



Danmarks Meteorologiske Institut

Supplement i forbindelse med ”Arbejdsgruppe om undersøgelse af sikringsniveauer omkring København”

Danmarks Meteorologiske Institut (DMI)

København, januar 2024

Primære bidrag, stormfloder: Morten Andreas Dahl Larsen, Maryna Blokhina, Jens Murawski og Jacob Woge Nielsen

Yderligere bidrag fra (alfabetisk), stormfloder: Vilnis Frisfelds, Vibeke Huess, Kristine Skovgaard Madsen, Sebastian Pelt, Jun She, Martin Stendel og Jian Su

1 - Introduktion.....	3
1.1 - Opbygning af dette supplement til hovedrapporten.....	4
5 - Kapitel 5, supplement	4
5.1 – Stormflodsmodel og simuleringer.....	4
5.1.1 - Reproduktion af Andrée et al. (2023).....	4
5.1.2 - Lokalteter	4
5.1.3 - Modelversion	5
5.1.4 - Modelopsætning - Rumlig opløsning og domæner.....	6
5.1.5 – Konklusioner for modelversion og modelopsætning.....	7
5.2 – Simuleringslængde og modelgrænser.....	8
5.2.1 - Simuleringslængde.....	8
5.3 - Bølgeopstuvning.....	10
5.4 – Fyldningsgrad i Østersøen	13
5.5 - Vindstyrke (1872)	17
5.5.1 - Historiske vindstyrker.....	17
5.5.2 - Forøgelse af vindstyrken	19
5.6 - Stormforløb og vindretning.....	21
5.7 – Vandstandsgradienter for stormfloder fra syd	24
6 - Kapitel 6, supplement	26
6.1 – Klimaændringer for havniveau	26
8 - Kapitel 8, supplement	27
8.1 - Opsummering og konklusioner	27
Referencer	28

1 - Introduktion

I perioden januar-oktober 2023 pågik arbejdet i arbejdsgruppen ”*Arbejdsgruppe om undersøgelse af sikringsniveauer omkring København*” med deltagelse af Kystdirektoratet (KDI), Danmarks Meteorologiske Institut (DMI), Transportministeriet, Miljøministeriet, Københavns kommune, Hvidovre kommune, Dragør kommune, Tårnby kommune, Sund og Bælt, Metroselskabet, Københavns lufthavn samt Banedanmark. Dette arbejde foregik ved møder i, omtrent, månedlig frekvens med det formål at, initialt, opnå en fælles forståelse for, og definition af, problemstillingen for løbende at levere input og diskussion af det tekniske arbejdsholds arbejde som i slutningen af periode mundede ud i en *hovedrapport* og et dertilhørende kortere notat med hovedresultater. Forløbet i arbejdsgruppen indbefattede også undervejs diskussioner med flere interessenter samt to specifikke faglige møder med rådgivende konsulentvirksomheder for diskussion og kritisk gennemgang af arbejdsgruppens resultater. Det tekniske arbejdshold bestod af KDI, som også havde det koordinerende og redaktionelle ansvar, samt DMI som leverede stormflodsmodellering samt analyser af klimaændringer.

Oplægget til arbejdsgruppens arbejde var, jf. tidslinje og initialt budget, at det skulle basere sig på eksisterende viden, data og modelarbejde, hvorved der i overordnede træk, i hvert fald for DMI, ikke skulle foretages ekstra model-kørsler eller databearbejdning. Denne eksisterende viden indbefattede for DMI i store træk konklusioner fra primært André et al. (2022) og André et al. (2023). Løbet af arbejdsgruppens arbejde og diskussioner blev det dog tydeligt at der på tværs af arbejdsgruppen var et ønske om en yderligere udfoldelse af nogle af DMI's analyser som hovedrapporten baserede sig på, alene for stormfloder fra syd, for derved at opnå en forøget robusthed i resultater og konklusioner inden for rapportens specifikke fokus, nemlig sikringsniveauer for København.

I dette lys er dette *supplement* til hovedrapporten foretaget af DMI i perioden august 2023 - primo 2024. Dette supplement indbefatter, modsat hovedrapporten, ekstra model-kørsler og databearbejdning indenfor to overordnede emner som skal udfolde aspekter af, samt robustliggøre konklusioner for, stormfloder for København (og Købe bugt) fra syd:

- **Stormflodsmodellering:** En markant udfoldet serie af systematiske justeringer til de grundlæggende forhold som modelkørslerne i André et al. (2022) og André et al. (2023) adresserer. Disse kørsler adresserer indflydelsen af: Modelversion, modelopsætning (domæner og rumlig opløsning), simuleringsperiode, bølgeopstuvning, fyldningsgrad i Østersøen, historiske vindektremer, stormforløb og vindretning samt klimaændringer (for havniveau).
- **Klimaændringer for ekstremvind:** En specifik analyse til robustliggørelse af konklusioner omkring fremtidige ekstremvinde for Østersøen, som ligger til grund for stormfloder for København fra syd.

Analysen baserer sig herved, jf. opdraget, primært på nye modelsimuleringer og processering af data snarere end inddragelse af ny litteratur.

Som i André et al. (2023) og i hovedrapporten er det konceptuelle udgangspunkt i arbejdet at evaluere difference-niveauer til referencesimuleringer. Det vil sige at reproduktionen af 1872-stormfloden i André et al. (2023), som også reproduceres i dette supplement, anses som det modeltekniske referencepunkt, hvorved afvigelserne herfra, inden for de forskellige fokusområder, er supplementets hovedfokus. Denne referencesimulering var i André et al. (2023) 252 cm for Køge. Sammenhængen mellem dette niveau og 1872-stormens hyppigst benyttede hændelsesniveau på 286 cm (aflæst på kort og justeret for havniveauændringer og relativt landhævning) er udfoldet i hovedrapporten.

1.1 - Opbygning af dette supplement til hovedrapporten

For at optimere læsning og forståelse imellem hovedrapport og supplement er kapitelstrukturen holdt konsistent herimellem. Dvs. at idet indeværende supplement adresserer en udfoldelse af kapitel 5, 6 og 8 i hovedrapporten, er denne struktur også benyttet her (se indholdsfortegnelse).

5 - Kapitel 5, supplement

5.1 – Stormflodsmodel og simuleringer

Alle analyser i indeværende supplement afspejler en modelopsætning med en atmosfærisk forcering svarende til André et al. (2023), som også benyttet i hovedrapporten. Denne modelopsætning har til formål at simulere stormfloden i fra 13. november 1872 som basis for hvad der kan betegnes som noget nær den "perfekte storm" til analyse af maksimale stormflodshøjder for det sydlige Københavnsområde og Køge bugt. Modifikationer til denne modelopsætning er systematisk gennemgået nedenfor i underkapitler med hvert deres separate fokus.

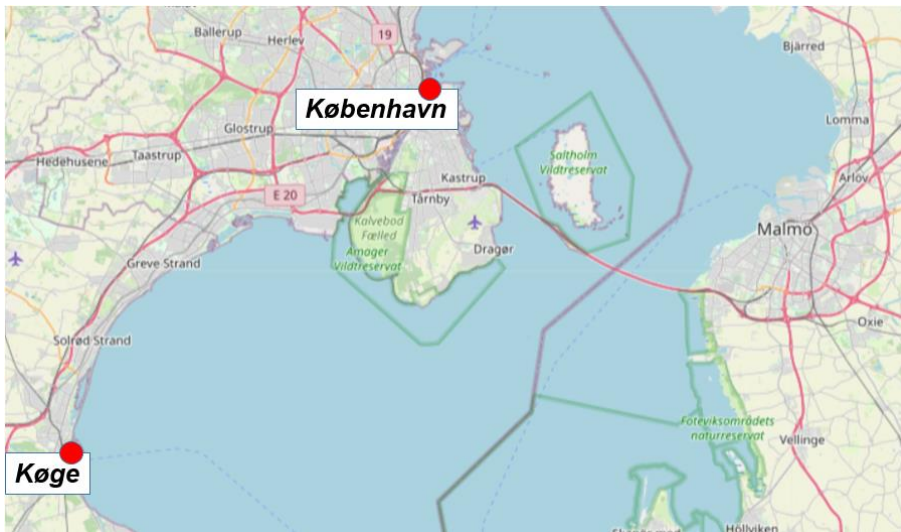
5.1.1 - Reproduktion af André et al. (2023)

Den initiale analyse for dette supplement indbefattede en modelteknisk reproduktion af resultaterne i André et al. (2023) for at sikre samme udgangspunkt for de videre modifikationer. Dette arbejde blev også nødvendiggjort af et manglende overlap i personalesammensætning inden for de udførende tekniske analyser, hvorved et overblik over modelopsætning, filstruktur og IT-tekniske specifikationer var nødvendigt.

Denne reproduktion blev udført på tilfredsstillende vis ved brug af adskillige simuleringer med en generel divergens i maksimal stormflods-vandstand ved Køge på ca. 0,6% (250,5 cm kontra 252 cm i André et al. (2023)). At resultaterne ikke stemmer 100% overens er forventeligt og kan bl.a. skyldes forskelle i processeringskæden og compiler på supercomputer-systemer og en generel sensitivitet indenfor (som udfoldet her indenfor +/- ca. 1%) overfor selv meget små ændringer i forcering, som det kan være svært at sikre en fuldstændig overensstemmelse med. Én kendt forskel mellem André et al (2023) og indeværende studie inkluderer genstartsfiler og procedure som benyttes til initialisering af modellen (se afsnit 5.1.5 og tabel 2) som skaber et sammenligneligt grundlag, men med minimale forskel i output.

5.1.2 - Lokalteter

Som i André et al. (2023) og i meget evalueringsarbejde med DMI's operationelle modelsystem, vurderes modellens resultater i fht. observationer af vandstand over tid. Disse observationer er ofte foretaget i havne, fordelt på tværs af Danmark. Til indeværende arbejde benyttes primært lokaliteterne *København* og *Køge* som udtryk for specifikke lokaliteter for vandstandsmålere placeret jf. kortet i figur 1. Heraf er primært *Køge* i fokus i dette supplement da denne lokalitet repræsenterer den længste tidserie i regionen syd for København til brug ved vurdering af stormfloder fra syd, som er i fokus her, og fordi stormfloden i 1872 er veldokumenteret her med en maksimal højde på 2,86 m jf. hovedrapporten (DVR90 og justeret for klimaændringer og relativt landhævning). Lokaliteten Landsort bruges ligeledes i dette supplement, ligesom i hovedrapporten, da der her forefindes en lang observations-tidsserie og pga. den geografiske placering som muliggør et brug af denne som en indikator for det generelle opfyldningsniveau af Østersøen.



Figur 1. Placering af lokaliteterne København og Køge. Kilde til kortmateriale; OpenStreetMap.

5.1.3 - Modelversion

Arbejdet i indeværende supplement er baseret på tre overordnede versioner af HBM-modellen, som beskrevet nedenfor. Ad notam skal det nævnes at nummereringen af HBM modelversioner ikke historisk har fulgt stringente regler, hverken for overordnede eller sekundære udgivelser, hvorved graden af opdatering af modelkode ikke 1:1 kan aflæses i versionsnummer, såsom ml. HBM version 2.8 og 5.5.

Versionering og nummerering kan dermed dels relatere til modelkoden (HBM version), og dels til den geografiske opsætning, dvs. modelområder (domæner), deres antal, detaljeringsgrad, og indbyrdes indlejring fra det groveste til den fineste beregningsnet.

HBM version 2.8: Denne version af HBM er den samme som benyttet i hovedrapporten "Arbejdsgruppe om undersøgelse af sikringsniveauer omkring København". Hovedrapporten indbefattede ikke nye modelkørsler, men baserede sig, for hvad angår stormflodsmodellering fra DMI's side, primært på arbejdet i André et al. (2022) og André et al. (2023). HBM version 2.8 er den modelkode som pt. benyttes til operationel stormflods- udsigter og varsling via officielle DMI kanaler (dmi.dk) og afspejler derfor også mange års udvikling, kalibrering og validering inden for simulering af ekstreme vandstande under forskellige forhold på tværs af den danske kystlinjegeografi. Kalibreringsparametre for HBM inkluderer bl.a. bund-ruhed, domæne- og batymetri- justeringer.

HBM version 5.5: Sideløbende med det eksisterende operationelle stormflods-modelopsætning, pågår på DMI løbende en udvikling og opdatering af nye modelrutiner i henhold til en forbedret implementering af processer og variation. HBM version 5.5 afspejler den nyeste udviklings-version som endnu ikke er implementeret operationelt. Forskelle mellem HBM version 2.8 og 5.5 inkluderer en mere grundig beskrivelse af tidevand, en forbedret metode til vertikal opblanding og beregning af indre friktionsforhold (som især giver en bedre repræsentation af ekstreme lavvande), rent teknisk optimering af modelkoden, forbedringer relateret til modellens termodynamik samt en mere udviklet integrering af havis.

HBM version 5.5 – version med fem domæner: For kørsler med fem domæner, som beskrevet herunder, er der benyttet HBM version 5.5, men med mindre justeringer i vindtræk (wind drag) koefficienter, som er opnået gennem manuelle justeringer foretaget i løbet af det igangværende forskningsprojekt (EDITO) som disse kørsler udspringer fra.

5.1.4 - Modelopsætning - Rumlig opløsning og domæner

I indeværende supplement er tre forskellige geografiske modelopsætninger benyttet jf. nedenstående tabel 1 (som også viser relation til modelversion).

	HBM vers. 2.8	HBM vers. 5.5	HBM (vers. 5.5) ¹
3 Domæner	X	X	
4 Domæner	X	X	
5 Domæner			X

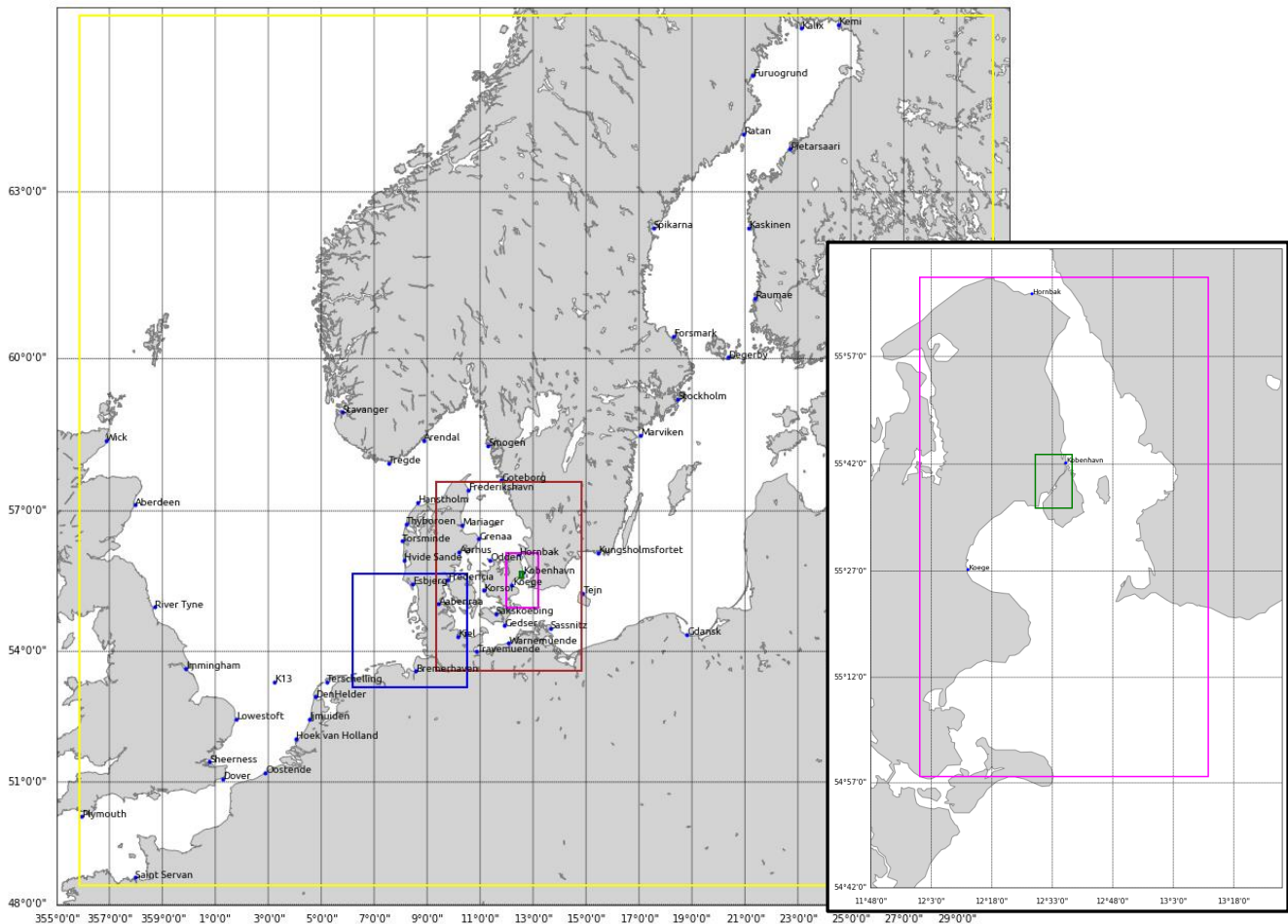
Table 1: Oversigt over kombinationen af modelopsætninger og geografisk modelopsætning.

Tre domæner: Denne mest simple domæneopsætning i indeværende arbejde afspejler ét overordnet domæne i 5500 m rumlig opløsning som afgrænses mod vest i den engelske kanal ved 4. længdegrad, mod nord mellem den nordligste spids af Skotland og Norge ved ca. 59. breddegrad og dækker mod øst hele Østersøen inklusiv den Botniske samt Finske bugt (figur 2). Inden for dette overordnede domæne forefindes i denne modelopsætning yderligere to mindre, dynamisk indlejrede (Eng: "nestede") domæner/under-områder, nemlig ét for Vadehavet og ét for de danske farvande som afgrænses mod nord mellem Vendsyssel og Sverige ved 57.5 breddegrad og mod øst henover Bornholm ved ca. 14.8. længdegrad (i henholdsvis 900 m og 1800 m opløsning). Af disse har overvejende det sidstnævnte indlejrede domæne indflydelse på simulerede stormflodsniveauer ved København fra syd.

Fire domæner: Denne modelopsætning svarer til opsætningen med tre domæner, men med et ekstra indlejret domæne for det regionale område omkring København fra ca. Helsingør/Helsingborg i nord til Møn mod syd i ca. 185 m opløsning (figur 2).

Fem domæner: Denne modelopsætning svarer til opsætningen med fire domæner, men med et ekstra indlejret domæne som afspejler Københavns inderhavn fra ca. Avedøre til Nordhavn i ca. 50 m opløsning (figur 2).

¹ Med modifikationer som beskrevet i afsnit 5.1.3.



Figur 2. Den geografiske udbredelse af modelopsætningen. Det gule, blå og røde domæne (kort til venstre) afspejler opsætningen med tre domæner. Det lyserøde domæne er tilføjet for opsætningen med fire domæner og det grønne domæne for Københavns havn (kortet til højre) er yderligere tilføjet for opsætningen med fem domæner. Domænernes omtrentlige rumlige opløsning er som følger – gul: 5500 m, rød: 1800 m, blå: 900 m, lyserød: 185 m og grøn: 50 m.

5.1.5 – Konklusioner for modelversion og modelopsætning

Det har været et ønske i dette arbejde at evaluere modelversionen fra André et al. (2023), som svarede til den operationelle stormflodsmodel-opsætning på DMI da arbejdet blev igangsat (ca. 2019)², imod modelversioner og opsætninger som dels indgår i arbejdet med at udvikle det operationelle modelsystem (HBM version 5.5, på tværs af domæner³) samt opsætninger som indgår i igangværende forskningsprojekter med meget specifikke formål såsom at evaluere indflydelsen af (og på) mere lokale strukturer (såsom i opsætningerne med fire og fem domæner og opløsninger ned til henholdsvis ca. 185 m og 50 m). Denne evaluering indbefatter primært en analyse af ekstreme vandstande.

² I 2021 er der tilføjet indlejrede domæner for Limfjorden, Lillebælt og Roskilde fjord for at forbedre prognoser specifikt for disse områder.

³ Det skal hertil nævnes at DMI i 2023 igangsatte et selvstændigt udviklingsspor mhp. at analysere NEMO-modellen (version 4.2) til brug ved kystnære ekstremer og potentielt operationelt brug. Dette er et mange-årigt projekt og konklusioner herfra har tidlige perspektiver som rækker langt ud over dette arbejde.

Opsummeret for denne analyse af model- version og opsætning, som beskrevet i kapitlerne ovenfor, ses de to overordnede konklusioner at der dels er et generelt fald i maksimal stormflodshøjde (i Køge) med stigende modelversion (fra version 2.8 til version 5.5) og at der dels er et tilsvarende generelt fald i maksimal stormflodshøjde med antal domæner i den geografiske modelopsætning. Disse konklusioner ses eksempelvis af tabel 2. Ved valget af model- version og opsætning til videre brug i arbejdet beskrevet herunder følger heraf valget mellem at benytte opsætninger med mere opdaterede fysiske proces- beskrivelser og forfinet rumlig opløsning kontra en opsætning som løbende er kalibreret og valideret til netop brug stormflodsmodellering og ekstremværdier igennem en længere årrække. Kalibreringen indbefatter i denne sammenhæng bl.a. batymetri-justeringer, bundfriktion og overflade-’mixing’, og nogle af disse tiltage for at tage højde for processer som foregår på mindre skalaer end modellens rumlige opløsning. I dette lys - for at læne sig op ad arbejdet op til hovedrapporten og konklusionerne heri, som følge af den mange-årige kalibrering og fordi denne udgør er DMI’s nuværende stormflods-opsætning - er det valgt at fortsætte med HBM-modelversion 2.8 i de resterende analyser, beskrevet nedenfor.

HBM modelversion	2.8 (Andrée et al. (2023))	2.8	5.5	(5.5)	
Startdato for simulering	<i>Baseret på genstartsfiler fra fortløbende længere beregninger hvorfra en genstartstilstand benyttes</i>	1. Aug. 1872			
Domæne-setup (antal domæner)	3	3	4	4	5
København (cm)	114	110,3	116,4	86,6	88,1
Køge (cm)	252	250,5	245,4	239,2	228,8

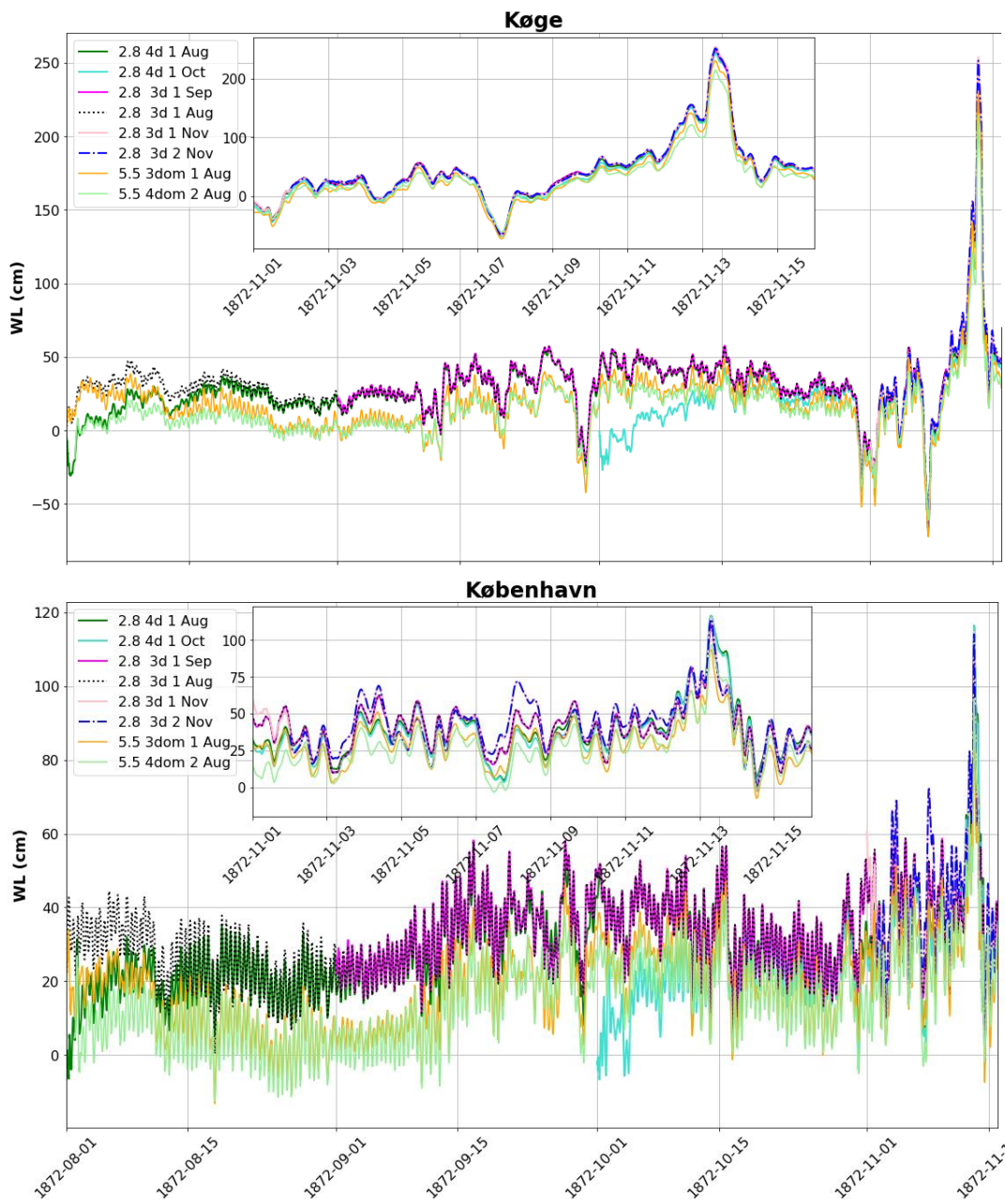
Tabel 2. Oversigt over maksimalt simulerede stormflodsniveauer for 1872-stormfloden på basis af forskellige model- versioner og opsætninger.

5.2 – Simuleringslængde og modelgrænser

5.2.1 - Simuleringslængde

Simuleringslængdens indflydelse på den maksimalt simulerede vandstand d. 13/11 1872 blev undersøgt. Dette dels i forbindelse med at sikre en korrekt videreførsel af arbejdet i Andrée et al. (2023), dels som en evaluering af indflydelsen på simuleringstiden for analyserne i dette supplement og dels for at sikre at minimal påvirkning af den maksimale simulerede stormflodshøjde. Dette arbejde blev udført med model- starttidspunkter i månedsstart for august, september, oktober og november 1872. Resultaterne er vist i figur 3.

For denne analyse ses at ændringen i den maksimale stormflodshøjde i Køge og København var minimal imellem simuleringerne med startdatoer imellem 1. august og 1. oktober (0,8 cm, se også figur 3). Idet en stor portion af simuleringerne, såsom dem omhandlende opfyldningsgrad, var baseret på arkiverede genstarts-betingelser og simuleringens længden var håndtérbar inden for projektperioden, blev 1. august brugt som generel startdato for kørslerne i dette supplement. Af figurerne nedenfor fremgår det også at modelversionen (som kombination af både modelkode og geografisk opsætning) er den styrende faktor for den resulterende maksimale vandstand snarere end de anvendte startdatoer.



Figur 3. Indflydelse af startdato på simuleret maksimal stormflodshøjde (cm) ved Køge og København.

5.2.2 - Modelgrænse

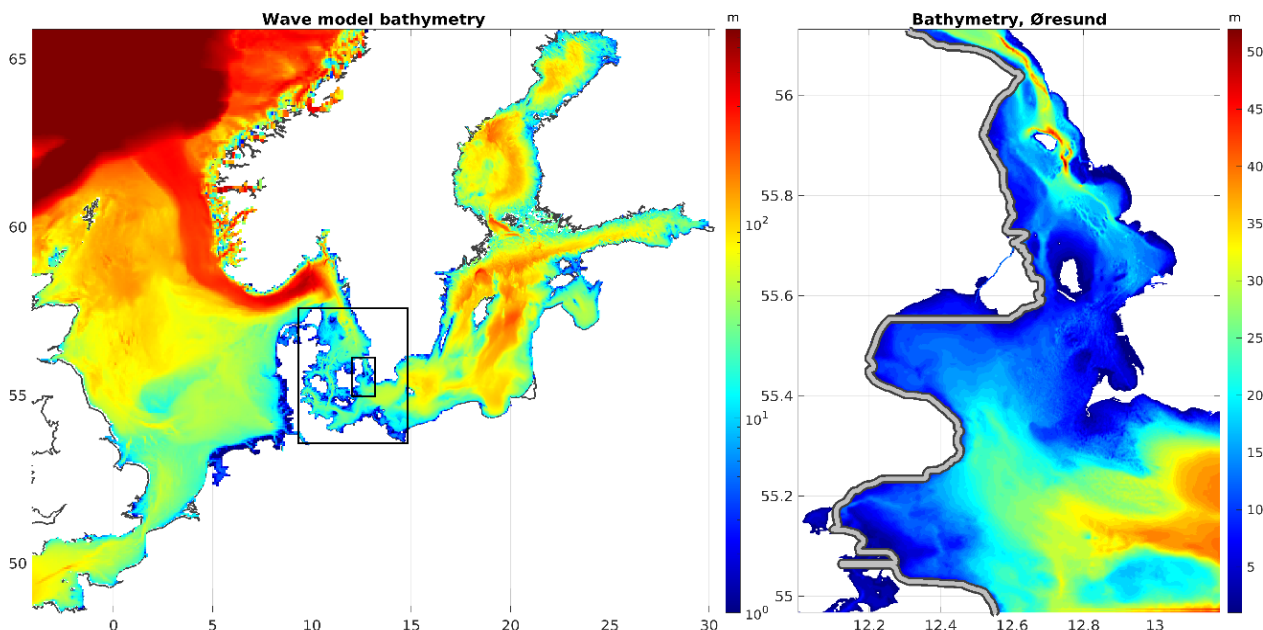
I den operationelle stormflodsmodel HBM-DKSS, som kører til 24/7 til varslingsformål og bred offentlig visning af vandstand i Danmark (på bl.a. www.dmi.dk), er den nordlige modelgrænse ml. Norge og Orkney øerne justeret vertikalt (Z) til -10 cm. Dette er gjort for at opnå en bedre overførsel af vandstandssignalet fra Nordsøen til Østersøen. Denne justering er ikke inkluderet i André et al. (2023) og i hovedrapporten, men sensitiviteten af denne vertikale modelgrænse ønskedes evalueret her. Analyserne viser at en justering af dette Z-niveau blev direkte videreført til de simulerede maksimale vandstande i København (tabel 3) med cirka samme difference (9-10 cm), hvorimod de maksimale vandstande i Køge påvirkedes i størrelsesordenen 4,7-9,5 cm, hvilket sandsynligvis kan henføres til tærsklen henover Øresund omtrent ved Øresundsbroens placering. Alle analyser herefter blev udført uden denne justering, som i hovedrapporten.

	Z: -10 cm	Z: 0 cm
København	104.9	114.1
Køge	244.1	251.6

Tabel 3. Eksempel på forskelle i maksimalt stormflodsniveau (cm) ved justering af nordlig modelgrænse.

5.3 - Bølgeopstuvning

Bølgeprognoser for Østersøen produceres af den 3. generations spektrale bølgemodel WAM Cycle 4.5 (Komen et. all, 1994, WAMDI group paper, JPO 1988). Modellen kører i en indlejret sekvens af tre domæner for at sikre, at dønninger fra Nordsøen og Østersøen kommer ind i Skagerrak og Øresund. Det store domæne dækker Nordsøen og Østersøen i ca. 5 km opløsning og de indre danske farvande i ca. 1 km opløsning (figur 4 og tabel 4). Denne modelopsætning giver grænsebetingelser for et tredje indlejret domæne, der dækker Øresund i ca. 200 m opløsning. Ved WAM-modellens grænse overføres det fulde bølgeenergisppektrum langs modellens grænseflade. Ved de åbne grænser i det nordatlantiske domæne tilføres modellen JONSWAP-spektre med 30 km frit stræk.



Figur 4: Bølgemodellens batymetri (venstre), Nordsøens/Østersøens domæne (≈ 5 km) og indlejrede underdomæner for de indre danske farvande (≈ 1 km) og Øresund. Figuren til højre viser den kystlinje, der er brugt til beregningerne i figur 6.

Bølgemodellen tager højde for dybdeinduceret bølgebrydning som en funktion af forholdet mellem bølgehøjde og vanddybde, hvilket hurtigt spreder bølgeenergien på lavt vand. Metoden blev oprindeligt udviklet til SWAN-bølgemodellen. For at fremskynde forøgelsen af bølger fra roligt hav har den spektrale energi en nedre grænse, der svarer til en bølgehøjde på 10 cm. Den spektrale opløsning er på 36 retninger (10 grader) og 35 frekvenser. Det svarer til bølgeperioder i spændet 0,94-23,94 sekunder og bølgelængder (på dybt vand) mellem 1,37 og 895 meter. Tidsskridtet for udbredelsen i Østersøen er sat til 45 sekunder, og tidsskridtet for kildeleddet er sat til 360 sekunder. WAM-modellen bruger det satellit-afledte OSTIA operationelle havis-analyseprodukt (Operational SST and Sea Ice Analysis), herunder OSI SAF-data.

Model	North Sea / Baltic Sea	Danish straits	Øresund
Spatial coverage, long	4° 6' W – 30° 19' E	9° 20' E – 14° 49' 10" E	12° 0' 5" E – 13° 11' 55" E
Spatial coverage, lat	48° 32' 30" N – 65° 53' 30" N	53° 35' N – 57° 35' 30" N	54° 58' 3" N – 56° 7' 57" N
Spatial step	3' x 5'	30" x 50"	6" x 10"
Advection time step	45 sec	45 sec	45 sec
Source time step	6 min	6 min	6 min
Number of directions	36	36	36
Number of freq.	35	35	35
Freq1	0.04177248 Hz	0.04177248 Hz	0.04177248 Hz

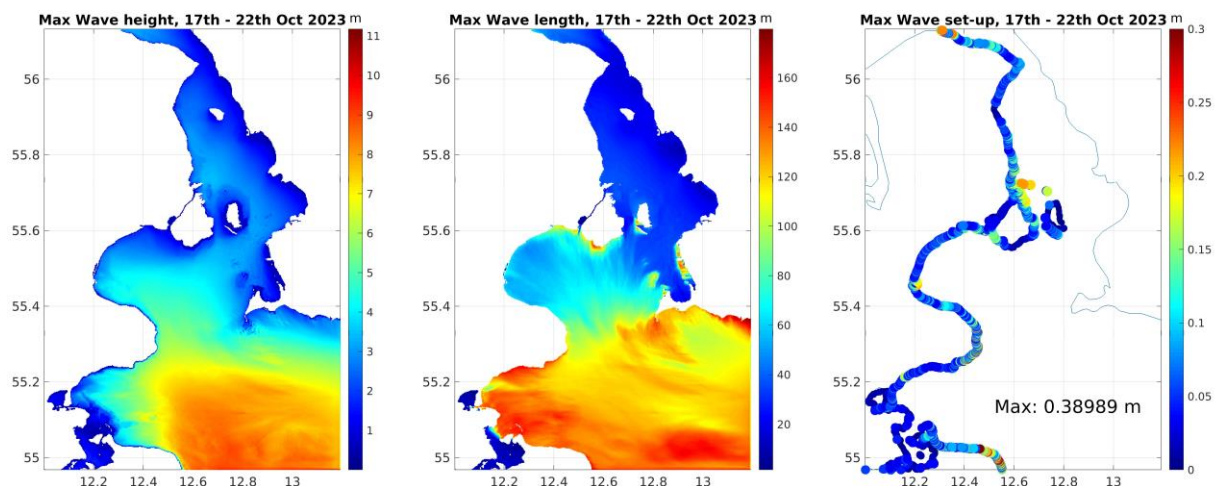
Tabel 4. Bølgemodel-konfiguration.

Bølgeopstuvningen beregnes ud fra den signifikante bølgehøjde H_s , dybvandsbølgelængden λ og havbundens hældning β . Havbundens hældning er dimensionsløs og beskriver dybdeændringen pr. afstandsændring til kysten. Hældningen beregnes som den kystnære værdi af vanddybden divideret med halvdelen af gittercellens størrelse, idet det antages, at den tilstødende land-gittercelle er helt dækket af land. Denne tilnærmelse ses at have indflydelse på modelresultaterne og i indeværende analyse er den benyttede hældning baseret på en maksimal værdi på 0,05. Værdierne ligger dog inden for det område, der er blevet brugt i store, globale vurderinger.

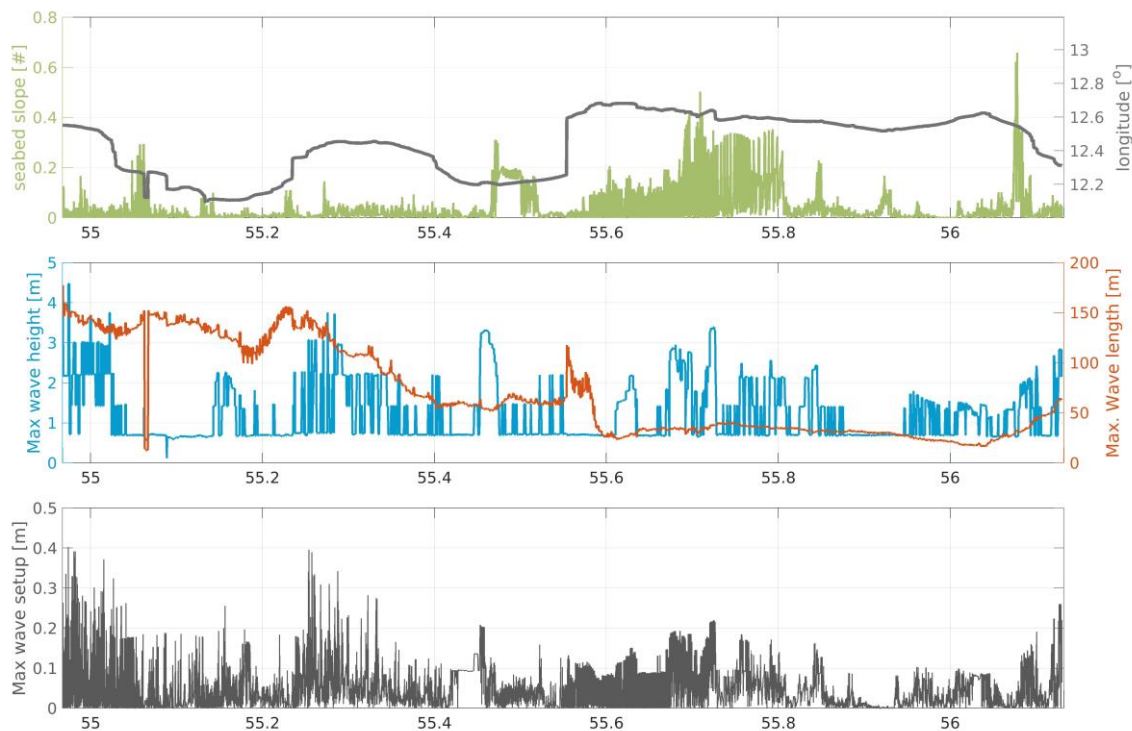
Dybvandsbølgelængden er blevet beregnet ud fra middelperioden T_m ved hjælp af spredningsrelationen $\lambda = gT_m^2/2\pi$.

$$\delta\zeta_w = 0.385 \cdot \beta \sqrt{H_s \cdot \lambda} = 0.385 \cdot \beta \sqrt{H_s \cdot g/2\pi T_m}$$

Figur 5 beskriver den ekstreme konfiguration af bølger: maksimal signifikant bølgehøjde til venstre, maksimal bølgelængde i midten og bølgeopstuvning til højre. Køge Bugt og den sydlige del af Amager er beskyttet mod bølger, der kommer fra østlige retninger. Den dominerende bølgeretning er sydvest for bølger, der genereres i den sydvestlige del af Østersøen. Den maksimale værdi af signifikant bølgehøjde i Køge Bugt er 4-6 m offshore og under 3 m på land. Den gennemsnitlige bølgeperiode og bølgelængde stiger med fetch og når værdier over 120 m syd for Amager. På land varierer værdien af den maksimale signifikante bølgehøjde kraftigt som følge af dybdeinduceret bølgebrydning, der er inkluderet i modellen. Modelparametriseringen fjerner energien fra de brydende bølger fra spektret (figur 6).



Figur 5: Resultater af maksimalbølgemodellen: Signifikant bølgehøjde (venstre), bølgelængde på dybt vand (midten) og bølgeopstuvning (højre) under 1872-stormen: 10. til 15. november 1872. Bølgeopstuvningen er beregnet ved hjælp af signifikant bølgehøjde, bølgelængde og havbundens hældning θ .



Figur 6: Kystbølgekonfiguration og bølgeopstuvning langs den danske kystlinje i Øresundsdomænet. Øverst: længdegrad (sort) og havbundshældning (grøn), i midten: signifikant bølgehøjde (blå) og middelbølgeperiode (rød) og nederst: bølgeopstuvning.

Bølgekonfigurationen viser et mønster med regionalt meget forskellig dynamik imellem områderne: Østkysten af Møn, Køge bugt og Køge havn, syd for Amager og nord for Amager. Figur 6 giver et mere detaljeret overblik over den maksimale bølgestruktur (bølgehøjde og bølgelængde) og bølgeopstuvning langs en linje, der løber fra syd til nord (figur 4), fra Møn til nord for Helsingør. Møns østlige kyster er udsat for højere bølger med et langt frit stræk fra østlig retning. Dette genererer et bølgeopstuvning på omkring

20 cm. Længere mod nord, i Fakse Bugt, aftager bølgehøjden, og den bølgeinducerede havniveauændring stiger også. I Køge Bugt øges de sydvestlige bølgers frie stræk og den gennemsnitlige bølgelængde øges ligeledes. Dette, sammenholdt med en markant højere værdi for havbundens hældning, dog maks. 0,05 som beskrevet ovenfor, fører til en højere værdi af bølgeopstuvningen lidt syd for Køge havn. Det regionale maksimum for bølgeinduceret opstuvning i analysen er på ca. 39 cm. Tilsvarende er percentilerne 50%, 83% og 95% for samme område henholdsvis 26 cm, 35 cm og 38 cm. For området omkring København er det tilsvarende maksimum nærmere i størrelsesordenen ca. 20 cm. Nord for Køge havn falder bølgehøjden på lavt vand på grund af bølgebrydning. Bølgelængden fortsætter dog med at stige, hvilket fører til signifikante værdier af bølgeopstuvning syd for Amager. Ovenstående betragter bølger genereret i den sydlige og sydvestlige Østersø, der forplanter sig på land og fører til en bølgeinduceret opstuvning langs kysterne syd for Amager, men der er også en mærkbar komponent af bølgeinduceret opstuvning nord for Amager, som genereres af bølger i Kattegat.

Desuden blev analysen for bølgeopstuvning udført med forøgede vindstyrker på 10%, hvilket resulterede i forøgelser af signifikante bølgehøjder og bølgeperioder langs den danske kystlinje i det vestlige Øresund, men kun små ændringer i den maksimale bølgeopstuvning med nogle få centimeter.

Usikkerheder for denne analyse inkluderer:

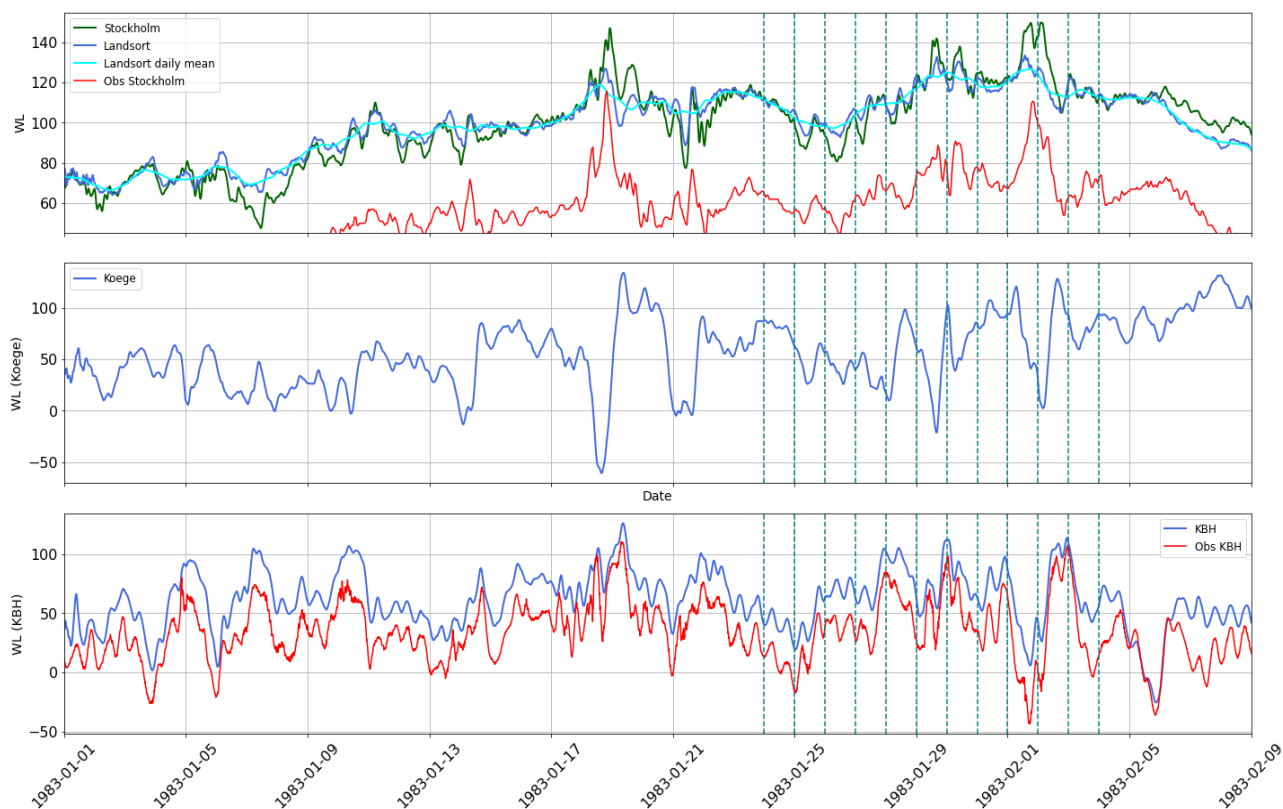
1. Den optimale metodiske tilgang for undersøgelsen er en kombineret vurdering af bølger og havcirkulation for at estimere bølgenes indvirkning på den gennemsnitlige havcirkulation og hydrografi. Dette kunne ikke lade sig gøre inden for projektets varighed, hvorved den empiriske tilgang er benyttet til de regionale vurderinger, hvor koblede vurderinger heller ikke er særlig gennemførlige. Den resulterende maksimale bølgeopstuvning er derfor højere end det, der forventes fra koblede studier, hvilket ville være i størrelsesordenen 20-30 cm for stærke storme ved udsatte kystlinjer.
2. Den empiriske formel og parameterværdien (0,385), der er brugt i vurderingen af bølgeopstuvningen, er en standardværdi og repræsenterer gennemsnittet af de vurderingsmetoder, der er tilgængelige i litteraturen. Disse metoder bruges dog normalt ikke til vurdering af ekstreme forhold og kan føre til for høje værdier under storme.
3. Resultaterne er stærkt afhængige af størrelsen på havbundens hældning, som er blevet estimeret ud fra eksisterende 50 m batymetri. Hældningen er beregnet som den kystnære værdi af vanddybden divideret med halvdelen af gittercellens størrelse. Denne fremgangsmåde forudsætter en skrånende havbund. Et andet problem er, at den batymetri, der bruges til hældningsberegningen, og den batymetri, der bruges til modelgitteret, ikke nødvendigvis passer sammen.

5.4 – Fyldningsgrad i Østersøen

En essentiel komponent for de resulterende stormflodsniveauer i de indre danske farvande ved storme fra syd er graden af opfyldning i Østersøen op til begivenhedens start. Dette er en klar konklusion i André et al. (2023), i hovedrapporten som bygger herpå og er også eksemplificeret i begivenheden (Babet) som forekom d 20-21. oktober 2023 under udarbejdelsen af dette supplement. Under Babet forekom netop kraftige og længerevarende vindforhold fra øst, men i dagene her op til var Østersøen, som følge af kraftig vestenvind, ca. 40 cm over sit middelniveau. Derved sås under Babet stormfloder i de indre danske farvande på niveauer som mange steder langt oversteg, eksempelvis, statistiske 100-års returperiodeniveauer. Babet gav dog ikke anledning til at ændre tilgang og konklusioner i forbindelse med dette arbejde, da denne begivenheden stadig lå et stykke fra 1872-stormen som er udgangspunktet for dette arbejde.

En separat analyse vurderede historiske højvandshændelser i Østersøen, hvor vandstanden oversteg 1 m ved danske, vestpolske, nordtyske og sydsvenske østersøkyster og med samtidige data fra Landsort (siden 1886). Af analysens 344 hændelser fremkom 83,4% ved en positiv fyldningsgrad, 15,4% ved negativ og 1,2% omkring normale vandstande. I denne sammenhæng blev fyldningsgraden beregnet som et døgnmiddel for Landsort dagen før stormfloden. For disse stormfloder var fyldningsgraden i spændet -39 til 79 cm, med et middel på 22 cm.

I André et al. (2023) sås at ændrede fyldningsgrader i Østersøen ved Landsort (som ofte bruges som indikator-lokalitet for fyldningsgrad) i spændet 27-52 cm medførte systematiske ændringer på 20-36 cm for Køge svarende til et forhold herimellem på 69-74%. Denne relation imellem Landsort og, primært, Køge og København udfoldes yderligere her. Den metodiske tilgang i indeværende tager udgangspunkt i stormen i januar 1983 hvor nogle af de højeste fyldningsgrader i Østersøen er målt. Her sås blandt en stigende sekvens som steg fra ca. 90-130 cm over middelniveau fra d. 25-28 januar ved Landsort. Disse niveauer er dog for data på timeniveau – ved midnat, som er modellens starttidspunkt i indeværende opsætning er sekvens snarere ca. 107-123 cm (Obs – se fodnote⁴). Denne sekvens, inkl. nogle dage herefter, er benyttet som startbetingelser for havniveau for HBM modellen for derved at kunne vurdere resulterende havniveau i de indre danske farvande, som funktion af forskellige havniveauer. Specifikt er modellen initialiseret med startbetingelser for havniveau svarende til d. 25. januar 1983 kl. 00:00 (efterfulgt af en kørsel med havniveau for d. 26. januar kl 00:00 og så fremdeles), hvorefter 1872 stormen, inkl. atmosfæriske forhold,



Figur 7. Samhørende værdier for havniveau ved Landsort og Stockholm (top), Køge (midt) og København (nederst) ved stormen i 1983 som er benyttet som basis til analyses om fyldningsniveau af Østersøen.

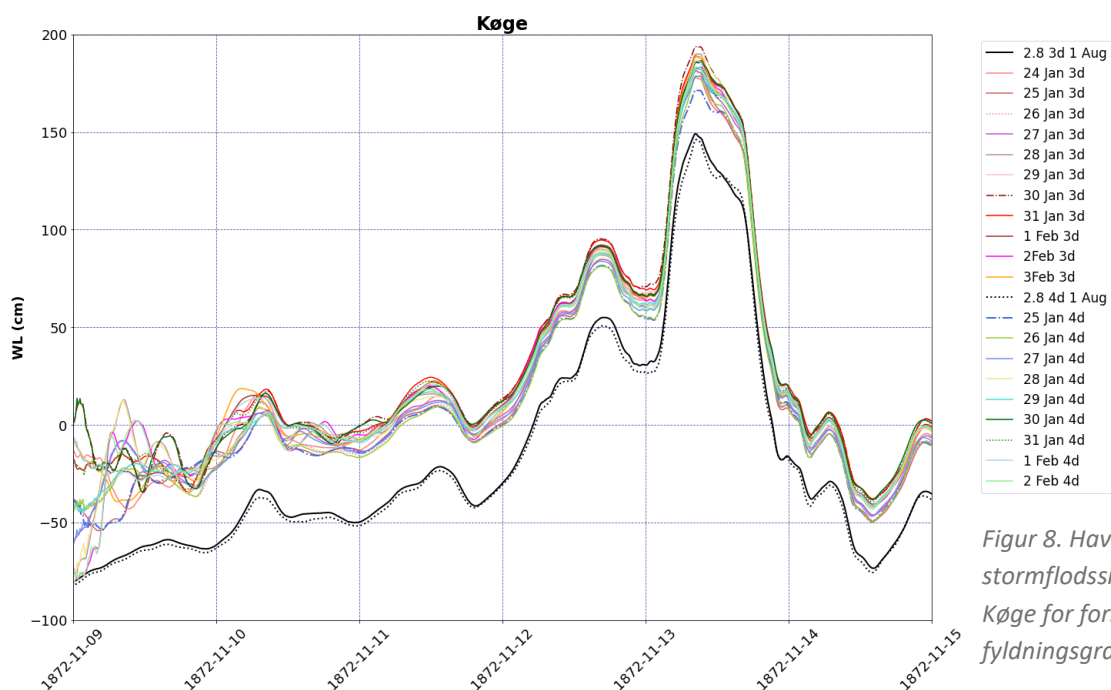
⁴ Disse data for Landsort og Stockholm er modellerede og ikke observerede og skal derfor korrigeres med ca. 40 cm pga. variationer i densitet i vandsøjlen (sterisk effekt). Det reelle fyldningsniveau for denne begivenhed i 1983 er derfor snarere i spændet 50-90 cm, som det også ses af observationsdata.

er simuleret fra d. 9. november 1872 og til efter stormens maksimum d. 13. november. Initialbetingelser fra 1983 er udfoldet i figur 7 og resultaterne analysen ses i figurerne 8-11 samt tabel 5.

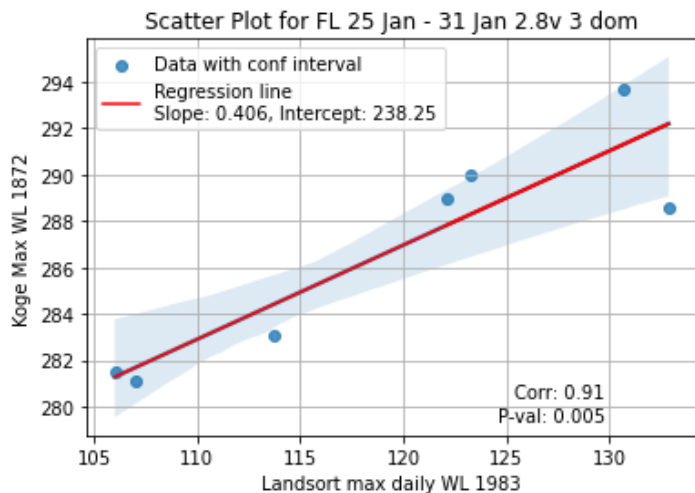
Af resultaterne ses en tydelig sammenhæng mellem det maksimale havniveau i Landsort (henover dét døgn som udgør startniveauet for modelkørslen) og det resulterende maksimale havniveau i eksempelvis Køge. Spændet i det relative forhold mellem initialbetingelser ved Landsort d. 9. november og resulterende havniveau ved Køge d. 13. november ligger imellem 59-90%. Denne sammenhæng er specifikt udfoldet i figur 9, men det må understreges at designet af denne analyse må antages meget rammesættende for udfaldet, hvorved der ikke nødvendigvis kan ekstrapoleres i denne sammenhæng for eksempelvis at afspejle resulterende stormflodsniveauer ved andre fyldningsgrader. Derfor er også konfidensintervallet vist (95%).

Station / dato for startbetingelse	24. jan	25. jan	26. jan	27. jan	28. jan	29. jan	30. jan	31. jan	1. feb	2. feb	3. feb
Landsort_Norra	112.8	106.9	109	114.5	121	123.2	120.9	126	121.7	128.9	123.6
Stockholm	117.5	113.9	114	117.4	122.6	123.3	126.9	128	123.5	144.3	125.1
Kobenhavn	121.4	123.8	125	123	125.5	125.2	127.6	126	124.7	123.9	126.6
Koege	277.9	281.5	281	283.1	290	288.6	293.7	289	285.8	283.3	288.8
Dragor	174	177	177	178.6	183.6	182	186.7	183	180.3	179.5	183.5
Drogden_Fyr	210.6	213.8	212	217.1	223	220.8	226.8	222	218.5	218.4	221.9
Travemuende	452.3	454.8	450	456.4	461.4	457.7	462.7	463	459.5	455.4	456.2
Aabenraa	409.6	408.6	411	412	408.9	409	416.1	414	413.4	410	411.7

Tabel 5. Dagligt havniveau for udvalgte lokaliteter i Østersøen (Landsort og Stockholm) samt i de indre danske farvande (midnat – starten af døgnnet for den pågældende dato), for analysen hvor fyldningsniveauer fra januar 1983 bruges som initial-betingelser for havniveau d. 9. november 1872-stormen som nåede sit maksimum d. 13. november. Obs: Data fra Landsort og Stockholm er modellerede og skal korrigeres med ca. -40 cm pga. variationer i densitet i vandsøjlen (sterisk effekt).

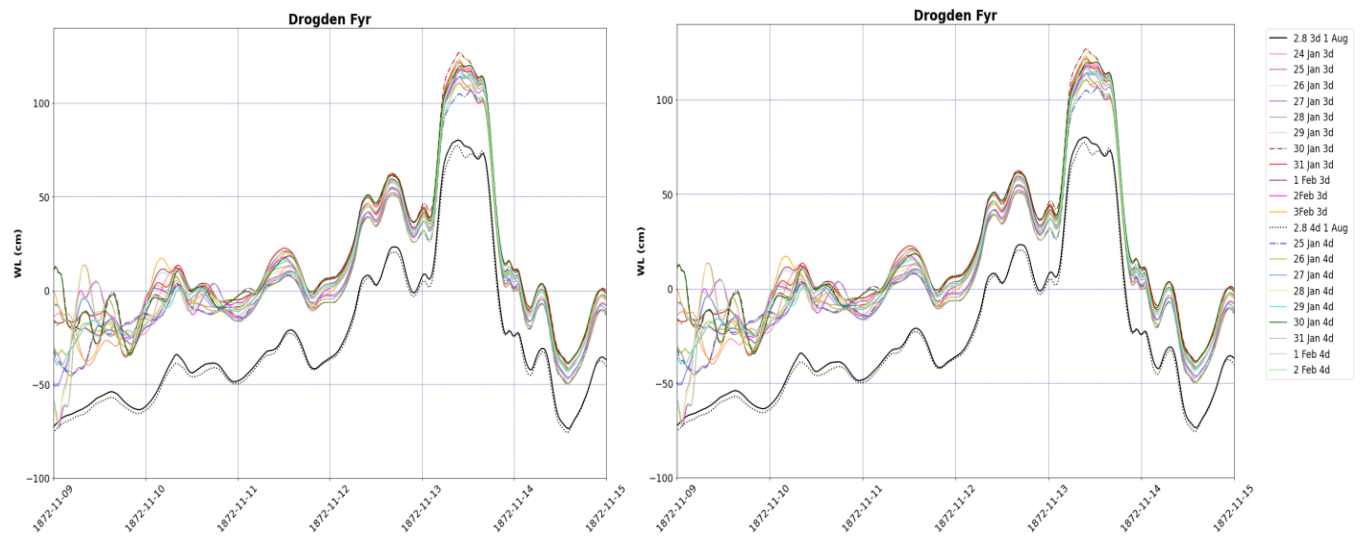
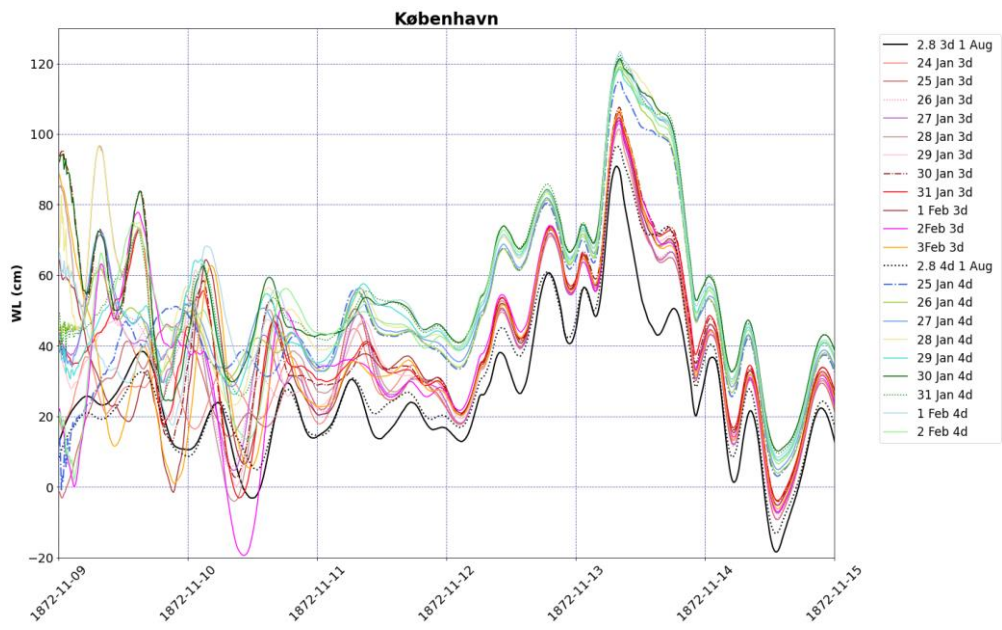


Figur 8. Havniveau for 1872-stormflodssimuleringerne for Køge for forskellige fyldningsgrader i Østersøen.



Figur 9. Sammenhængen mellem den maksimale døgnavandstand v. Landsort og det resulturende stormflodsniveau v. Køge (cm). Specifikke niveauer, lineær trendlinje (inkl. hældning og y-akse skæringsniveau), korrelationsmetrik og konfidensinterval (95%) er angivet.

Figur 10. Havniveau for 1872-stormflodssimuleringerne for København for forskellige fyldningsgrader i Østersøen.



Figur 11. Havniveau for 1872-stormflodssimuleringerne for Drogden (venstre) og Hundige (højre) for forskellige fyldningsgrader i Østersøen.

5.5 - Vindstyrke (1872)

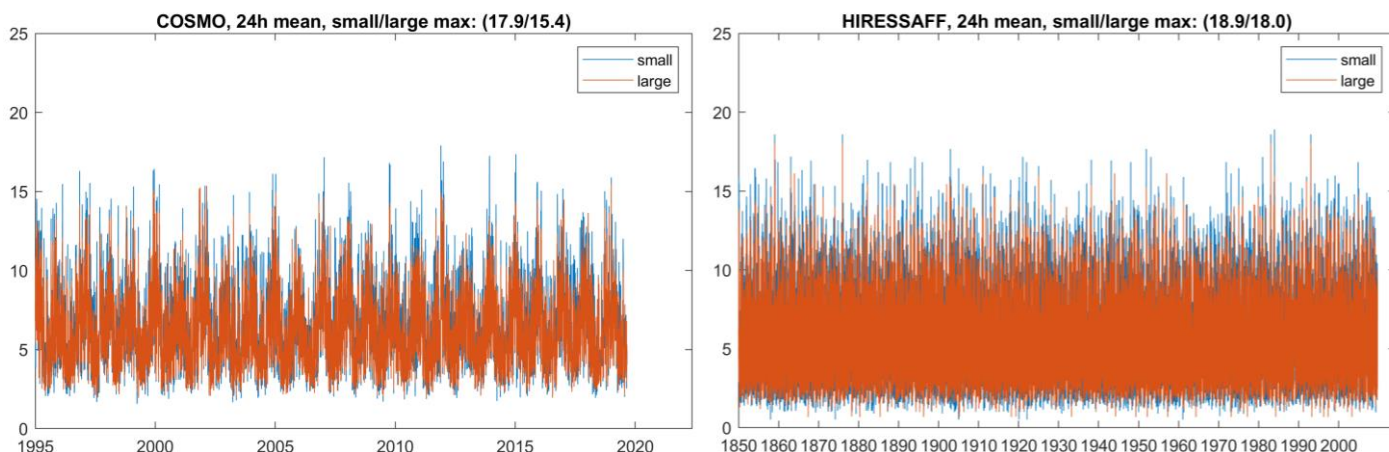
5.5.1 - Historiske vindstyrker

Der er i forbindelse med denne analyse foretaget diskussioner imellem klimatologer og klimaforskere på DMI med det formål at undersøge hvilke ekstremvinde der skal danne grundlag for forceringen af stormflodsmodellen til udarbejdelse af sikringsniveauerne for København. I Hovedrapporten benyttes til dette formål en 10% forøgelse af vindstyrken for 1872-stormfloden til fastlæggelse af sikringsniveauet. Og i både Andrée et al. (2023), og dermed i hovedrapporten, samt i dette supplement fastslås en matematisk erkendt lineær sammenhæng mellem vindstyrker og resulterende stormflodsniveauer på lokaliteter i de indre danske farvande hvorved konsekvensen af alternative vindforøgelsesrater kan udregnes uden yderligere modelkørsler.

Som allerede erkendt tidligere, viser det sig hurtigt udfordrende kvantitativt at sammenligne historiske kilder og data over vindstyrker, grundet bl.a. målemetoder, tilgængelighed, overlevering, rumlig og geografisk kontinuitet og repræsentation osv., og dette gør sig især gældende tilbage i tid i perioden fra i dag og imod eksempelvis 1872. Og som beskrevet i hovedrapporten, samt megen anden litteratur inden for emnet om vurdering af ekstremere og 'perfekte storme', er selv de ca. 150 år siden 1872 selvsagt en kort periode til fastlæggelse af ekstremniveauer.

Eksempler på datakilder til denne analyse:

For en målestation på Hanö, på den svenske kyst ud for Sölvesborg, ses i observationstidsserien (10 m over terræn) et maks-niveau på 37 m/s og et døgnmiddel på 32,25 m/s. Absolut ingen data fra en analyse af historiske reanalyse-datasæt⁵ viste niveauer af denne størrelsesorden for modelceller i den sydlige Østersø. De analyserede datasæt inkluderede til denne analyse 20CR (NOAA 2024), CERRA (Copernicus 2024), HIRESAFF (Schenk 2017) og COSMO REA6 (Universität Bonn 2024). Et eksempel herpå ses i figur 12, hvor døgnmidler i datasættenes totale udstrækning er analyseret og ikke overstiger 17,9/15,4 m/s og 18,9/18,0



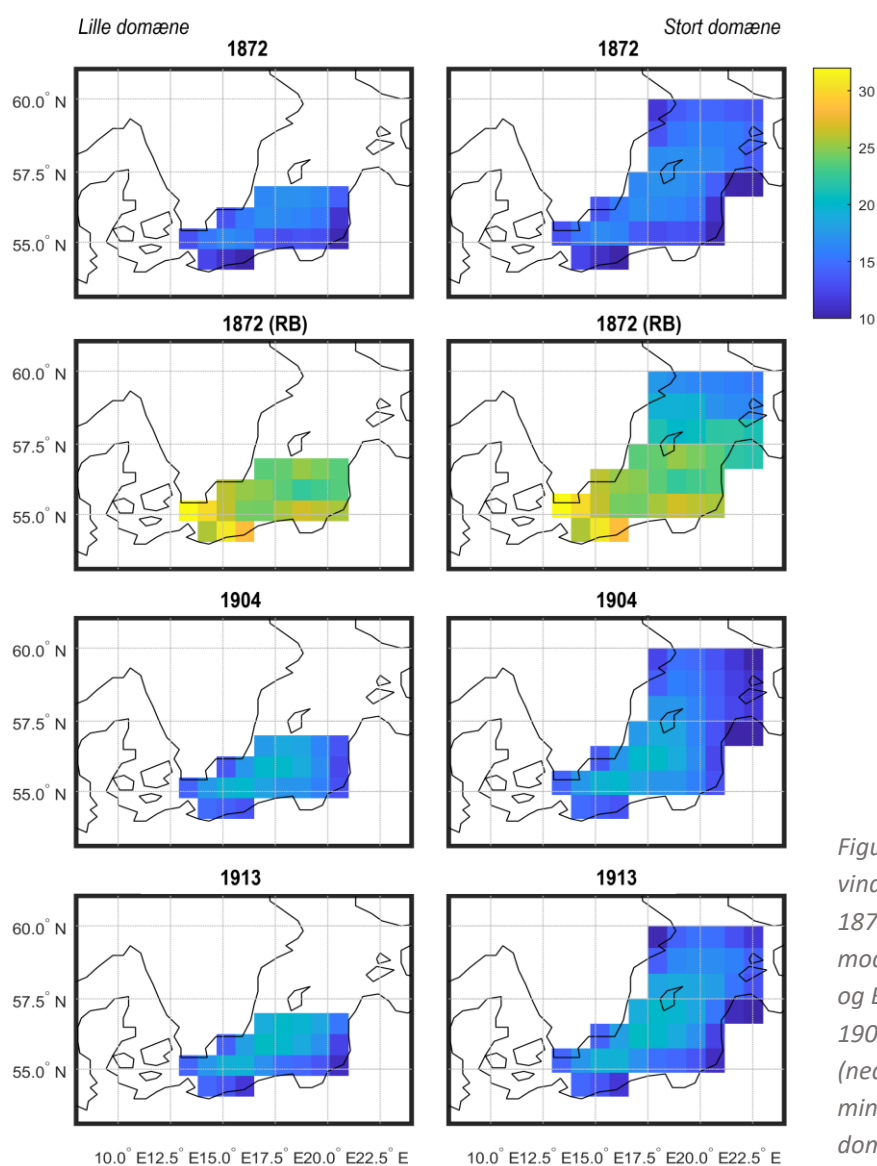
Figur 12. Døgn- og modelcelle-middel over den samlede periode for COSMO REA6 (venstre, 1995-2019) og HIRESAFF (højre, 1850-2009) for modelceller i både et lille og et stort domæne over den sydlige Østersø (se figur 13 for domæner).

⁵ En reanalyse benytter en atmosfærisk model til assimilering af observationsdata og fastholder dermed modellen til virkeligheden, med generering af flere variable og større udbredelse til følge, men er begrænset af manglende og gode observationsdata tilbage i tid. Derved er også de reanalyse-datasæt som går længst tilbage i tid også meget rumligt opløste, såsom 20CR datasættet (NOAA 2024) i 125 km opløsning.

m/s for henholdsvis COSMO REA6 og HIRESAFF, og hvor det første og sidste tal er for henholdsvis et mindre og et større domæne over havområder i den sydlige Østersø (se figur 13 for forklaring af domæner).

Specifikt for 20CR datasættet (NOAA 2024) blev Østersø-stormene i 1904 (30-31. december) og 1913 (ligeledes d. 30-31. december) sammenlignet med stormen i 1872 (13. november). Disse resultater ses i figur 13. En direkte sammenligning mellem maksimale døgnmidler i vindstyrke for 1872, 1904 og 1913 fra CR20 datasættet viser at både 1904 og 1913 overgik 1872 (række 1, 3 og 4 i figur 13). Dette er ikke desto mindre ikke en accepteret konklusion i den videnskabelige litteratur (f.eks. Andréé et al. (2023)), og er bl.a. relateret til reanalysens grove opløsning og sparsommelige observations-data til assimilering, hvorved et alternativt datasæt er produceret til bedre at repræsentere de faktiske atmosfæriske forhold i 1872 (Rosenhagen og Bork 2009). For dette datasæt for 1872 (række 2 i figur 13) ses vindstyrker over den sydlige Østersø som langt overstiger begivenhederne i 1904 og 1913. Der findes ikke rekonstruerede datasæt for 1904 og 1913 på linje med Rosenhagen og Bork (2009).

På ovenstående grundlag er der ikke begrundning til at ændre konklusioner foretaget i hovedrapporten i fht. yderligere justeringer af vindstyrken for de foretagne stormflodssimuleringer.



Figur 13. Døgnmiddel i vindstyrke for stormfloderne 1872 (top), 1872 (RB) modificeret efter Rosenhagen og Bork (2009) (række nr. 2), 1904 (række nr. 3) og 1913 (nederste) for henholdsvis et mindre (venstre) og et større domæne (højre).

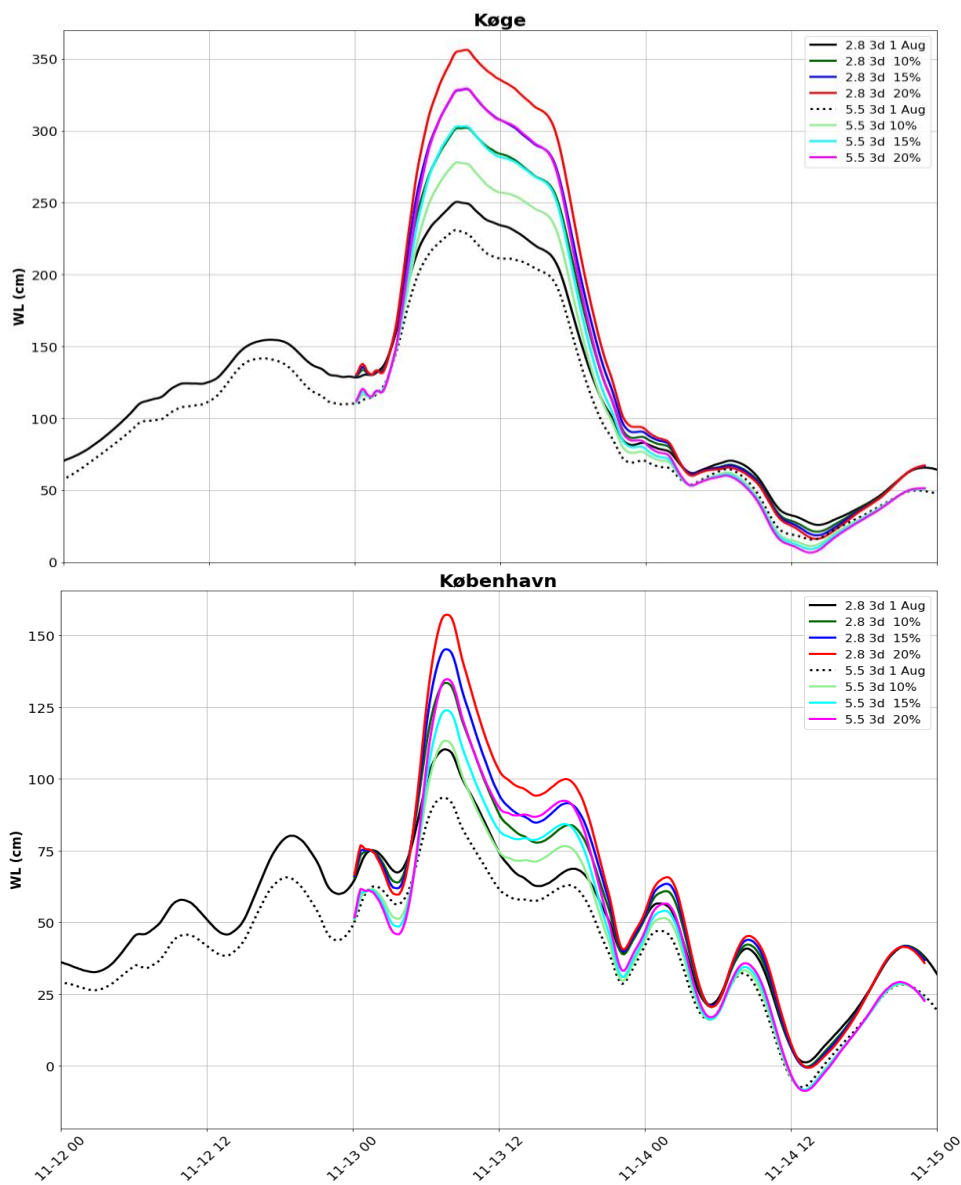
5.5.2 - Forøgelse af vindstyrken

I Andrée et al. (2023) fastslås en systematisk og lineær forøgelse imellem en forøget vindhastighed i døgnet for stormfloden d. 13. november (midnat til midnat) for hele modelområdet og det resulterende maksimale stormflodsniveau ved bl.a. Køge, ved brug af vindforøgelsesrater på 20% og 30% (foruden referencekørslen svarende til 0%). Til dette supplement er foretaget en reproduktion af 20% kørslen foruden kørsler med også 10% og 15%, for at sikre en korrekt repræsentation og genbegræftelse af denne relation. Disse kørsler er desuden foretaget ved brug af både modelversion 2.8 og 5.5 for sammenligning herimellem. Resultaterne ses af tabel 6 og figur 14 nedenfor.

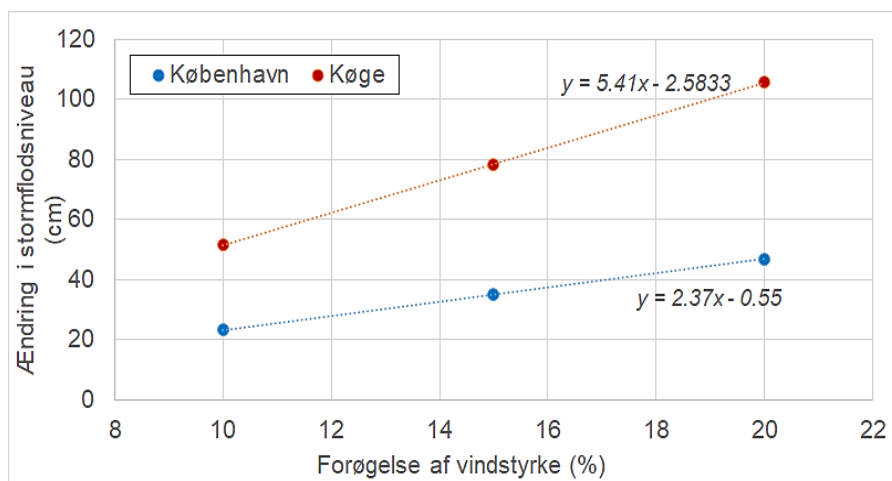
Der ses en generelt tilfredsstillende reproduktion af resultaterne fra hovedrapporten: 105,7 cm forøgelse ved Køge for en 20% forøgelse af vindstyrken (108 cm i Andrée et al. (2023)). Samtidig er de, i hovedrapporten benyttede, 54 cm for 10% vindforøgelse (lineært interpoleret) på linje med de her modellerede 51,6 cm. Det ses desuden at den procentvise forøgelse af vindstyrken resulterer i en meget systematisk og lineær forøgelse af stormflodshøjden for hver lokalitet som funktion af den procentvise forøgelse af vindhastigheden. Denne sammenhæng er vist i figur 15 for også at belyse og muliggøre sammenhænge mellem stormfloder og andre procentsatser.

	Station	0% (Ref.)	10%				15%				20%			
		Abs. (cm)	Abs. (cm)	Abs. diff. (cm)	Rel. diff. (%)	Abs. diff. pr. % ændring (cm/%)	Abs. (cm)	Abs. diff. (cm)	Rel. diff. (%)	Abs. diff. pr. % ændring (cm/%)	Abs. (cm)	Abs. diff. (cm)	Rel. diff. (%)	Abs. diff. pr. % ændring (cm/%)
HBM vers. 2.8	Landsort (Norra)		73.4				75.4				77.7			
	Stockholm	87.9	96.4	8.5	9,7		101.0	13.1	14.9		105.8	17.9	20.4	
	København	110.3	133.5	23.2	21,0	2.3	145.2	34.9	31.6	2.3	157.2	46.9	42.5	2.3
	Køge	250.5	302.1	51.6	20,6	5.2	328.9	78.4	31.3	5.2	356.2	105.7	42.2	5.3
	Travemünde	422.2	490.6	68.4	16,2	6.8	528.6	106.4	25.2	7.1	566.3	144.1	34.1	7.2
	Aabenraa	387.7	457.9	70.2	18,1	7.0	495.6	107.9	27.8	7.2	534.7	147.0	37.9	7.4
HBM vers. 5.5	Landsort (Norra)	58.0	60.7	2.7	4,7		63.1	5.1	8.79		65.4	7.4	12.76	
	Stockholm	63.9	71.3	7.4	11,6		75.4	11.5	18.00		79.7	15.8	24.73	
	København	93.5	113.3	19.8	21,2	2.0	123.9	30.4	32.51	2.0	134.8	41.3	44.17	2.1
	Køge	230.9	278.1	47.2	20,4	4.7	303.1	72.2	31.27	4.8	329.3	98.4	42.62	4.9
	Travemünde	401.9	467.5	65.6	16,3	6.6	502.7	100.8	25.08	6.7	538.7	136.8	34.04	6.8
	Aabenraa	360.6	426.6	66.0	18,3	6.6	461.4	100.8	27.95	6.7	496.8	136.2	37.77	6.8

Tabel 6. Resulterende maksimalvandstande og differencer (absolut og relativt) på udvalgte lokaliteter efter forøgelser af vindstyrken på 10%, 15% og 20% i døgnet d. 13. november (1872) i fht. referencekørslen (0%), for både HBM version 2.8 og 5.5 (begge med tre domæner).



Figur 14. Resulterende stormflodshøjder for 1872-stormfloden som funktion af forøgelse af vindstyrken på 10%, 15% og 20%, foruden referencekørslen uden forøgelse.



Figur 15. Resulterende stormflodsniveau (cm) for Køge og København som følge af procentvise ændringer i vindstyrken samt ligninger for tilhørende lineære trendlinjer.

5.6 - Stormforløb og vindretning

Denne delanalyse har til formål at analysere resulterende maksimale stormflods-vandstande ved Køge for d. 13/11 1872 for alternative vindretninger end dem som er benyttet i ovenstående. Rationalet her er at det er velkendt vinden er den primære drivkraft bag stormfloder og at de største stormfloder opleves når kraftig vind påvirker vandmasser over et stort frit stræk (længde) over længere perioder, men at der indenfor disse rammer kan være forskellige sekvenser som fører til høje vandstande forskellige steder. I denne analyse blev det derfor vurderet om man kan forestille sig en samlet justering (rotering) af vindretningen for 1872-begivenheden som stadig påvirker vandmasserne i Østersøen i retning af de indre danske farvand, men som specifikt fører vandmasserne mere nord om Møn, i retning af Køge bugt og København, snarere end syd om Møn i retning af Sydfyn og Sydøstjylland. Samtidig med denne overordnede ændring af vandmasser som ændringen i vindretning medfører, vil ændringen i vindretningen også forventes på mere lokalt niveau at ændre lokale lokaliteter med opstuvning. I dette lys er det muligt at forestille sig en endeløs række af alternative forløb ved variationer i vindretning over forskellige delområder og delperioder. For derfor at holde en simpel tilgang blev vindretningen justeret i trin af fem graders vinkelmål væk fra det originale forløb, i både positiv en negativ retning i spændet -15 til 15 grader samt for -30 grader (se tabel 7). Som ved ændringen i vindstyrke som ses i Andrée et al. (2023), og også dokumenteret i hovedrapporten, blev denne ændring i vindretning foretaget i præcis de 24 timer som udgør 13/11 1872, fra midnat til midnat. Specifikt blev denne ændring foretaget i de atmosfæriske U- og V-forceringsfiler som bruges som input til HBM (se figur 16 og 17).

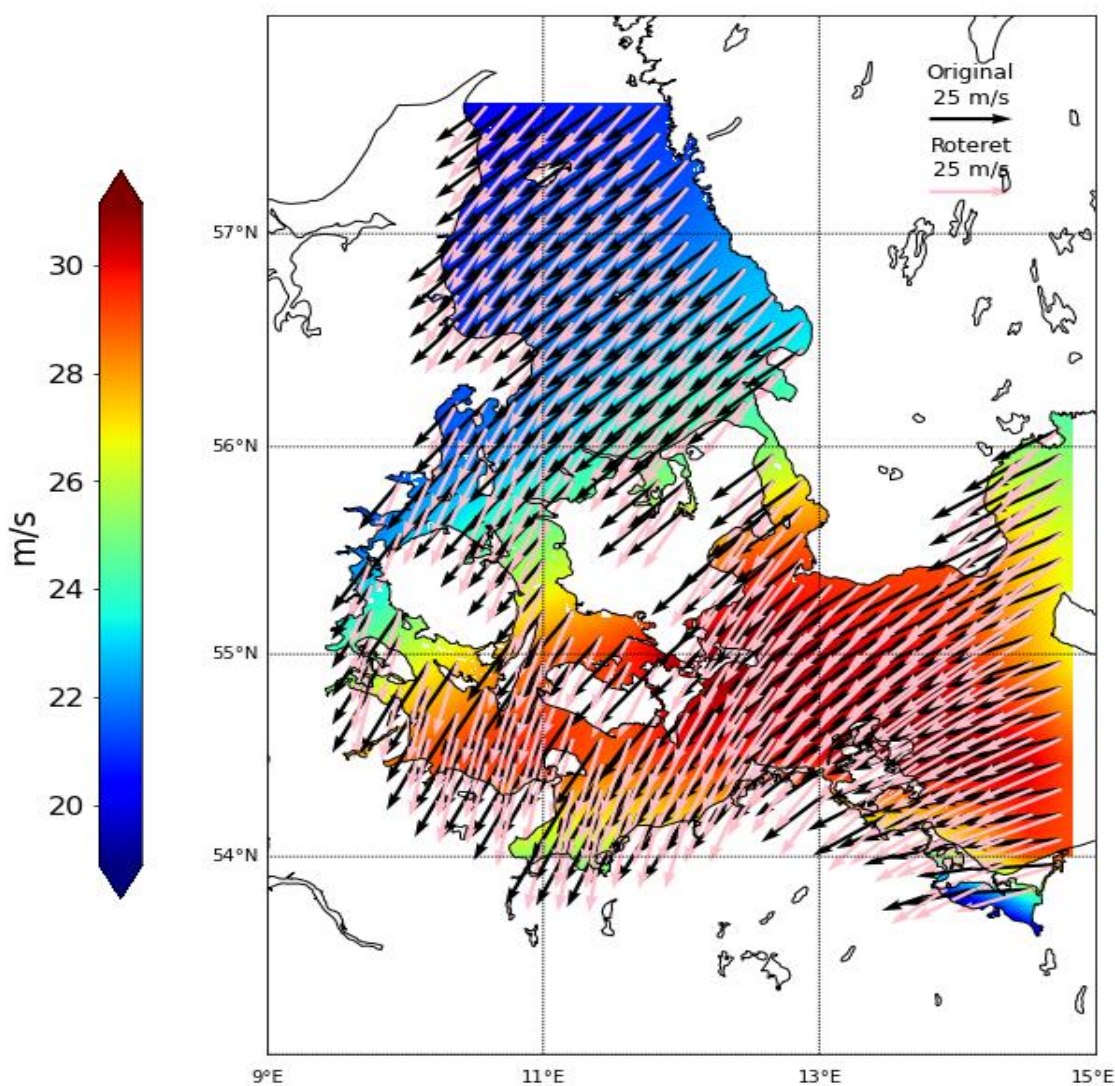
Station	Reference-kørsel	5 gr	10 gr	15 gr	-5 gr	-10 gr	-15 gr	-30 gr	Maks. difference	Maks difference inkl. -30 gr
Roskilde	96.1	105	112.8	120.1	87.1	81.1	80.8	79.8	24	24
Kobenhavn	110.3	116.1	120.4	123.5	106.2	101.7	98.3	93.6	13.2	13.2
Dragør	152	152.4	152.9	152.5	152	151.6	151.6	163.6	0.9	11.6
Drogden_Fyr	181.8	181.4	181.4	178.1	181.5	181.7	183	200	1.2	18.2
Koege	250.5	245.6	242.1	234.9	254.9	258.5	261.7	264.2	11.2	13.7
Gedser	320	321.6	321.6	320.9	316.4	311.8	305.7	286.3	1.6	1.6
Travemuende	422.2	419.7	416.4	410.8	420.4	418	414.6	394.5	-1.8	-1.8
Aabenraa	387.7	377.9	368	357.6	393.2	397	399.3	400.9	11.6	13.2
Landsort_Norra		70.7	71.9	72.5	68.7	67.4	66.1	63.4		
Stockholm		87.9	87.3	86.5	85.5	87.9	87.8	89.5		

Tabel 7. Resultater for udvalgte stationer i de indre danske farvand, samt Landsort og Stockholm i Østersøen, som følge af analysen hvor vindretning ændres for stormfloden i 1872 samt den maksimale difference med og uden analysen med -30 grader. De to primære stationer er markeret i fed skrift. Vindretningen for den maksimale difference i stormflodshøjde indenfor +/- 15 grader er markeret med rødt (positiv difference) og blå (negativ difference) for hver lokalitet. Vindretningen -30 grader samt stationerne i Østersøen er markeret med orange. Alla data er i cm.

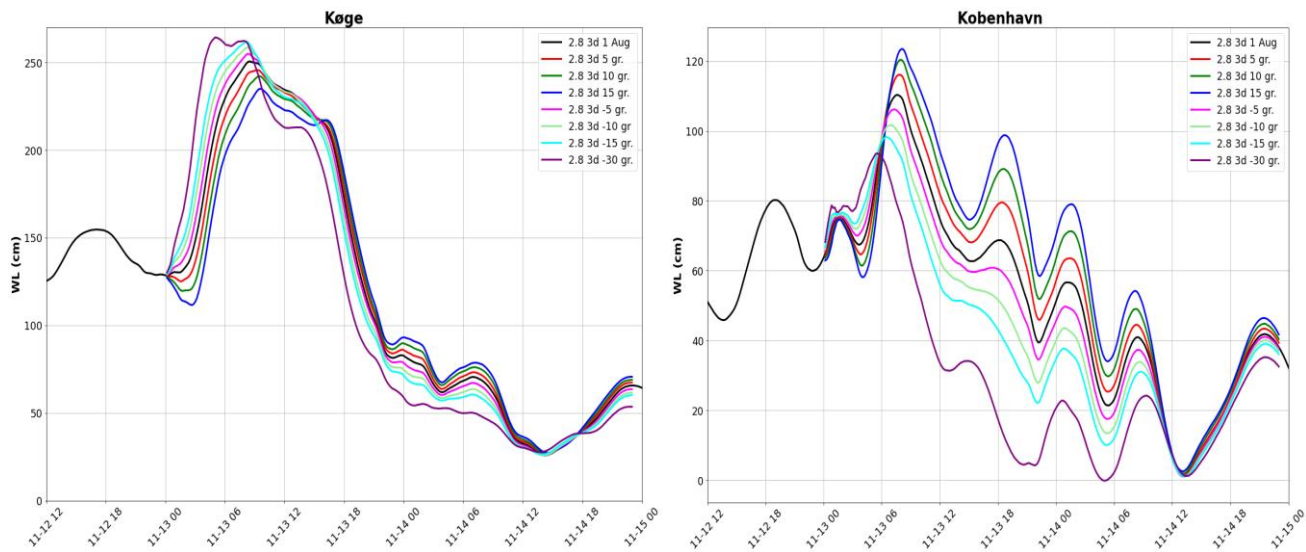
Denne manipulation af vindretning bevarer ikke fysisk kontinuitet imellem forceringsdata som ud over U- og V- vind (10 m) også inkluderer lufttryk (v. havniveau), lufttemperatur (2 m), luftfugtighed (2 m) samt skydække, men modellen kan godt køres alligevel. Dog må det indskydes at denne tilgang, som var den bedst mulige indenfor rammerne af denne analyse, ved for megen manuel manipulation af inputdata også

kan ende med ufordelagtigt at afvige fra betingelser som kan antages at forekomme, selv under ekstreme forhold. I dette lys anses manipulationen af vind op til 30 graders afvigelser fra originaldata at være for langt væk fra fysisk kontinuitet til at kunne bære videre til supplementets konklusioner, men er her inkluderet for belysning af modellens resultater. Spændet hvor vindretningen roteres imellem -15 og 15 grader anses her for acceptabelt til at belyse eventuelt forøgede stormflodsniveauer.

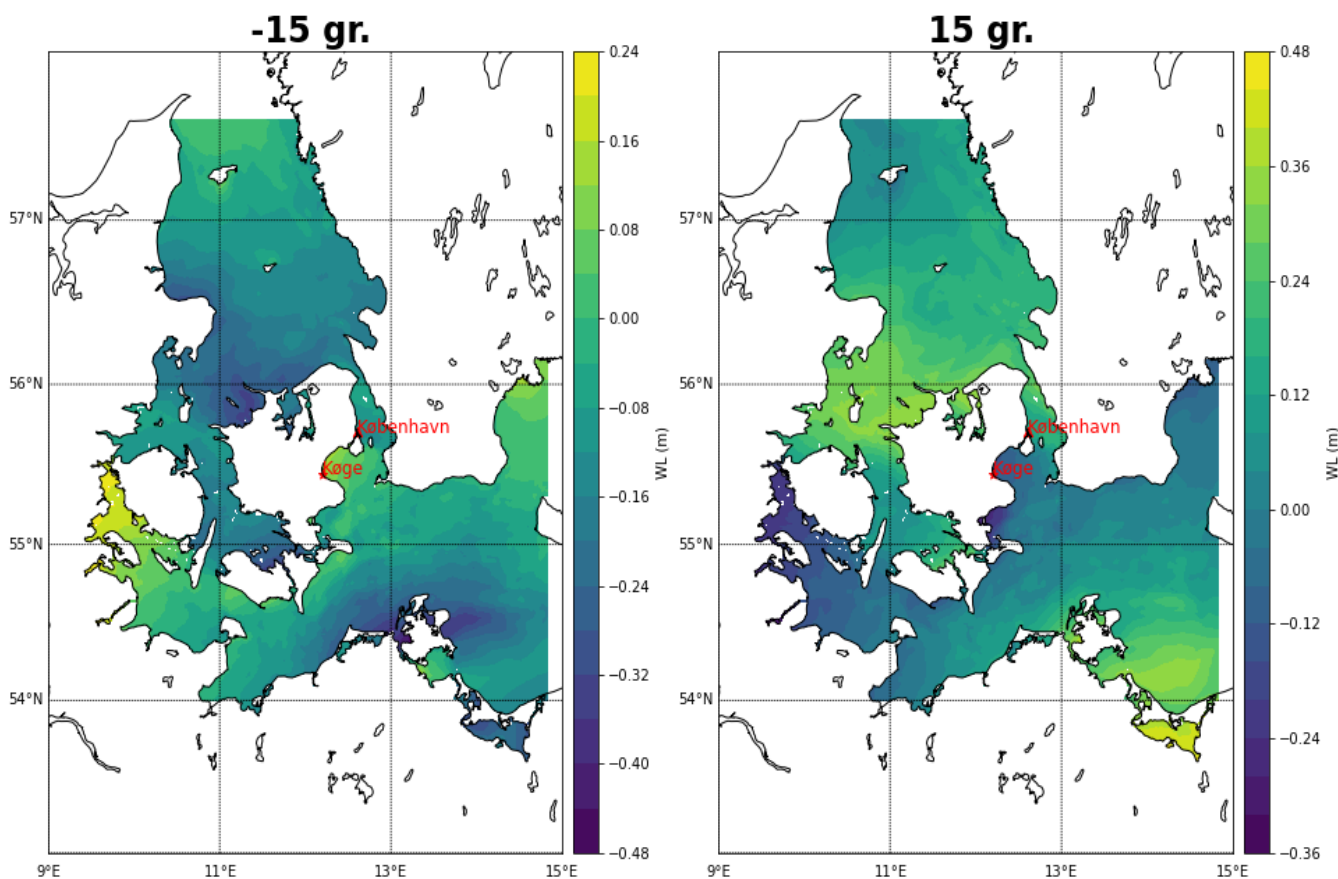
Ved Køge, den primære lokalitet i fokus her, ses en ændring i maksimal stormflodshøjde, i fht. referencekørslen, på 11,2 cm for -15 gr. kørslen og 13,7 cm for kørslen ved -30 gr. Omtrent den samme ændring ses for København på 13.2 cm for 15 gr kørslen. Der ses en delvis systematik i hvilke kørsler som resulter i de højeste vandstande idet kørslerne med 10 til 15 gr. og -10 til -15 gr. resulterer i henholdsvis de højeste og laveste vandstande nord for Dragør (Dragør, København og Roskilde) og vice versa syd herfor (Drogden og Køge). For Aabenraa ses ligeledes en maksimal difference på 11,6 og 13,2 cm for henholdsvis kørsler uden og med -30 graders ændringen. Skiftet i vindretning er visuelt fremstillet i figur 16 og 17 og de resulterende spatiaalt distribuerede ændringer ses i figur 18.



Figur 16.
Eksempel på
justeringen i
vindretning (15
grader). Pilenes
længde angiver
vindstyrke og
baggrundskortet
viserer
vindstyrken kl
8:00 d 13,
november.



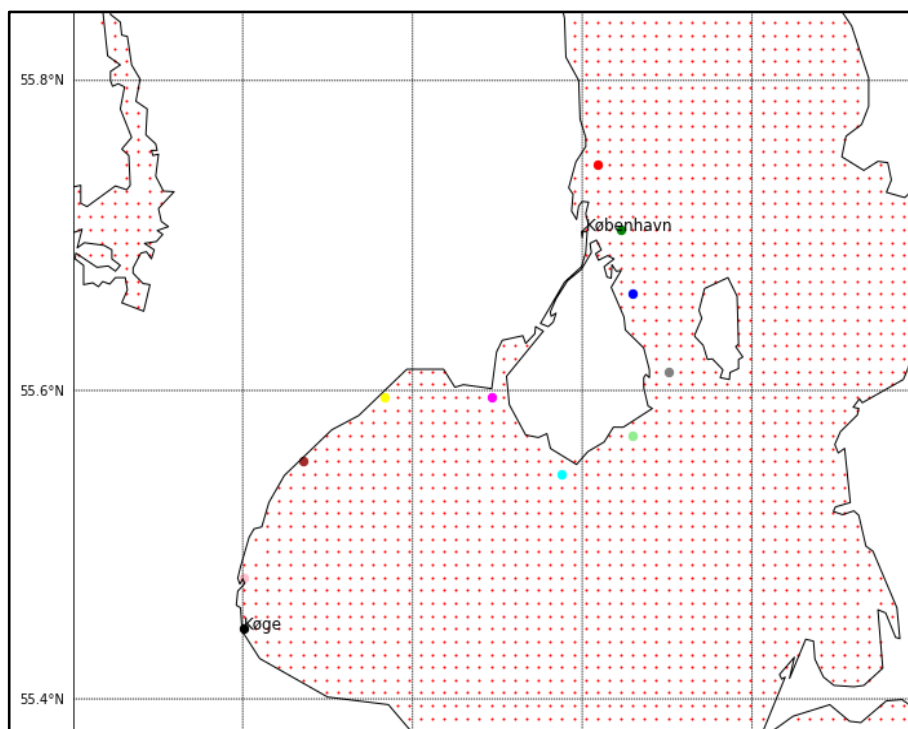
Figur 17. Resulterende stormflodsforløb for Køge (øverst) og København (nederst) ved ændringer i vindretning i 24 timer fra 13/11 1872 kl 00:00.



Figur 18. Difference mellem maksimal stormflodsniveau for referenceløbsen i fht. til skiftet i vindretning for -15 grader (top) og 15 grader (bund). Positive indikerer at vindretningsskiftet er større end referenceløbsen.

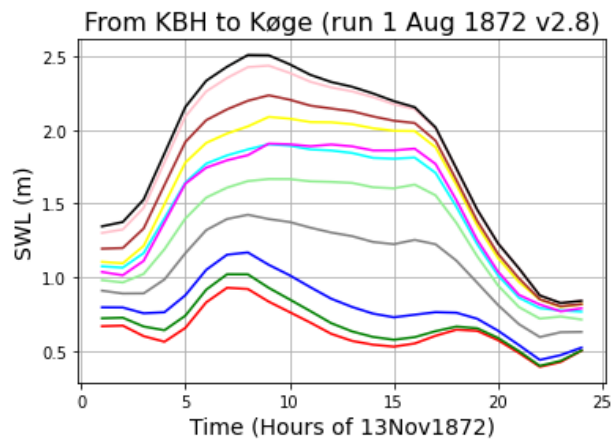
5.7 – Vandstandsgradier for stormfloder fra syd

For at belyse gradient og forløb for det maksimale stormflodsniveau for stormfloder fra syd fra Køge bugt, rundt om Amager og til nord for vandstandsmåleren i København er forløbet for døgnet d 13. november 1872 visualiseret for de primære simuleringer præsenteret i indeværende supplement. Lokaliteterne for dette arbejde er vist i figur 19, bl.a. også ud fra et ønske om at undgå eventuelle uønskede effekter af en forsimplet repræsentation af Københavns havnekanal i simuleringerne. Derved er lokaliteter uden påvirkning fra forløbet af havnekanalen udvalgt her i løbende intervaller.



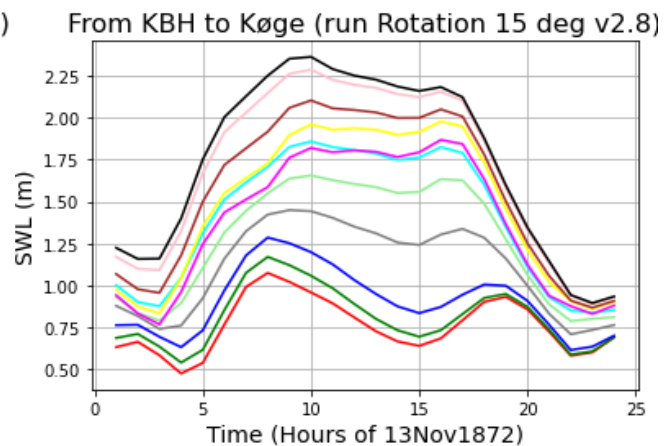
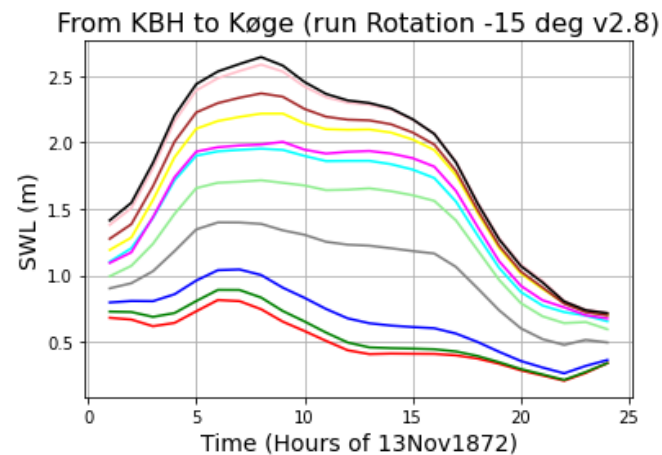
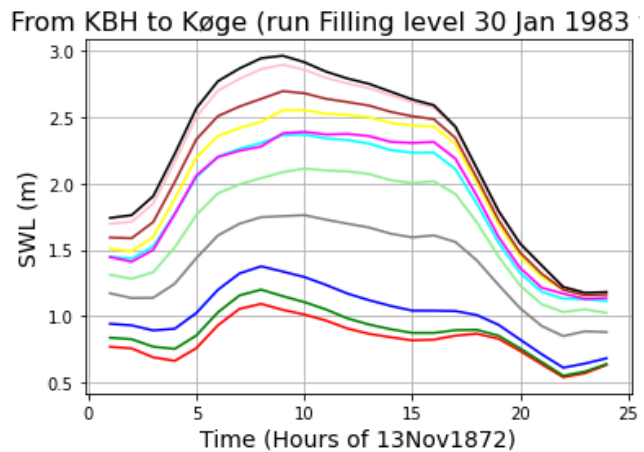
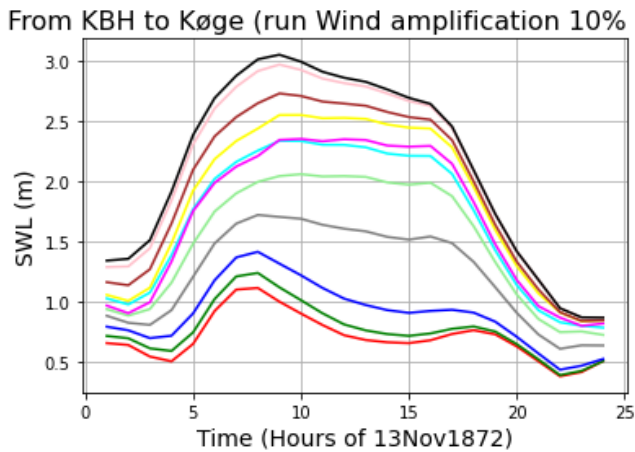
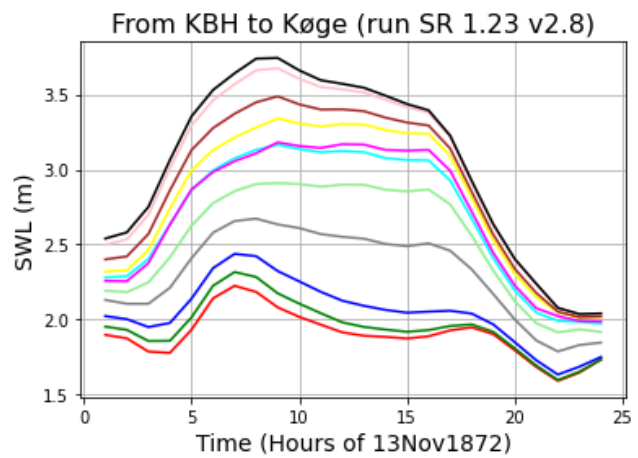
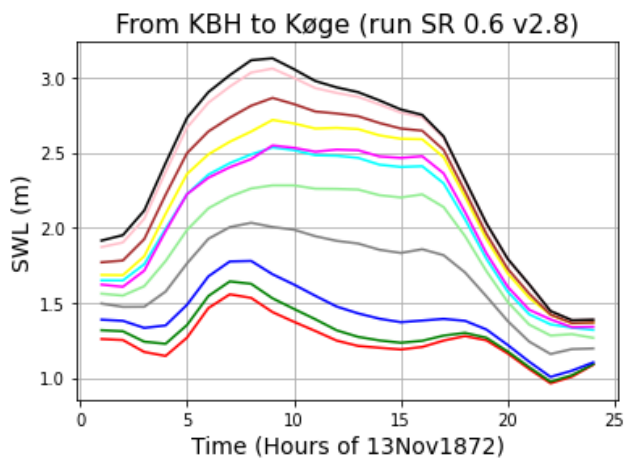
Figur 19. Lokaliteter til analysen for gradier fra Køge bugt til nord for København ved stormfloder fra syd.

De resulterende forløb i vandstande for de udvalgte primære simuleringer er vist i figur 20. Resultaterne bekræfter en glidende overgang i maksimalt stormflodsniveau, fra høje niveauer i syd og faldende mod nord, med samme mønster som i hovedrapporten hvor der mellem Avedøre og Amagers sydpynt ses et nær ensartet forløb og med et stort spring længere nordpå forbi Dragør, lufthavnen og Øresundsbroens landpunkt. Den mindste gradient på tværs af Drogen-tærsklen (ml. indsejlingen til Københavns havn ved Trekroner og ved Avedøre) i de primære simuleringer er 70 cm, hvilket er lavere end gradienten benyttet i hovedrapporten på 100 cm. Men idet gradienten på 70 cm alene er for simuleringen hvor vinden drejes 15 gr. i fht. referencekørslen, og den maksimale vandstand for området syd for København for netop denne simulering er tilsvarende reduceret (se tabel 7), gælder anbefalingen fra hovedrapporten stadig at benytte en gradient henover Drogen-tærsklen på 100 cm, som ses som minimumsniveau for alle de resterende simuleringer.



- Point (236, 259)
- Point (237, 254)
- Point (239, 249)
- Point (242, 243)
- Point (239, 238)
- Point (233, 235)
- Point (227, 241)
- Point (218, 241)
- Point (211, 236)
- Point (206, 227)
- Point (206, 223)

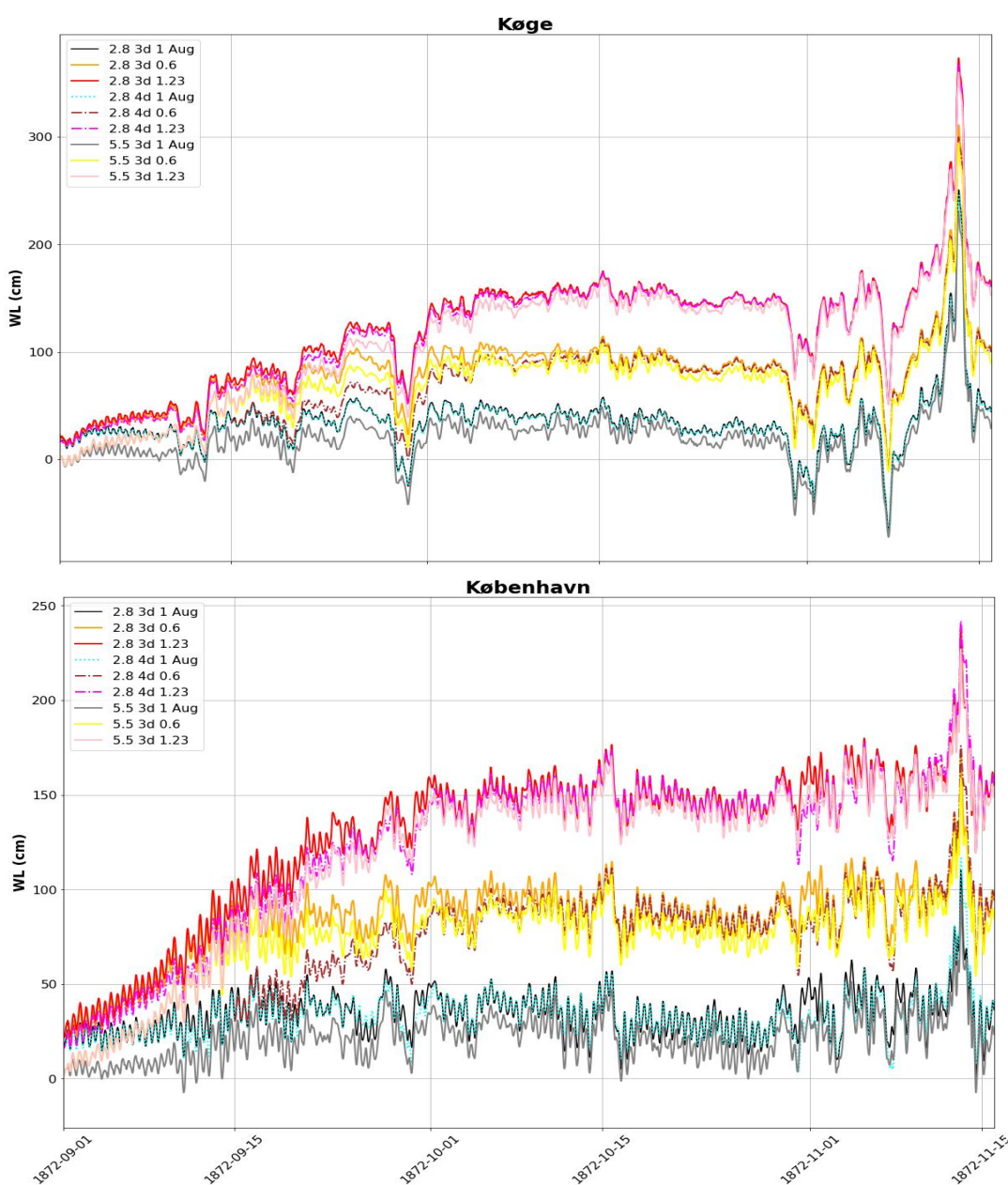
Figur 20. Udvalgte kørsler, alle med HBM version 2.8. Række 1: Referencekørsel. Række 2: Kørsler for klimaændringer for havniveau på 0,6 m i 2075 (venstre) og 1,23 m i 2125 (højre). Række 3: 10% vindstyrkeforøgelse (venstre) og max. Fyldningsniveau (højre). Række 4: vindrotationskørsler for -15 gr. (venstre) og 15 gr. (højre).



6 - Kapitel 6, supplement

6.1 – Klimaændringer for havniveau

Effekten af et stigende havniveau som følge af klimaændringer blev analyseret baseret på de stigningsrater som er fremstillet i hovedrapporten: 60 cm for år 2075 og 123 cm for år 2125. En primær komponent i denne analyse er at adressere hvorvidt et stigende havniveau reflekteres som en lineær effekt under en stormflodssituation fra Østersøen og om denne lineære effekt i så fald svarer til at klimaændringen kan lægges til stormflodshøjden som en direkte addition. Argumenterne for at undersøge dette er at effekten af tærsklen tværs over Øresund, omtrent ved Øresundsbroen, muligvis ville ses mindsket med et højere havniveau samt at kystnære hældningsprofiler igennem de påvirkede indre danske farvande ligeledes ville have indflydelse på lineariteten.



Figur 21. Indflydelsen af klimaændringer på det simulerede stormflodsforløb for Køge og København for 3-domæne og 4-domæne opsætningerne samt for forskellige modelversioner (2.8 og 5.5).

Resultaterne af denne analyse er opsummeret i tabel 8 og figur 21. Heraf fremgår det at der med de testede niveauer for ændringer i havniveau for stormflodskørslerne baseret på 1872-stormen ses både en lineær sammenhæng, relativt til referenceniveauet uden påførte klimaændringer, og at lineariteten i store træk svarer til en addition af havniveauet oven på referencesimuleringen omend mindre variationer heraf ses som følge af modelvariation, som beskrevet ovenfor.

Modelopsætning	Tre domæner						Fire domæner		
Modelversion	HBM version 2.8			HBM version 5.5			HBM version 2.8		
Lokalitet / maksimal stormflods-højde (cm)	Start: 1. aug.	Start: 1. aug + 60 cm	Start: 1. aug + 123 cm	Start: 1. aug.	Start: 1. aug + 60 cm	Start: 1. aug + 123 cm	Start: 1. aug.	Start: 1. aug + 60 cm	Start: 1. aug + 123 cm
København	110,5	172,1	237,4	93,5	158,4	227,1	116,4	175,9	241,9
København, difference til nutidskørsel		61,6	126,9		64,9	133,6		59,5	125,5
Køge	250,5	310,8	373,1	230,9	294	359,9	245,4	299,5	367,6
Køge, difference til nutidskørsel		60,3	122,6		63,1	129		54,1	122,2

Tabel 8. Simulerede maksimale stormflodshøjder (cm) som følge af ændringer i klimaændringer, startdato og modelopsætning (tre og fire domæner).

8 - Kapitel 8, supplement

8.1 - Opsummering og konklusioner

Som konklusion på de supplerende modelkørsler med HBM stormflodsmodellen konkluderes, kort og opsummerende, på basis af ovenstående og i lyset af formålet med at belyse eventuelle justeringer til hovedrapporten:

- *Modelopsætning*: HBM version 2.8 i opsætningen med tre domæner anses, som i hovedrapporten, som den pt. bedste model- version og opsætning til modellering af ekstreme stormfloder i de danske farvande og hovedkonklusioner i både hovedrapport og dette supplement baseres herpå.
- *Reproduktion*: Resultater fra hovedrapporten reproduceres tilfredsstillende for samme betingelser inkl. simuleringsperiode (spinup) og geografiske randbetingelser.
- *Bølgeopstuvning*: Der ses et potentiale til lokalt at øge det kystnære havniveau som følge af bølgeopstuvning. Metoden og forceringsdata hertil er dog pt. forbundet med usikkerheder som, sammenholdt med den resulterende størrelsesorden af bølgeopstuvningsniveau, især for kystzonen omkring de fire kommuner i indeværende analyse, gør at det ikke anbefales at bære disse resultater videre til anbefalinger om sikringsniveau.
- *Fyldningsniveau*: Rationaler og principper for indflydelsen af fyldningsniveau i Østersøen på resulterende vandstande i de indre danske farvande, og specifikt i hovedstadsområdet som adresseres her, som ligger til grund for konklusioner i hovedrapporten er bekræftet af de her tilføjede analyser som viser samme generelle sammenhæng. Uden, for øvrigt, at åbenbare

argumenter for at lægge et højere fyldningsniveau til grund for anbefalinger om sikringsniveau i fht. hovedrapporten.

- *Historiske vindforhold:* Analysen af historiske vindforhold, med fokus på vindstyrker og varighed, viser ikke forekomster af vind som kan overgå den atmosfæriske vindforcing som fører til høje vandstande i de indre danske farvande og som ligger til grund for konklusionerne i hovedrapporten. Dette, hverken for reference-kørslen med reproduktionen af 1872, og dermed ej heller for kørslen med en 10% forøgelse som det anbefalede sikringsniveau i hovedrapporten baserer sig på.
- *Stormforløb og vindretning:* En manuel manipulation af vindretningen i løbet af døgnet d. 13. november 1872 i spændet -15 til 15 grader medførte en maksimal ændring i resulterende stormflodsniveau ved Køge på 11,2 cm (-15 gr ændring). Det anbefales at dette resultat bæres videre til hovedrapporten og justerer anbefalede sikringsniveauer for stormfloder fra syd i henhold hertil (se tabel 9). Som udfoldet i kapitel 5.7, og til dels i kapitel 5.6, er det ikke relevant at korrigere mere end 11,2 cm (trods en ændring på 13,2 cm for København v. 15 gr ændring), idet denne kørsel havde lavere absolutte værdier syd for København.
- *Klimaændringer for havniveau:* Denne analyse viste ikke ændringer i de lineariteter som lå til grundlag for konklusioner i hovedrapporten.

De opsummerende anbefalinger i dette supplement om et forøget sikringsniveau i fht. hovedrapporten er opsummeret i tabel 9. Vi følger her princippet, at beregne og summere alle delbidrag uden afrunding, men at præsentere disse delbidrag med en præcision på hele cm. Det i hovedrapporten endeligt anbefalede sikringsniveau angives med en præcision på 10 cm, for at understrege at usikkerheden i det samlede estimat ikke retfærdiggør en højere præcision.

Tidshorisont	2025/2075/2125
Anbefalet forøgelse for stormfloder fra syd, Køge og København	+ 11 cm

Tabel 9. Anbefalede justeringer til sikringsniveau i dette supplement i fht. hovedrapporten.

Referencer

- Andrée, E., Su, J., Larsen, M.A.D., Drews, M., Stendel, M. & Madsen, K.S. (2023). The role of preconditioning for extreme storm surges in the western Baltic Sea. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 23, 1817–1834. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1817-2023>
- Andrée, E Drews M, Su J, Larsen MAD, Drønen N & Madsen KS (2022): Simulating major storm surge events in a complex coastal region. *Weather and Climate Extremes*. 36 (15). <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100422>
- Christensen, Ole Bøssing, et al. (2022): *Atmospheric regional climate projections for the Baltic Sea region until 2100*, *Earth System Dynamics*, 13)
- Copernicus (2024): Copernicus regional reanalysis for Europe (CERRA) ([www](http://www.copernicus.eu)).
- <https://climate.copernicus.eu/copernicus-regional-reanalysis-europe-cerra>
- Coppola, Erika, et al. (2021):, *Assessment of the European Climate Projections as Simulated by the Large EURO-CORDEX Regional and Global Climate Model Ensemble*, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126
- Klimaatlas, www.klimaatlas.dk, Danmarks Meteorologisk Institut (v2022a, tilgået januar 2024).

- Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., Janssen, P.A.E.M. (1994): "Dynamic and Modelling of Ocean Waves", book, Cambridge University Press 1994, ISBN 0-521-47047-1
- Meier, H. E. M., et al. (2022): *Climate change in the Baltic Sea region: a summary*, Earth System Dynamics, 13 (2022)
- NOAA (2024): NOAA/CIRES/DOE 20th Century Reanalysis (V3) (www). https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.20thC_ReanV3.html
- Rosenhagen, G. & Bork, I.: Rekonstruktion der Sturmweatherlage vom 13. November 1872, Küste, 75, 51–70, 2009
- Schenk, Frederik (2017). The long-term dataset of High Resolution Atmospheric Forcing Fields (HiResAFF) for Northern Europe since 1850. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. <https://doi.org/10.1594/WDCC/HiResAFF>
- Universität Bonn (2024): COSMO-REA6 (www). <https://reanalysis.meteo.uni-bonn.de/?COSMO-REA6>
- WAMDI Group, "The WAM Model – A Third Generation Ocean Wave Prediction Model", JPO 1988, p1775