

Stormflod over Danmark – modellering, prognoser og eksempler fra Østersøen

Kristine S. Madsen, Erik Buch¹, Erik K. Hansen, Jacob W. Nielsen, Martin Stendel, Morten A.D. Larsen, Peter Aakjær¹, Sebastian Pelt og Xiaohua Yang, Danmarks Meteorologiske Institut

Når stormfloder rammer Danmark med forhøjet vandstand i havet, ofte ledsaget af regn og bølger, er det afgørende for beredskabet at modtage pålidelige prognoser og varsler. Denne artikel tager udgangspunkt i stormfloden i Østersøen den 20. oktober 2023 og beskriver, hvordan en prognose udarbejdes med hjælp fra vejr- og havmodeller. DMI's KlimaAtlas viser, at den forhøjede vandstand vi i dag oplever sjældent, vil forekomme langt hyppigere i fremtiden. Artiklen fortæller også, hvordan den historiske stormflod i 1872 kan hjælpe med at undersøge, hvor ekstrem vandstanden i Østersøen kan blive.

Den 20. oktober 2023 ramte en stormflod de danske og tyske kyster i den vestlige Østersø fra Bornholm til Lillebælt. Samtidig betød vind af kulingstyrke, at høje bølger ramte de østvendte kyster. Selvom stormfloden var godt forudsagt flere dage i forvejen, skete der store materielle ødelæggelser. Prisen for genopbygning ventes at blive den højeste nogensinde for en stormflod i denne region, men måske på grund af den store opmærksomhed omkring stormfloden, kostede den heldigvis ingen menneskeliv.

Begivenheden kan beskrives som en tretrinsrakat:

- Vestenvind af moderat styrke skubbede vand ind i Østersøen i dagene op til stormfloden.
- Nordenvind, ligeledes af moderat styrke, over hele området fra den Botniske Bugt i nord til den polske Østersøkyst i syd, omfordelte vandmasserne fra den nordlige til den sydlige del af Østersøen.
- En stærk kuling fra øst tvang vandmasserne vestpå, mod de danske og tyske østersøkyster. Der hvor vinden havde et langt frit stræk, blev bølgerne særdeles høje.

Den højeste vandstand under stormfloden var 2,31 m i Slesvig By. Det er den højeste vandstand, der er målt i Østersøen siden 1913. Samtidig betød høje bølger store materielle ødelæggelser, især for kyster som var eksponerede for åbent hav i østlig retning, såsom i Rødvig Havn og Hesnæs.

Vejrsituationen var domineret af et nordligt og ret stationært højtryk, samt et sydligt lavtryk der bevægede sig mod øst over det europæiske kontinent. Vejr-situationen var dermed af lignende type som skabte stormfloderne i 1872 og 1913.

I dagene omkring stormfloden faldt der store mængder regn, og hele oktober 2023 var desuden den femte vådeste måned i Danmark nogensinde målt. Derfor var vandløbene mange steder godt fulde under stormfloden, og nogle områder oplevede opstuvning i vandløb som følge af den høje vandstand i havet. Alt i alt betød denne cocktail af havvand, bølger og vand fra vandløbene udfordringer med oversvømmelser i mange kystområder.

I denne artikel vil vi beskrive det system af modeller og observationer, der gør det muligt at lave prognoser for stormfloder illustreret med eksempler fra stormfloden i oktober 2023. Vi vil desuden beskrive hvad vi kan forvente af fremtidige stormfloder i Danmark, og sammenligne med den historiske stormflod i 1872.

Stormflodsprognoser

Det er komplekst at forudsige stormfloder, men over de sidste ca. tredive år er der udviklet modelværktøjer der gør vagtstående meteorologer i stand til at varsle stormfloder med høj præcision ofte flere dage i forvejen. For stormfloden i oktober 2023 udsendte DMI de første varsler fem dage før begivenheden. De vigtigste bestanddele for at lave en god prognose for de danske farvande er atmosfære- og havmodeller, der i stor detalje gengiver vindens og vandets bevægelser i 3 dimensioner, for hele Nordsø-Østersø området [1,2].

DMI's modeller er baseret på de grundlæggende fysiske love, og det er de samme typer af ligningssystemer som bruges i både havmodeller, vejrmodeller og klimamodeller. De centrale fysiske love bag modellerne er [3]:

- Newtons 2. lov, der beskriver luftens eller vandets bevægelse i tid og rum. Når Newtons lov skrives op for et volumen af luft eller vand ved Jordens overflade, bliver luftens/vandets acceleration en funktion af corioliskraften, gradienter i tryk, tyngdekraften, centrifugalkraften og friktion. Dette kaldes Navier-Stokes' ligning.
- Kontinuitetsligningen for masse, der siger at luftens/vandets masse er konstant. I DMI's havmodeller antages det desuden at vandet er inkompressibelt, så det betyder at vandets volumen også er bevaret.
- Termodynamikkens 1. lov, der siger at den indre energi i et system er konstant.
- Tilstandsligningen, der forbinder massefylde, tryk, temperatur og saltindhold (for havvand). For havvand er denne empirisk bestemt til høj præcision.

¹Pensioneret fra DMI.



Figur 1. Fotos fra stormfloden oktober 2023. Øverst fra venstre: Folkemødepladsen i Allinge ødelagt af bølger (Foto: Peter Aakjær). Høj vandstand i Køge Havn (Foto: Sebastian Pelt). Nederst fra venstre: København set fra Mosede Havn (Foto: Martin Stendel). Sønder Havnegade i Sønderborg (Foto: Tine Knudsen).

Når modellerne er baseret på grundlæggende fysiske principper, virker de meget stabilt, også i ekstreme vejr-situationer, da de fysiske principper altid er gyldige. Det er dog nødvendigt at simplificere ligningerne en del for at kunne lave effektive computermødelles, der beskriver den tidslige og rumlige udvikling af et større luftrum eller havområde. Derfor skal modellerne testes grundigt. I praksis inddeles luftrummet eller havområdet i et gitternet, og luftens eller vandets bevægelse i hvert gitterpunkt beregnes tidsskridt for tidsskridt.

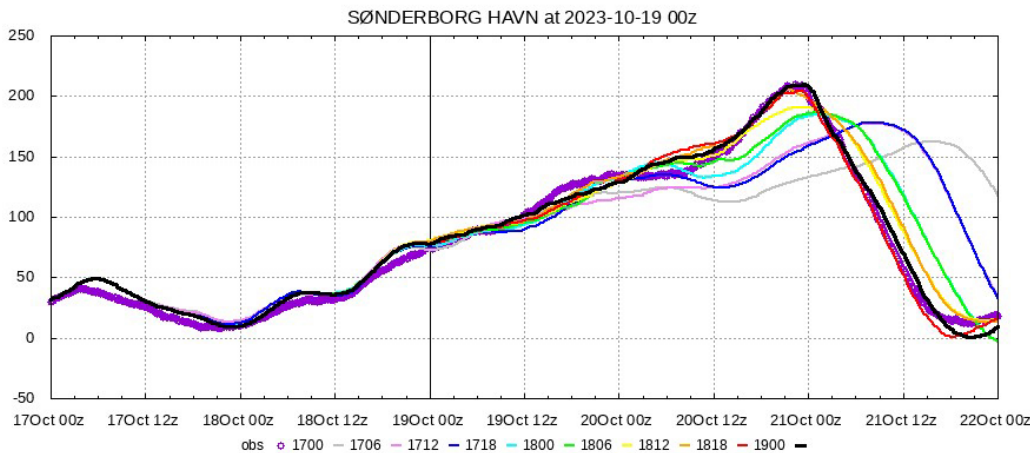
DMI's vejrmodel er blandt de bedste i verden og specialiseret til vejret omkring Danmark. Modellsystemet hedder Harmonie-Arome og bruges til at beregne vejrprognoser med et gitternet i kilometerskala og mange vertikale lag. Modellen udvikles og drives i samarbejde med en række europæiske lande. For hele tiden at give grundlaget for de bedste vejrprognoser, tilpasses modellen løbende til en lang række jordbaserede og satellitbaserede vejrobservationer.

En god model for havet kræver gode data om havets kystlinje, dybde, og vandtilførsel fra de omkringliggende hav- og landområder. DMI's havmodel for de danske farvande er designet til dette. Modelopsætningen har et højtopløst gitternet i de indre danske farvande og særligt i en række fjordområder og snævre passager, mens gitternettet i Nordsøen og Østersøen er mindre finmasket. De forskellige områder er forbundet med såkaldt 2-vejs nesting, så vandets bevægelse og vandstanden ind gennem de snævre danske farvande beskrives bedst muligt [1].

En anden afgørende komponent er vandstandsobservationer. De kan i sig selv ikke benyttes til at forudsige vandstanden flere dage ud i fremtiden, men de kan bruges til at justere modelresultaterne ind til virkeligheden, når der beregnes korttidsprognoser, dvs. nogle få timer ud i fremtiden.

Vejr- og havmodellerne bliver løbende valideret, hvilket er afgørende både for at forbedre modellerne og for at de vagtgående stormflodsmeteorologer kender modellernes styrker og svagheder. På den måde kan meteorologen korrigere en prognose for kendte fejl eller usikkerheder i fx en lavtryksbane eller havmodellens fremstilling af vandets bevægelse i en snæver fjord, inden meteorologen udsender varsler. Meteorologen kan også sammenligne modelresultater fra den operationelle model med observationer, tidligere prognoser og andre lande og institutters prognoser, inden varslene udsendes, for på den måde at opbygge et varsel der er så retvisende som muligt og med så velbeskrevet en usikkerhed som muligt.

Et relativt nyt værktøj, som er under udvikling, er ensemble-havmodelkørsler. Ensemble-kørsler for vejrmodeller er relativt velkendte. Her afvikles vejrmodellen et antal gange hver time med lidt forskellige startbetingelser eller lidt forskellig beskrivelse af modellens fysik, for at se, hvor meget det betyder for vejrets udvikling. Hver afvikling – eller "kørsel" – er et ensemblemedlem, og til sammen giver alle disse kørsler et ensemble, eller en gruppe, af bud på hvordan vejret kan udvikle sig. På den måde fås et billede af usikkerheden på vejrudsigten.



Figur 2. Observeret havniveau (tyk lilla) og prognoser fra DMI's HBM DKSS havmodel for forskellige prognosetidspunkter for Sønderborg (tal angiver dato og tid, f.eks. 1700 = 17/10 kl 00). Den forhøjede vandstand var forudsagt fra den 17/10, mens prognosen for den præcise vandstand og timing blev forbedret, efterhånden som stormfloden nærmede sig, og blev stabil da højt opløste vejrprognoser blev tilgængelige fra DMI's Harmonimodel 54 timer før begivenheden (for prognoser ud over 54 timer anvendes prognoser fra en mere grovmasket global vejrmodel).

Det kan fx ses for nedbør og temperatur på www.dmi.dk, når man vælger "vis usikkerhed" på 2-døgns prognosen for en given lokalitet. På DMI arbejder vi på at bruge ensemble-vejrmodellen som input til stormflodsmodellen, og vi sammenligner vores prognoser med især de tyske og svenske prognoser.

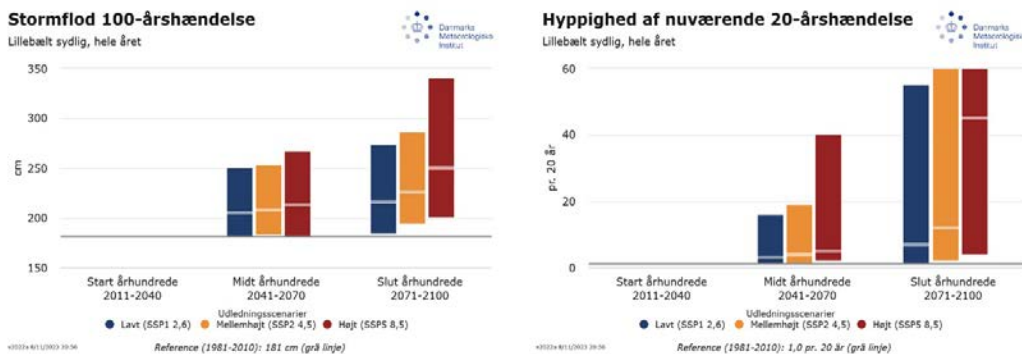
Som beskrevet ovenfor er DMI's modeller i dag baseret på de grundlæggende fysiske love. Det kan give en præcis beskrivelse af virkeligheden, men er også meget beregningstungt. Der forskes i disse år i at bruge maskinlæring og AI både som erstatning for og sammen med de klassiske modeller.

På baggrund af havmodellens prognoser samt prognoser fra vejr-, bølge- og oversvømmelsesmodeller, observationer, viden om vejret og tidligere erfaringer, udsender de vagtgående meteorologer varsler om forhøjet vandstand til beredskaberne og befolkningen. I Danmark varsler DMI for forhøjet vandstand 36 timer før hændelsen, med et forvarsel op til 5 dage før den forhøjede vandstand. Det kan vi fordi situationer med forhøjet vandstand ofte skyldes vejrphenomener af relativ lang varighed, fx et lavtryk, som kan forudses flere dage i forvejen. Det kan dog godt ske, at forhøjet vandstand i havet kommer som en overraskelse, oftest fordi små ændringer i vindretningen eller en upræcis

repræsentation af en snæver passage i havet betyder, at modellen ikke rammer præcist med hensyn til niveauet af eller tidspunktet for den forhøjede vandstand i de komplekse danske farvande.

Fremtidige klimaforandringer

Vandstanden i verdenshavene og omkring Danmark er stigende på grund af klimaforandringer. Den længste tidsserie af vandstandsobservationer i den danske del af Østersøen stammer fra Gedser. Den viser, at vandstanden er steget 14,7 cm siden målingerne begyndte for 126 år siden. Danmark hæver sig fortsat efter sidste istid, det kaldes landhævning. Når landhævningen medregnes, ligger stigningerne i middelvandstanden omkring Danmark tæt på den globale middelværdi, som er 20 ± 5 cm fra 1901 til 2018 [5]. Vandstandsstigningerne i fremtiden bliver større end i sidste århundrede, afhængig af klimascenarie og af hvordan havet og iskapperne reagerer på de globale temperaturstigninger (figur 3) [6, 7]. Dette har stor effekt på stormfloder, idet der skal mindre blæsevejr til for at skabe en højvandshændelse, når havet står højt i forvejen. Bedste bud er at det vi i dag kender som en 20-års vandstand vil forekomme med få års mellemrum i slutningen af århundredet, i et middelhøjt klimascenarie.



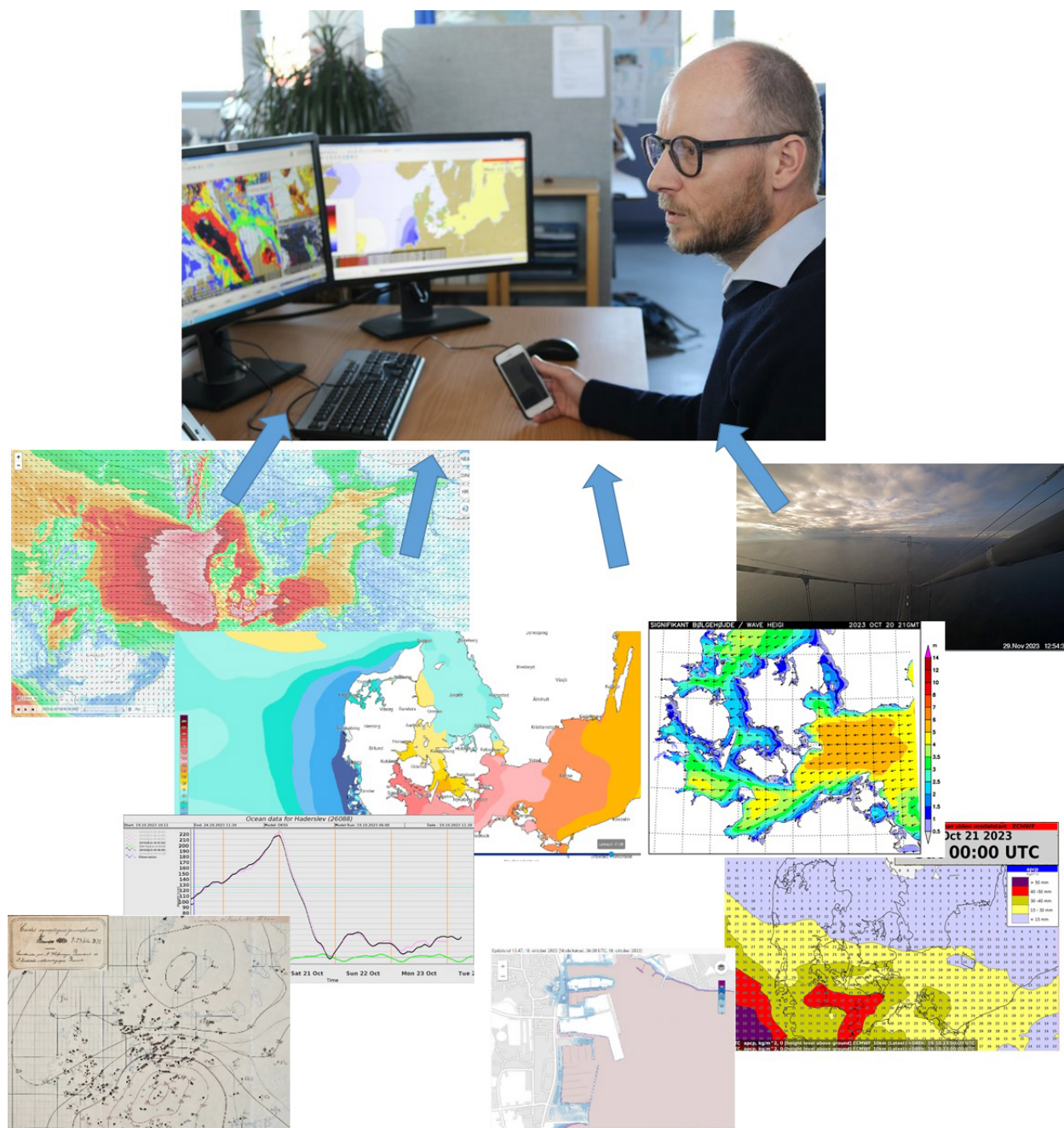
Figur 3. DMI's Klimaatlas angiver vandstandsstigningerne langs alle danske kyststrækninger, og viser stigende højder for f.eks. en 100-års stormflod (venstre) og meget højere frekvens af det vi i dag kender som en 20-års hændelse (højre) [6, 7]. Figurerne er eksempler fra Klimaatlas, gældende for det sydlige Lillebælt.

Sammenligning med stormfloden i 1872

13. november 1872 oplevede Danmark en de største naturkatastrofer i landets historie, da en voldsom stormflod ramte den vestlige Østersø – det samme område som i 2023. Vejrmonsteret, der lå bag, mindede om det vi så i 2023, men var meget kraftigere, længerevarende og centreret længere mod øst, hvilket betød vind af orkanstyrke i området mellem Bornholm og Østsjælland-Falster. Det resulterede i forhøjede vandstande på op til 3,3 meter. Hertil kommer at den kraftige vind skabte bølger på op til 8-10 meter, der især ramte Bornholms og Falsters østkyst.

I 1872 var det ikke muligt at forudsige og varsle vejr og hav, endsiige kommunikere denne viden til myn-

digheder og befolkning. Så befolkningen i de berørte områder samt besætningen på de skibe, der befandt sig i den vestlige Østersø, var totalt uforberedte. Den skabte derfor meget store materielle ødelæggelser, og 90 personer i Danmark og omkring 160 i Tyskland omkom, selvom kysten var langt mindre udnyttet og beboet end i dag. Desuden gik omkring 600 skibe tabt i den vestlige Østersø og flere hundrede søfolk, det eksakte tal er ukendt, mistede livet. Efter denne katastrofale stormflod blev der taget initiativ til bygning af diger langs de mest udsatte kyster, i Danmark især på Lolland og Falster. Der er dog i dag lange kyststrækninger, der ikke er beskyttet mod stormflodssituationer væsentligt mindre end 1872 niveauet, som fx 2023 stormfloden.



Figur 4. DMI's meteorologer er på vagt 24-7 og udsender varsler for farligt vejr baseret på modelprognoser, observationer og viden og erfaringer. Fra oven: DMI meteorolog Erik K. Hansen på vagt; vindstyrke og isobarer fra DMI Harmonie-vejrmodellen [2]; webcambillede fra Storebæltsbroen; vandstand fra DMI DKSS havmodellen [2]; bølger fra DMI WAM-modellen [2], vandstandsobservation for Haderslev; prognose for akkumuleret nedbør fra ECMWF-vejrmodellen [2]; historisk vejrkort fra stormfloden i 1872 tegnet af DMI's tidligere direktør Hoffmeyer; oversvømmelsesprognose for Aabenraa fra DMI-SCALGO-oversvømmelsesmodellen [4].

En sammenligning mellem 1872- og 2023-stormfloderne viser, at vandstanden i Østersøen forud for 1872-stormfloden kun var moderat forhøjet. Klimaforandringer har desuden betydet at vandstanden er steget omkring 15 cm ved de danske kyster siden da. Med andre ord er stormfloden i 1872 ikke det værste tænkelige scenarie i dag. Hvis stormfloden var sket med de samme begyndelsesbetingelser, som vi så i 2023 og med nutidens eller fremtidens højere middelvandstand som udgangspunkt, vil det resultere i væsentlig højere vandstand [8]. I en netop udgivet rapport om en fremtidig stormflodssikring af København er det på den baggrund anslået, at den værste tænkelige gentagelse af 1872-stormfloden kunne give helt op til 1 m højere vandstande, hvis den skete i dag.

Stormfloden i 1872 blev mindet ved 150 års dagen i 2022, og i den forbindelse beskrevet i historisk perspektiv af Aakjær og Buch i “Stormfloden 1872 - da Østersøen druknede Danmark” (2022) og i skønlitteraturen af P.F. Jensen i “Rans Vilje” (2023).

Litteratur

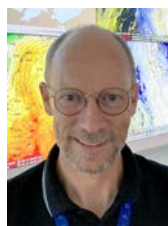
- [1] J. She, M.A.D. Larsen, J.W. Nielsen, T.S. Rasmussen, J. Murawski, V. Frishfeld og O.K. Leth (2024) “Fra operationel oceanografi til digital oceanografi – et modelleringsperspektiv”, *Vand og Jord*, bind 31, nr. 2, side 78–81, <http://www.vandogjord.dk/>.
- [2] DMI-havmodeller, <https://ocean.dmi.dk/models/index.php>.
- [3] E. Kaas (2024) “Multiplicity of Time Scales in Climate and the Earth System”, side 3–52 i B. Booß-Bavnbek, J.H. Christensen, K. Richardson og O.V. Codina “Multiplicity of Time Scales in Complex Systems”, Springer Cham, Schweiz, doi:10.1007/978-3-031-28049-8.
- [4] S. Svith og A. Fonseca (2019) “Nyt værktøj skal styrke beredskabets kamp mod oversvømmelser”, <https://www.dmi.dk/nyheder/2019/nyt-vaerktoej-skal-styrke-beredskabets-kamp-mod-oversvoemmelse>.
- [5] P. A. Arias m.fl. (2021) “Technical Summary”. I “Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change” [V. Masson-Delmotte m.fl. (red.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK og New York, NY, USA, doi:10.1017/9781009157896.002.
- [6] KlimaAtlas, www.klimaAtlas.dk.
- [7] P. Thejll m.fl. (2023) “Methods used in KlimaAtlas, the Danish Climate Atlas”, DMI Rapport 22-37, ISBN 978-87-7478-736-5, https://download.dmi.dk/Research_Projects/klimaAtlas/v2022a/Rapport_22-37.pdf.
- [8] E. Andrée, J. Su, M.A.D. Larsen, M. Drews, M. Stendel og K.S. Madsen (2023) “The role of preconditioning for extreme storm surges in the western Baltic Sea”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, bind 23, side 1817–1834, doi: 10.5194/nhess-23-1817-2023.



Kristine S. Madsen er forsker og specialkonsulent i Vejr-forskningsafdelingen på DMI. Hun forsker i spillet mellem vand, vejr og klima, med speciale i havniveaustigninger og stormfloder.



Erik Buch er tidligere afdelingsleder på DMI og har forsket i fysisk oceanografi.



Erik K. Hansen er operationel meteorolog på DMI. Han arbejder med udarbejdelse af vejrudsigter og varsler, herunder særligt stormflodsvarsling.



Jacob W. Nielsen er specialist i operationel havmodellering i Vejr-forskningsafdelingen på DMI.



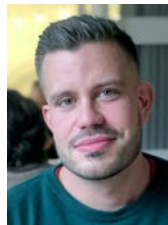
Martin Stendel er forsker i Nationalt Center for Klimaforskning (NCKF) på DMI og arbejder bl.a. med rekonstruktion af historiske data fra Rigsarkivet i projekt ROPEWALK.



Morten A.D. Larsen er enhedsleder for Hav og Radar i Vejr-forskningsafdelingen på DMI.



Peter Aakjær er tidligere direktør på DMI og har forsket i meteorologi og geofysik.



Sebastian Pelt er meteorolog i Vejr-forskningsafdelingen på DMI.



Xiaohua Yang er specialist i operationel vejrmodellering i Vejr-forskningsafdelingen på DMI.