Seas. TransNav: International Journal on Marine Navigation & Safety of Sea. 17(3). DOI: 10.12716/1001.17.03.04.

/12/. DMI (2024): Storm surge verification: Predicted sea level, high water vs. tide gauge data. (18/3/2024), https://ocean.dmi.dk/validations/surges/index.uk.php, https://ocean.dmi.dk/validations/surges/online/index.php

/13/. Murawski, J., She, J., Mohn, C., Frishfelds, V. and Nielsen, J. W. (2021). Ocean Circulation Model Applications for the Estuary-Coastal-Open Sea Continuum. Front. Mar. Sci. 26. doi: 10.3389/fmars.2021.657720

/14/. Su J, Andrée E, Nielsen JW, Olsen SM and Madsen KS (2021) Sea Level Projections From IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere Call for a New Climate Adaptation Strategy in the Skagerrak-Kattegat Seas. Front. Mar. Sci. 8:629470. doi: 10.3389/fmars.2021.629470

/15/. She, J., Christensen, A., Garaventa, F., Lips, U., Murawski, J., Ntoumas, M. and Tsiaras, K. (2023). Developing Realistic Models for Assessing Marine Plastic Pollution in Semi-Enclosed Seas. Oceanography. 36(1), p54-57. https://doi.org/10.5670/oceanog.2023.s1.17,

/16/. Frishfelds, V., Murawski, J. and She, J. (2022) Transport of Microplastics From the Daugava Estuary to the Open Sea. Front. Mar. Sci. 9:886775. doi: 10.3389/fmars.2022.886775



Jun She er chefkonsulent ved Vejrforskningsafdelingen (VF), Danmarks Meteorologiske Institut (DMI), arbejder blandt andet med havbølgemodellering, operationel oceanografisk systemudvikling og videnskabelig koordinering (js@dmi.dk).

Morten A.D. Larsen er enhedsleder af hav- og radar ved DMI/VF (mla@dmi.dk).

Jacob W. Nielsen er seniorforsker ved DMI/VF og arbejder med Østersø-Nordsøens operationelle oceanografiske system (jw@dmi.dk).

Till S. Rasmussen er seniorforsker ved DMI Nationalt Center for Klimaforskning (NCKF) of der arbejder med at udvikle operationelle hav- og havismodeller i Det Arktiske Ocean (tar@dmi.dk).

Jens Murawski er seniorforsker i DMI/VF indenfor udvikling af operationelle hav-, bølge- og ismodeller (jmu@dmi.dk).

Vilnis Frishfelds er seniorforsker i DMI/VF og arbejder med udvikling af operationelle kyst-havmodeller (vifr@dmi.dk).

Ole K. Leth er souschef ved DMI/NCKF og fysisk oceanograf (okl@dmi.dk).