



Miljøministeriet
Kystdirektoratet



Danmarks Meteorologiske Institut

Delundersøgelse af sikringsniveauer for stormflodssikring af København

Arbejdsgruppe Sikringsniveauer



Februar 2024

Redaktion: Kystdirektoratet

med bidrag fra Danmarks Meteorologiske Institut

Kapitelansvarlige:

Kystdirektoratet & Danmarks Meteorologiske Institut: Kapitel 1, 5, 8

Kystdirektoratet med bidrag fra kommuner, infrastrukturejere og forsyningsselskaber: Kapitel 3

Kystdirektoratet: Kapitel 2, 4, 7

Danmarks Meteorologiske Institut: Kapitel 6 (+ supplement med ekstra stormflodsmodelleringer som udført i september 2023 til januar 2024)

Indhold

1.	Resumé	5
2.	Indledning	8
2.1	Rammesætning	9
2.2	Deltagere	10
2.3	Proces og arbejdsgruppemøder	10
2.4	Begreber	11
3.	Risikoaccept og sikringsbehov	14
3.1	Kommuner	15
3.2	Infrastrukturejere	16
3.3	Forsyningsselskaber mv.	18
4.	Forudgående sikkerhedsvurderinger	20
5.	Ekstremhændelser	24
5.1	Valgt metode og rammeforståelse	24
5.2	Marine vandstandsmålere	25
5.3	Studieområde	26
5.3.1	Storme fra nord og syd og vandstandsgradienten	26
5.3.2	Historiske hændelser	27
5.4	Statistiske beregninger	30
5.4.1	Området nord for Drogden	30
5.4.2	Området syd for Drogden	31
5.4.3	Konklusion på analysen	35
5.5	Fysiske begrænsninger for ekstremhændelser i Køge Bugt og Øresund	36
6.	Klimaændringer	43
6.1	Udledningsscenarier	43
6.1.1	SSP-scenarieme	43
6.1.2	Udledningsscenarier i aktuelle statslige klimatilpasningsværktøjer	45
6.1.3	Nuværende emissionspolitikker og -ambitioner	45
6.2	Havniveaustigninger	47

6.3	Fremtidens stormfloder i et klimaperspektiv	48
6.3.1	Vind	48
6.3.2	Havniveau og stormfloder	50
6.4	Havniveau stigninger ud over det mest sandsynlige	51
6.5	Scenarievalg i andre lande	52
6.5.1	Valg af udledningsscenario og konfidensniveau	52
6.5.2	Sikringsniveauer og hændelsesberegninger i andre lande v. Østersøen	53
7.	Yderligere aspekter til fastlæggelse af sikringsniveauer	55
7.1	Levetidsperspektiv	55
7.2	Modelberegninger for ekstreme stormhændelser fra syd og nord	56
7.2.1	Modeldomæne	56
7.2.2	Terræn- og dybdeforhold	58
7.2.3	Ruhedsparametre	65
7.2.4	Stormflodshydrograf og modelkalibrering	67
7.3	Dobbelt beskyttelseslinje	74
7.4	Bølgepåvirkning af sikringsanlæg	77
8.	Sikringsniveau og linjeføring for hovedstadsområdet	80
8.1	Fastlæggelse af designvandstand	80
8.1.1	Vandstandsgradient	80
8.1.2	Landbevægelse og stigning i middelhavniveau	80
8.1.3	Ekstremhændelse fra syd	81
8.1.4	Ekstremhændelse fra nord	81
8.1.5	Fremtidige klimaforandringer	82
8.1.6	Anvendte designvandstande	85
8.1.7	Bestemmelse af gradient mellem nord og syd	85
8.2	Bølgepåvirkning og sikringsniveauer	90
	Referencer	92
	Bilag A: Delkommissorium for undersøgelse af sikringsniveauer omkring København	96

1. Resumé

Klimabetingede havniveaustigninger medfører forøgede stormflodsvandstande, og i hovedstadsområdet findes meget store samfundsværdier, ejendomme og infrastruktur, som er, eller vil blive, truet af oversvømmelser under stormflod.

Der er derfor behov for at minimere oversvømmelsesrisikoen gennem klimatilpasning. Dette kan ske gennem etablering af en ydre sikring (stormflodsbarriere, diger og højvandsmure) langs dele af Københavns kyster.

Arbejdsgruppen Sikringsniveauer har derfor til formål at fastlægge sikringsniveauer for stormflodshændelser omkring hovedstadsområdet til beskyttelse mod stormfloder på mellemlang (år 2075) og lang sigt (år 2125). Udgangspunktet er infrastrukturejernes meget høje sikringskrav for stormflodshændelser.

Arbejdet tager udgangspunkt i foreliggende observationsdata, statiske kort og videnskabeligt arbejde vha. bl.a. numerisk modellering. Sikringsniveauer knytter sig til den fysiske højde på et teknisk anlæg til beskyttelse mod oversvømmelser. Til at fastlægge et sikringsniveau for stormflodssikring er der på konceptplan behov for at opdele sikringsniveauet i designvandstanden (middel vandstand af et roligt vandspejl under den mest ekstreme stormflod til fælles referencepunkt, her DVR90) og et tillæg for bølger på vandoverfladen. Beregning af konkrete bølgetillæg kræver kendskab til den faktiske bølgepåvirkning på den aktuelle lokalitet samt kendskab til det specifikke kystsikringsanlæg og dets placering. Den opgave varetages af Arbejdsgruppe Teknik, Miljø og Anlægsøkonomi. I denne rapport præsenteres derfor udelukkende beregning af nødvendige designvandstande til fastlæggelse af sikringsniveauer. I fremskrivningen af designvandstande indgår en klimabetinget havniveaustigning, der er fratrukket landhævning. Sikringsniveauer, der refererer til den ydre kystlinje, kan nedskaleres, fx ved konkrete, tilbagetrukne anlæg, ligesom et lavere sikringsniveau kan anvendes ud fra lokale risikobetragninger.

Designvandstanden er fremkommet dels gennem statistisk analyse og dels gennem en vurdering af et øvre, fysisk maksimum for stormflodsvandstande baseret på numeriske modelkørsler, hvori der skelnes mellem stormfloder fra nord og syd. Designvandstanden relateres til 1990 hvor 0 m DVR90 antages at repræsentere middelhavniveauet i 1990 som fremskrives til i dag (2023), 2075 og 2125.

Den lavvandede og naturligt forekomne Drogden-tærskel, der strækker sig tværs over Øresund fra Amager til Malmø, hæmmer og forsinker vandgennemstrømningen i Øresund, hvilket skaber et unikt og komplekst forskelle mellem fordelingen af resulterende høje vandstande alt efter stormtypen. Dette udmøntes i en angivelse af separate designvandstande for kysterne henholdsvis nord og syd for København samt for en kyststrækning beliggende derimellem.

Tabel 1.1. Designvandstand. Maksimal stormflodsvandstand for områderne nord og syd for København (1990) og fremskrevne designvandstande ud fra IPCC scenarie SSP3-7.0 83-percentil (værdier afrundet i decimeter relateret til DVR90) for 2023, 2075 og 2125. Designvandstand for en 'midterste' af kyststrækningen er ligeledes angivet.

Lokalitet	År 1990	År 2023	År 2075	År 2125
Designvandstand NORD	2,79 m ≈ 2,8 m	2,79 m + 0,12 m ≈ 2,9 m	2,79 m + 0,60 m ≈ 3,4 m	2,79 m + 1,23 m ≈ 4,0 m
Designvandstand MIDT	3,3 m	3,4 m	3,9 m	4,5 m
Designvandstand SYD	3,79 m ≈ 3,8 m	3,79 m + 0,12 m ≈ 3,9 m	3,79 m + 0,60 m ≈ 4,4 m	3,79 m + 1,23 m ≈ 5,0 m

Som resultat af indeværende arbejde er der fundet en designvandstand i Køge Bugt på 3,79 m (med reference i år 1990) for stormfloder fra syd. Dette resultat bygger på stormflodsvandstanden på 2,86 m under 1872-stormfloden i Køge, hvortil der er lagt 0,28 m, som repræsenterer en forøget initial vandstand i Østersøen, et tillæg i vandstand på 0,54 m som følge af en 10 % forøgelse af maksimalvind samt et tillæg på yderligere 0,11 m som følge af et potentielt ændret stormforløb. For området nord for København anføres en designvandstand på 2,79 m som en statistisk beregnet 1000-års hændelse for stormfloder fra nord, tillagt bidrag for potentielt kraftigere storme. Designvandstanden fra nord svarer til, at der i modelleringer af stormfloder fra syd i resultaterne er observeret en gradient i vandstanden langs kysten mod nord på minimum 1,0 meter. Modelleringer i denne analyse understøtter tidligere modelleringsarbejde. For en strækning mellem den nordlige og sydlige del af kysten ved København fastsættes en designvandstand på 3,3 m.

I fremskrivning af havniveau er udledningsscenarioet SSP3-7.0 anvendt, fratrukket et lokalt bidrag for landhævning. Valget af SSP3-7.0 bygger på de nyeste vurderinger fra Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) og United Nations Environment Programme (UNEP), som viser, at de nuværende globale implementerede udledningspolitikker ligger over det mellemhøje scenarie, SSP2-4.5, men stadig under det højeste scenarie, SSP5-8.5. Med de seneste års udvikling i den globale udledning af drivhusgasser ses ikke en tilnærmelse af udledningsniveauer, der peger i retning af meget høje udledningsscenarioer som SSP5-8.5 og RCP8.5, der tidligere har indgået i statslige vejledninger.

Valget af SSP3-7.0, i fht eksempelvis SSP2-4.5, skal ses i lyset af infrastrukturejernes meget høje sikringskrav og lave tolerancetærskel. Derfor er usikkerheder i verdenssamfundets udvikling (fx befolkningsvækst, økonomi, teknologi, nationale politikker, geopolitik, konflikter, mv.), resulterende drivhusgasudledninger samt potentielle ændringer i implementerede politiske retninger inddraget ud fra et forsigtighedsprincip.

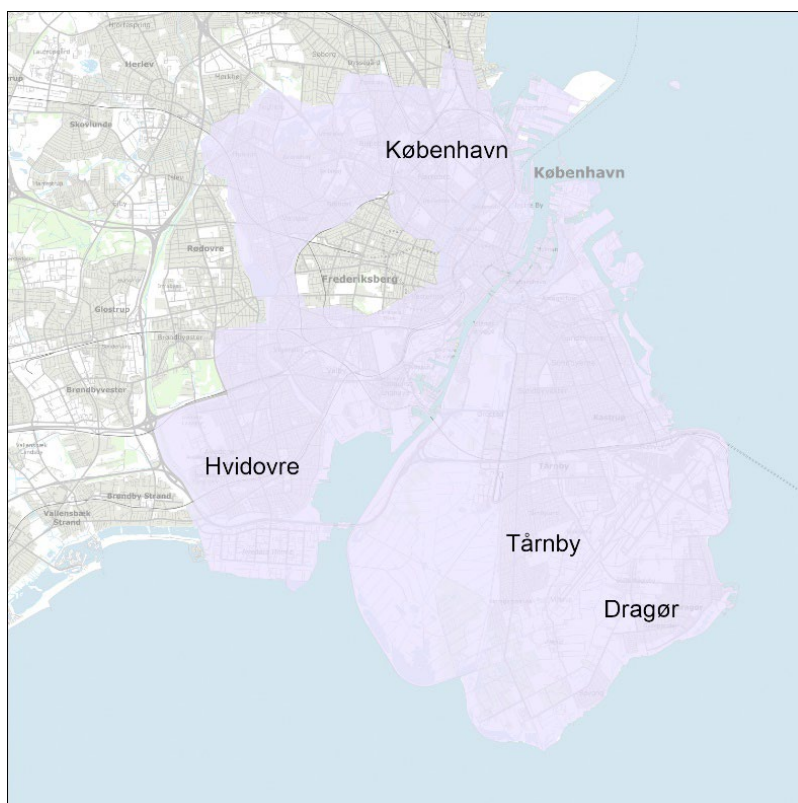
Derudover har de relativt store usikkerheder medført at der er valgt et udledningsforløb baseret på en høj øvre grænse i form af 83-percentilen. Ved anvendelse af 83-percentilen frem for medianen i SSP3-7.0, er den associerede havniveaustigning højere end i RCP8.5-scenariets medianbud (og det tilsvarende nyere SSP5-8.5). Herved er der valgt at sikre sig mod en kraftigere havniveaustigning end ved RCP8.5 medianen, idet effekten af ændringen i den anbefalede percentil (som afspejler usikkerhed i fremskrivningerne) overstiger ændringen i scenarievalg.

Rapporten er udarbejdet i perioden januar 2023 til januar 2024. Kystdirektoratet har forestået undersøgelsen og det redaktionelle ansvar med bidrag fra Damarks Meteorologiske Institut og deltagerne i Arbejdsgruppe Sikringsniveauer. Arbejdet er gennemført som led i forundersøgelsen af stormflodssikring af den centrale del af hovedstadsområdet. Transportministeriet, Hvidovre, Dragør, Tårnby og Københavns kommuner, Metroselskabet, Sund & Bælt, Københavns Lufthavn samt Banedanmark har bidraget og der er opnået konsensus omkring udkast til sikringsniveauer på baggrund af løbende interne drøftelser og præsentationer af de tekniske analyser.

2. Indledning

Scenarier for klimaforandringer viser, at der i fremtiden vil indtræffe højere stormflodsvandstande som følge af et generelt stigende havniveau. Dette gælder også hovedstadsområdet.

Oversvømmelse i hovedstaden kan få store konsekvenser for det danske samfund som helhed. Der findes store samfundsmæssige værdier i hovedstadsområdet, herunder væsentlige statslige værdier og vital infrastruktur. Disse værdier skal som følge af det stigende havniveau frem mod år 2125 sikres mod stormflod til et betydeligt højere sikringsniveau, end tilfældet er i dag.



Figur 2.1. Kommuner, der deltager i forundersøgelsen af en samlet stormflodssikring af hovedstadsområdet.

Transportministeriet koordinerer på den baggrund en forundersøgelse af stormflodssikring af den centrale del af hovedstaden. Forundersøgelsen omfatter de fire kommuner Hvidovre, Dragør, Tårnby og København og løber fra 2022-2024.

Forundersøgelsen af stormflodssikring af den centrale del af hovedstaden, jf. Figur 2.1, indeholder en række delundersøgelser, herunder en analyse af, hvilke sikringsniveauer der kan fastsættes omkring København. Med sikringsniveau forstås den højde på kystsikringsanlæg, som fx diger, højvandsmure eller stormflodsbarrierer, som skal forhindre, at havvand trænger ind i baglandet under en stormflod og medfører oversvømmelse af værdier og infrastruktur. Et sikringsniveau fastlægges ved hjælp af en række komponenter, som beskrives nærmere i Afsnit 2.4.

Målet for Arbejdsgruppe Sikringsniveauer er at definere tilstrækkelige sikringsniveauer omkring København. Sikringsniveauerne er tilstrækkelige, når de afspejler de forskellige interessenters behov og tager højde for fremtidens klima i oversvømmelsesbeskyttelsen af hovedstadsområdet. Sikringsniveauer defineres med et nutidigt, et 50-årigt (2075) og et 100-årigt (2125) sigte, der blandt andet afspejler investeringshorisont og levetidsbetragtninger for byudvikling og kystsikringsanlæg, og som indeholder scenarier for havniveaustigning.

Denne rapport samler op på resultaterne af delundersøgelsen om sikringsniveauer. Analysen af sikringsniveauer skal danne grundlag for forundersøgelsens øvrige analyser vedrørende finansiering, tekniske løsninger mv. Rapporten vil også indgå i det endelige beslutningsgrundlag, som vil blive forelagt regeringen og kommunalbestyrelserne forud for politisk stillingtagen til gennemførelse af konkrete tiltag til stormflodssikring af hovedstadsområdet.

2.1 Rammesætning

Delundersøgelsen om sikringsniveauer bygger på et kommissorium (Bilag A), hvoraf det fremgår, at formålet med delundersøgelsen er at gennemføre en analyse af behovet for beskyttelse mod oversvømmelse fra hav, herunder at analysere, til hvilken statistisk stormflodshændelse (gentagelsesperiode) og/eller til hvilket niveau, inklusiv klimaforandringer og bølgetillæg, forskellige områder og anlæg skal beskyttes.

Analysen af sikringsniveauerne bygger ikke på en klassisk risikoanalyse, men tager udgangspunkt i en fareundersøgelse, hvor faren har sit afsæt i ekstreme stormflodshændelser. På baggrund af parternes redegørelse for deres risikoaccept og tolerancerum, udarbejder og fastlægger arbejdsgruppen sikringsniveauer for oversvømmelse fra hav. Målet er at opnå konsensus om sikringsniveauerne.

Arbejdsgruppens analyse af sikringsniveauer indeholder blandt andet følgende elementer:

- Afklaring og forståelse af nultolerance, acceptabel restrisiko samt tidsperspektiv for design- og sikringsniveauer omkring København.
- Kortlægning og beskrivelse af historiske stormfloder, højvandsstatistikker, viden og data fra FN's klimapanel, landbevægelse samt evt. lokale sætninger med udgangspunkt i analysens geografiske område.
- Vurdering af udvikling i havniveau samt vind- og bølgeforhold i området frem mod år 2125 som følge af klimaforandringer.
- Analyse af behovet for beskyttelse mod oversvømmelse fra hav på grundlag af stormflodshændelser og kystens og baglandets sårbarhed.
- Vurdering af nødvendige sikringsniveauer/sikringskoter omkring København med inddragelse af tillæg for effekten af klimaforandringer, tillæg for lokal vind- og bølgestuvning, tillæg for bølgeopløb og -overløb på beskyttelses anlæg samt bidrag fra landbevægelser.

I analysen vil arbejdsgruppen endvidere vurdere foreliggende kortlægning og beskrivelse af muligt teknisk løsningsrum for opnåelse af sikringsniveauerne i området, herunder principielle koncepter som ydre sikringslinje, tilbagetrukket sikringslinje og dobbelt sikringslinje. Endvidere skal arbejdsgruppen forholde sig til eksisterende analyser og materiale om stormflodssikring af København. Arbejdet skal tage udgangspunkt i foreliggende data, som fx systematiske vandstandsmålinger. Der er således ikke tale om et arbejde, hvor der skal indsamles nye data og målinger.

I opdraget for analysen fremgår det, at man arbejder ud fra en ydre højvandsbeskyttelse, som vil dække hele området fra Gammel Køge Landevej/Avedøre i syd, via Amager til Københavns Kommunes grænse i nord (her forudsættes det implicit, at der senere ses på farebilledet på

tværs af kommunegrænser mod nord og syd). På det sydlige Amager undersøges en sandsynlig basisløsning, hvor Ullerupdiget forhøjes og forlænges, så det forbindes med en ny sikring af Kastrup Halvø. Som alternativ hertil undersøges en linjeføring, hvor også Dragør Kommune indgår.

Der vil være naturligt overlap mellem Arbejdsgruppe Sikringsniveauer (SN) og Arbejdsgruppe Teknik, Miljø og Anlægsøkonomi (TMA), da der er en tæt sammenhæng mellem kote, linjeføring og udformning af kystsikringsanlæggene.

2.2 Deltagere

En bredt sammensat arbejdsgruppe har stået for delundersøgelsen om sikringsniveauer:

- Miljøministeriet/Kystdirektoratet (KDI)
- Transportministeriet
- Danmarks Meteorologiske Institut (DMI)
- Hvidovre, Dragør, Tårnby og Københavns kommuner
- Metroselskabet, Sund & Bælt, Københavns Lufthavn og Banedanmark.

Miljøministeriet/Kystdirektoratet har varetaget formandskabet og sekretariatsfunktionen i arbejdsgruppen samt refereret til den nedsatte styregruppe for den samlede forundersøgelse af en stormflodssikring af den centrale del af hovedstadsområdet. Miljøministeriet/Kystdirektoratet og DMI har i fællesskab bidraget med faglig viden om statistiske analyser af potentielle stormflodshændelser og med faglig ekspertise i forhold til klimascenarier. Heri indgår data og viden om bl.a. fremtidig udvikling af havniveau samt vind- og bølgeforskel.

Arbejdsgruppens øvrige medlemmer har bidraget til rapporten med behovsanalyser, faglige input og gennem drøftelser og diskussioner af Kystdirektoratets og DMI's arbejde.

Det fremgår af kommissoriet for arbejdsgruppen (Bilag A), at der er mulighed for at inddrage andre interessenter. Der har derfor været afholdt møder i april 2023 og september 2023, hvor relevante forsyningsselskaber har haft mulighed for at kommentere på arbejdsgruppens arbejde. Her har HOFOR, BIOFOS, Tårnby Forsyning, Energinet.dk og By & Havn bidraget.

Arbejdsgruppens arbejde blev ligeledes præsenteret for og drøftet med rådgiverbranchen på møder i juni 2023 og august 2023, hvor NIRAS, COWI, RAMBØLL, DHI, SWECO og WSP deltog.

2.3 Proces og arbejdsgruppemøder

Arbejdsgruppen Sikringsniveauer skal levere ind til de øvrige arbejdsgrupper. Det har derfor været væsentligt med en koncentreret, effektiv og konstruktiv proces. Der har været afholdt i alt elleve arbejdsgruppemøder. Møderne er foregået i en vekselvirkning mellem faglige oplæg fra Kystdirektoratet og DMI, indlæg fra arbejdsgruppens øvrige medlemmer samt drøftelser og diskussioner.

Det indledende møde blev anvendt til at drøfte definitioner på forskellige begreber og opnå en fælles forståelse af den stillede opgave. Endvidere har arbejdsgruppen drøftet eksisterende data og analyser og hvordan, disse kan indgå i gruppens arbejde.

På det efterfølgende møde præsenterede infrastrukturejere og kommuner deres respektive behov for beskyttelse/risikovillighed. Flere infrastrukturejere arbejder med begrebet "nul-tolerance", idet oversvømmelse vil være kritisk i forhold til drift af deres anlæg. Kommunerne er i reglen villige til at acceptere en større grad af risiko.

Det tredje og fjerde møde har bl.a. omhandlet historiske kilder, deres troværdighed og hvilke konsekvenser, dette har for forskellige statistikker og tilgange til vurdering af stormfloder og

fastsættelse af sikringsniveauer. Der har ligeledes været en drøftelse af marine vandstands-målere og målte data samt udfordringerne med korte tidsserier, herunder også målinger i Køge Bugt (Køge har ca. 60-års data og Københavns Havn godt 130-års data). Benyttes alene målte data, er der en mulighed for at underestimere ekstremværdier for potentielle vandstande ved en stormflodshændelse. Omvendt kan der være en fare for at overestimere sandsynligheden for fremtidige stormflodshændelser, hvis der lægges for stor vægt på historiske observationer baseret udelukkende på mundtlige overleveringer og øjenvidneskildringer.

Det fjerde møde havde desuden fokus på levetid. Levetid handler i denne sammenhæng om mere end selve anlægget, og hvor længe dette må forventes at holde. Det handler også om investeringshorisont i relation til fremtidens klima. DMI holdt endvidere oplæg om klimascenarier og forventet havspejlsstigning omkring hovedstadsområdet. DMI's præsentation kom ind på de forskellige faktorer, som bidrager til den globale havniveaustigning, og gav et overblik over tendensen i havniveaustigning på tværs af Danmark.

På det femte møde blev teorien om dobbelt beskyttelseslinje diskuteret. Teorien går ud på at etablere en primær beskyttelseslinje suppleret med en sekundær linje, som kan forsinke og eventuelt hindre oversvømmelse. Teorien om dobbelt sikkerhedslinje gælder for højvandsbeskyttelse som klitter, diger og højvandsmure.

Et første udkast til rapport med arbejdsgruppens foreløbige konklusioner blev præsenteret og drøftet på det sjette møde i rækken.

Møde nummer syv til elleve blev anvendt til at konsolidere gruppens arbejde og kvalitetssikre resultaterne og den endelige rapport til styregruppen.

I september 2023 vurderede Kystdirektoratet og DMI at der er enkelte centrale analyser og modelleringer, som kræver supplerende og validerende undersøgelser. Det drejede sig specifikt om stormflodsmodellering og specifikt indflydelsen af f.eks. modelopsætning (domæner og rumlig opløsning), simuleringsperiode, bølgeopstuvning, fyldningsgrad i Østersøen, historiske vindektremer, stormforløb og vindretning. Endvidere blev der gennemført en specifik analyse til robustiggørelse af konklusioner omkring fremtidige ekstremvinde for Østersøen. På styregruppemøde den 25. september 2023 vedtog styregruppen disse supplerende undersøgelser. Dermed fremstår ovenfor omtalte supplerende undersøgelser som et supplement til indeværende rapport, med det formål at uddybe tekniske aspekter af de udførte stormflodssimuleringer, og som ligger udover den initiale aftale for arbejdet i denne arbejdsgruppe som i første omgang skulle basere sig på eksisterende analyser.

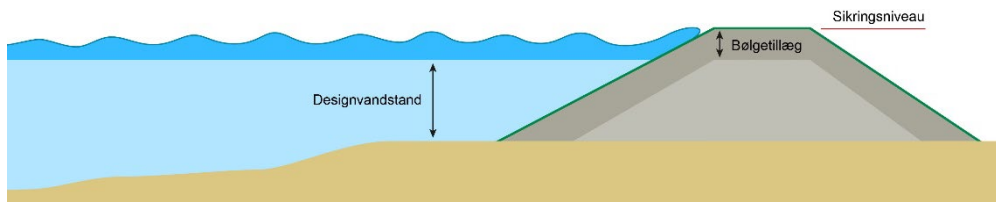
2.4 Begreber

Det er væsentligt at have fælles forståelse af begreber og termer, så misforståelser kan undgås. Arbejdsgruppen har derfor udarbejdet et "begrebsapparat".

Når man taler om *sikringsniveauer*, er det den fysiske højde på et teknisk anlæg til beskyttelse mod oversvømmelser. Sikringsniveauet kan være toppen på digekronen eller overkanten af en højvandsmur langs en havnepromenade. Sikringsniveauet skal være højere end vandstanden under ekstreme stormfloder for at kunne hindre, at havvand trænger ind i baglandet. Under stormflod er havoverfladen ikke en vandret og rolig overflade, men varierer og bevæger sig som følge af vindens påvirkning, der skaber strøm og bølger.

For at fastlægge et sikringsniveau for stormflodssikring er der derfor behov for at opdele sikringsniveauet i to dele: Højden af den teoretiske stillestående vandoverflade og et tillæg for bølger på vandoverfladen. Den teoretiske stillestående vandoverflade kaldes designvandstanden, da det er den vandstand, som indgår i dimensionering af det konkrete kystsikringsanlæg og dets højde (sikringsniveau), se Figur 2.2. Anlæggets sikringsniveau beregnes således:

$$\text{Sikringsniveau} = \text{Designvandstand} + \text{Bølgetillæg}$$

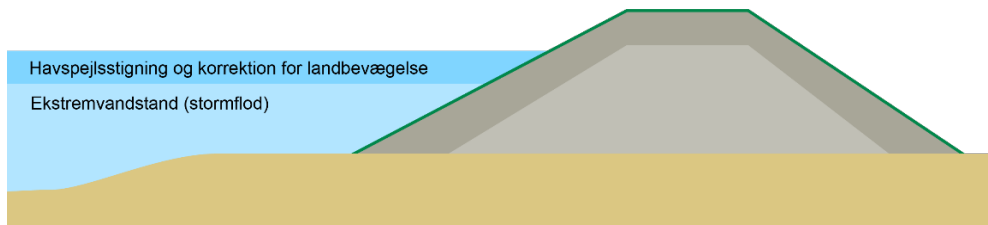


Figur 2.2. Definition af sikringsniveau bestående af designvandstand og bølgetillæg.

Designvandstanden er den vurderede højde langs kysten under en stormflod uden inddragelse af bølger. Designvandstanden er således et teoretisk niveau, da vandoverfladen under en storm altid vil være i bevægelse. Designvandstanden beregnes ved at fastlægge en ekstremvandstand i forhold til en reference. En *ekstremvandstand* kan for eksempel være en ekstrem vandstand som blev målt under en historisk stormflod. Ekstremvandstanden kan også være en beregnet vandstand, som statistisk set nås eller overgås med en vis hyppighed (se begreb middeltidshændelse længere nede). I alle tilfælde skal ekstremvandstanden referere til en middelvandstand og/eller højde med reference til en historisk stormflod eller udgivelsesåret for en ekstremværdistatistik eller lignende.

Når sikringsniveauer for teknisk stormflodsikring planlægges, dimensioneres tilhørende anlæg for en fastlagt levetidshorison, fx 50 år eller 100 år. Valget af levetidshorisonen er vigtig for at kunne tage højde for havniveaustigning i fastlæggelsen af designvandstanden, som uddybet i Afsnit 7.1. Havniveaustigningen tillægges ekstremvandstanden for at kunne fastlægge designvandstanden (se Figur 2.3). Endeligt skal det undersøges, om havniveaustigningen skal korrigeres for vertikal landbevægelse. Designvandstanden beregnes således:

$$\text{Designvandstand}_{Arstal} = \text{Ekstremvandstand} + \text{Havniveaustigning} \pm \text{landbevægelse}$$



Figur 2.3. Definition af designvandstand bestående af ekstremvandstand, havniveaustigning og evt. korrektion for landbevægelse.

Bølgetillægget fastlægges som følge af den bølgepåvirkning, der belaster et kystsikringsanlæg under en stormflod. Bølgepåvirkningen omfatter tre typer af bidrag og beskrives nærmere i Afsnit 7.4.

I praksis kompliceres det af, at de kystnære områder, især mod syd, ikke har samme høje sikringsbehov som den kritiske infrastruktur, der ligger længere væk fra kysten. Derfor kan kystnære diger dimensioneres lavere end designvandstanden foreskriver, hvis blot alle sikrede områder og anlæg bag digerne opnår det ønskede sikringsniveau.

Risiko er udtryk for kombination af sandsynlighed for, og konsekvenser af, en uønsket hændelse. Risikoen kan findes gennem en risikoberegning. I risikoberegningen multipliceres konsekvenserne af en uønsket hændelse med den sandsynlighed for, at denne hændelse indtræffer. Den statistiske sandsynlighed for, at en uønsket hændelse indtræffer, kaldes *fare*. Konsekvenserne udtrykkes som *sårbarhed* i form af håndgribelige og uhåndgribelige værdier, der kan gå tabt eller tage skade som følge af den uønskede hændelse.

Heraf ses at: $\text{Risiko} = \text{fare} * \text{sårbarhed}$. Når der skal beregnes risiko for flere hændelser, fås

den samlede risiko ved at summere risikoen ved de enkelte hændelser. Risikoen opgøres økonomisk (kroner/år) eller som et indekstal.

På trods af implementering af tekniske fysiske anlæg og beredskabsmæssige foranstaltninger til at reducere risikoen for oversvømmelse, forbliver altid en risiko, som betegnes *restrisiko*.

Endvidere er det vigtigt at forstå begreber som *middeltidshændelse*, *gentagelsesperiode* og *sikringsbehov*.

En *middeltidshændelse* beskriver den vandstand, der statistisk set nås eller overgås med en vis hyppighed. Hver middeltidshændelse beskrives ved en middeltidsvandstand eksempelvis: 10-års middeltidshændelse = 200 cm DVR90 og omvendt 200 cm DVR90 = 10-års middeltidshændelse. Afhængig af anvendelsen tages der fx ved design af kystbeskyttelse udgangspunkt i middeltidshændelse og deraf udledes vandstands niveauet, mens fx ved udbetaling af erstatning efter en stormflod er udgangspunktet et indtruffet niveau, og deraf udledes middeltidshændelsen. I daglig tale anvendes blot udtrykkene 10-årshændelse, 20-årshændelse mv. med angivelse af en tilhørende vandstand, der ved at koble niveau og periode, beskriver den statistiske sandsynlighed.

Gentagelsesperioder (fx år) (også kaldet middeltidsafstand) afspejler længden af den periode, hvor den givne hændelse statistisk vil blive overskredet netop én gang. I Kystdirektoratets Højvandsstatistikker anvendes typisk gentagelsesperioder på 20 år, 50 år og 100 år. I henhold til anbefalinger (jf. fx Pugh & Woodworth, 2014) kan man nogenlunde pålideligt anvende gængs ekstremværdistatistik baseret på måledata ud til 2½-3 gange tidsseriens længde. I princippet skulle der derfor bruges ca. 3500-års data til at bestemme en 10.000-årshændelse. Problemet er, at der ikke foreligger så mange data, og at klimaet ikke er konstant i 3500 år. Så vi får værdier, der gælder for middelklimaet i den periode – mens vi befinder os i periodens slutning. Metoden kan betragtes som den bedst mulige med de forhåndenværende data. Det er der generel konsensus om i praksis, og metoden finder også bred anvendelse. Enkelte steder (nukleare anlæg) anvender man endda endnu længere gentagelsesperioder end 10.000 år.

Gentagelsesperioder afspejler den statistiske sandsynlighed for, at en højvandshændelse indtræffer. I KDI's Højvandsstatistikker (KDI, 2018) anvendes typisk gentagelsesperioder på 20 år, 50 år og 100 år.

Sikringsbehov er defineret som den middeltidshændelse inkl. evt. fremtidig havspejlsstigning, et geografisk område eller et fysisk anlæg har behov for at blive beskyttet til. Behovet fastlægges gennem en afvejning af risiko for oversvømmelse og omkostninger (evt. inklusive ulemper, der ikke kan opgøres økonomisk) ved sikringen.

Desuden er det væsentligt at forstå begrebet *levetid*. Der er i det konkrete eksempel taget udgangspunkt i beregningen af levetid for et dige. Levetid er den tid, inden for hvilken målsætningen for et kystsikringsanlæg ønskes opfyldt, eksempelvis 60 år. Et eksempel på en målsætning ift. oversvømmelse kan være, at der i løbet af højvandsbeskyttelsens levetid på 60 år ikke løber mere en 0,5 m³ vand pr. meter i sekundet over højvandsbeskyttelsen ved en 100-årshændelse. Et andet eksempel kunne være en øvre grænse på sandsynlighed for overskyl i kystsikringsanlæggets levetid: Hvis vi for eksempel sætter levetiden til 100 år, og maksimalt vil acceptere en grænse på 1 % sandsynlighed for overskyl, så kræver det sikring til 10.000-års niveauet. Hvis vi kan leve med en grænse på 5 % sandsynlighed for overskyl, skal vi sikre til 2.000-års niveauet – eller regne med en kortere levetid - i dette eksempel 20 år.

Fastsættelsen af kystbeskyttelsens levetid afhænger af metode, de beskyttede områdes størrelse, og hvad der skal beskyttes. Der kan være stor forskel på levetid alt efter, om der er tale om diger eller andre kystsikringsanlæg.

3. Risikoaccept og sikringsbehov

Termerne acceptabel risiko og sikringsbehov kan omformuleres til spørgsmålene: "Hvad er sikkert nok?" og i tilknytning hertil "Hvor meget skal risikoen så reduceres?"

Risikoaccept er niveauet for potentielle tab, et samfund eller en aktør anser for acceptabelt under de eksisterende sociale, økonomiske, politiske, kulturelle, tekniske og miljømæssige forhold. Når man skal definere et beskyttelsesniveau, baserer man det på den risiko, som bygger på kendte sandsynligheder for faren og skadesprofilen. En sådan analyse er ofte tilstrækkelig til at afgøre, om et planlagt kystsikringsanlæg er fornuftigt dimensioneret eller ej.

Aktører har forskellige opfattelser af risiko alt efter, hvilke værdier den enkelte har på spil, og hvilke omkostninger, man er villig til at påtage sig. I forbindelse med arbejdsgruppens arbejde er begrebet "nul-tolerance" blevet diskuteret. En fuldstændig eliminering af risikoen er ikke en praktisk mulighed, idet der altid vil eksistere en *restrisiko*: En hændelse, som ingen har kunnet forestille sig eller forudse (fx et meteornedslag eller et skib, der påsejler et dige) vil kunne indtræffe, selvom sandsynligheden herfor er meget lille. Det skal derfor understreges, at fokus i arbejdet her udelukkende er på sikringsniveau i forhold til ekstremhændelser forårsaget af storm.

Store infrastrukturejere som Metroselskabet, Sund & Bælt m.fl. arbejder sædvanligvis med returperioder for stormflodshændelser på mellem en 2.000-årshændelse på 84 pct. percentilen og en 10.000-årshændelse på medianen. I praksis betyder det, at selskaberne stiller krav om en meget høj grad af beskyttelse. Kommunale interesser arbejder typisk med lavere gentagelsesperioder på mellem 100 og 500 år. Private grundejeres risikovillighed er typisk endnu større, da konsekvenserne opleves som mere begrænsede. Her er der typisk tale om gentagelsesperioder på mellem 50 og 200 år.

Forskellige forståelser af risiko fører til forskellige opfattelser af, hvor meget og hvor hurtigt, der bør kystsikres, og ikke mindst hvor villig en aktør er til at bidrage økonomisk til en løsning. Ofte vil der derfor blive udarbejdet en cost-benefit analyse for at sikre en balance mellem potentielle skader og beskyttelsesbehovet.

I forbindelse med arbejdet på sikringsniveauer er de enkelte kommuner, infrastrukturejere og forsyningsselskaber blevet bedt om at gøre rede for, hvilke skader en oversvømmelse vil kunne påføre deres respektive værdier. Desuden er de blevet bedt om at oplyse, hvorvidt de arbejder ud fra et kriterium i forhold til, hvor meget oversvømmelse, der potentielt kan accepteres (vanddybde, varighed mv.). Endvidere er der blevet spurgt ind til, til hvilket niveau, der er sikret til i dag.

En egentlig samfundsøkonomisk analyse af beskyttelsesbehovet vil blive gennemført i forundersøgelsens arbejdsgruppe Samfundsøkonomi. På grundlag af de fastlagte sikringsniveauer samt forslagene til kysttekniske løsninger og overslag samt de miljømæssige problemstillinger vil der blive foretaget en analyse af gevinster og omkostninger ved en samlet stormflodssikring af København.

3.1 Kommuner

Kriterier

Hovedstaden udgør et stort geografisk område, hvorfor kommunerne ikke nødvendigvis ser samme sikringsbehov, hverken inden for den enkelte kommune eller på tværs af kommunegrænserne. Det handler om topografiske forhold, hvor dele af hovedstadsområdet er mere udsatte end andre, og det handler om sårbarhederne i de enkelte områder.

Københavns Kommune har meldt ud, at kommunen tager udgangspunkt i arbejdet med modningsprojektet om stormflodssikring af Kalveboderne "Sammen om vandet" (og den risikoforøgelse dette må medføre) og kommunens risikostyringsplan, hvor der arbejdes ud fra et sikringsniveau, der svarer til en 2.000-årshændelse fra syd i år 2100, svarende til 5,0 meter DVR90 syd for Kalveboderne. Dette er en opjustering af Københavns Kommunes stormflodsplan fra 2017, hvor sikringsniveauet blev sat til en 1.000-årshændelse fra syd i år 2100, svarende til 4,6 meter DVR90.

Dragør Kommune har tidligere meldt ud, at kommunen ud fra en økonomisk betragtning har valgt at tage udgangspunkt i en 100-årshændelse. Eftersom kystlinjen vender mod tre verdenshjørner i Dragør, vil beskyttelse til en 100-årshændelse svare til et sikringsniveau på mellem 2,2 og 3,0 m DVR90 frem til 2050. Herefter vil beskyttelsen skulle forhøjes/udbygges med yderligere tiltag for at kompensere for havniveaustigninger, så sikringsniveauet fortsat er en 100-årshændelse. Det løsningsforslag, der arbejdes med, indebærer, at beskyttelsen kan forhøjes til kote 2,7-3,5 m DVR90 frem mod 2100. Der er i forundersøgelsen tilføjet et addendum til hovedkommissoriet, hvor der som alternativ til basisløsningen bag om Dragør, også undersøges en løsning rundt om Dragør, som vil beskytte størstedelen af kommunen mod stormflod. Denne løsning indebærer et højere sikringsniveau end det lokale for at matche infrastrukturejernes sikringsbehov.

Hvidovre Kommunes geografiske område har ikke ét sikringsniveau, men kommunen arbejder med et differentieret sikringsbehov efter området og dets funktion. For erhvervs kvarteret Avedøre Holme arbejder kommunen med et sikkerhedsniveau svarende til en 1000+ -årshændelse, idet infrastrukturejeres behov for højere sikringsbehov for kritisk infrastruktur respekteres. For boligkvarteret ved Kalveboderne arbejdes med en sikringskote svarende til en 100- til 200-årshændelse.

I Tårnby Kommune arbejdes der ikke ud fra et specifikt sikringsniveau. Området Østamager, Amager Strandvej og Københavns Lufthavn har ikke etableret sikring langs kysten ud over det naturlige kystlandskab. Området er derfor sårbart over for stormfloder, der overstiger en 100-årshændelse, specielt hvis der tilføjes klimafremskrivninger. Området Sydamager, Kongelundsvej og Tømmerupvej er sikret til et vist niveau mod stormfloder fra syd, hvor der kun vil komme mindre oversvømmelser nord for diget ved en 1000-årshændelse i dag.

Hvordan vil kommunerne blive ramt?

En oversvømmelse af hovedstadsområdet vil få store konsekvenser for den enkelte kommune og for det danske samfund mere generelt. Oversvømmelse kan føre til skader på ejendomme men fx også resultere i stop af S-togsdriften og forurening fra spredning af slam/spildevand fra pumpestationer og rensningsanlæg.

Hvidovre Kommune oplyser, at oversvømmelser fra kote 1,4 og op til 3,0 meter DVR90 vil forvolde skader på flere hundrede ejendomme – primært boligområder med tæt lav bebyggelse. Området inkluderer også børneinstitutioner, en S-togsstation, flere store kloakpumpestationer og spildevandsbassiner samt Renseanlæg Damhusåen (i København). Stormfloder over kote 3,0 m DVR90 kan overstige sikringen af industriområdet Avedøre Holme, som vil begynde at blive oversvømmet. Dette omfatter også boligområder nord og øst for Avedøre Holme samt

Amagermotorvejen. Avedøre Holme har over 1.000 virksomheder med 10-12.000 arbejdspladser, Ørsteds Avedøreværket, Renseanlæg Avedøre Holme, affaldsdepotet AV-Miljø, flere procesvirksomheder som Chr. Hansen, Syntese og flere virksomheder og -anlæg, der er omfattet af risikobekendtgørelsen.

Ved oversvømmelser over ca. kote 3,8 meter DVR90 vil Holbækmotorvejen og Ringstedbanen blive ramt og blokeret. Potentielle skader på baneanlæg er ikke klarlagt.

I Tårnby Kommune vil Østamager, Amager Strandvej og Københavns Lufthavn være sårbare områder, idet der ikke i dag er etableret sikring langs kysten ud over selve kystlandskabet. Området er derfor sårbart over for stormfloder, der overstiger en 100-årshændelse, specielt når der tilføjes klimafremskrivninger. En oversvømmelse vil have store følger, idet der findes en koncentration af infrastrukturselskaber i dette område. Langs Amager Strandvej er der flere lokalplaner, hvor der fortsat er mulighed for byudvikling i form af kontor- og boligbyggeri. Bl.a. kan nævnes lokalplanen for Øresundsparken, der giver mulighed for ca. 100.000 m² boliger, som stadig ikke er udviklet, mens området ved Scanport og Kastrup Station fortsat kan udvikles med omkring 60-70.000 m² til kontor og serviceerhverv. Derudover ligger Tårnby Kommunes eneste rensningsanlæg tæt ved kysten. Dette er dog selvstændigt sikret med en højvandsmur og port. En ekstrem stormflodshændelse vil dog potentielt kunne oversvømme sikringsanlægget, hvilket vil være kritisk.

Hvordan er kommunerne beskyttet i dag og hvilke løsninger er iværksat?

Kommunerne har gennem årene etableret flere kystsikringsinitiativer og arbejder fortsat med at iværksætte nye løsninger i takt med udviklingen af hovedstaden.

Folketinget vedtog i 2021 loven om anlæg af Lynetteholm, og i januar 2022 gik anlægsarbejdet i gang. Det er visionen, at kystlandskabets design og klimasikringskote skal være dimensioneret til at kunne modstå de havniveaustigninger frem mod 2075, som de nuværende prognoser viser. I Kronløbet nord for Lynetteholmen planlægges det at anlægge en portløsning for at lukke Københavns Havn af mod stormfloder fra nord, men der er ikke truffet endelig beslutning herom.

Hvidovre Kommune oplyser, at man i dag kun har etableret egentlig kystsikring i form af diget omkring Avedøre Holme med tilknyttede diger i Kalveboderne og højvandsmur i Langhøjparken. Kystsikringsanlægget sikrer til kote 3,0 meter DVR90 suppleret med ekstra sikring mod bølger ud mod Køge Bugt på minimum 0,6 meter.

I forhold til en sikring af det øvrige hovedstadsområde bemærkes, at Avedøre Holme med sin nuværende digebeskyttelse vil indgå i en stormflodssikring af Kalvebodbroerne med stormflodspor. Portløsningen vil endvidere sikre de lavtliggende områder langs Kalveboderne og Sydhavnen mod oversvømmelse.

3.2 Infrastrukturejere

Kriterier

Infrastrukturejerne har generelt meget høje krav til sikringsniveau, idet det har store samfundsmæssige konsekvenser, hvis vital infrastruktur sættes ud af drift.

Sund og Bælt har fx oplyst, at der er tilnærmelsesvis nul-tolerance i forhold til vand i Sund & Bælts anlæg inkl. tunnellerne. Sund & Bælt anvender således en 10.000-årshændelse som designkriterium for alle deres anlæg. Ved en stormflod fra syd viser tidligere stormflods- og klimaanalyser en begyndende oversvømmelse ved en gentagelsesperiode på ca. 900 år. Ved en gentagelsesperiode på ca. 1.325 år vil hele anlægget samt tunnelen under Drogden være oversvømmet. En indirekte effekt i form af grundvandsstigning og løft af en del af rampen til

Sydhavns-gadetunnelen er vurderet til at kunne forekomme ved stormfloder med en gentagelsesperiode på ca. 350 år, hvor risikoen dog er reduceret ved beredskabsmæssige tiltag (og hvor alle tal er angivet på baggrund af tidligere udførte analyser).

Metroselskabet har ligeledes en lav tolerance i forhold til vand i metro-systemet. Hvert metro-anlæg har forskellige kriterier i forhold til, hvornår oversvømmelsen skader anlægget. En vandstand på 2,2 m DVR90 i Københavns Havn, eller 4,5 m DVR ved Køge Bugt vil få begyndende konsekvenser for metroen.

Banedanmark har udfordringer med oversvømmelser, der overstiger 2 m DVR90. Disse vil potentielt kunne ramme flere strækninger i hovedstadsområdet og betyde at togdriften må indstilles på strækningerne i længere perioder. Dette gælder strækningen fra Ny Ellebjerg Station til Kalvebod og tunnelen fra Sydhavn Station. Ved vandstande, som overstiger 3 m DVR90, vil dobbeltspor på Amager samt stationerne Ørestad, Tårnby, Kastrup og Københavns Lufthavn yderligere påvirkes, og togene vil være sat ud af drift i en længere periode. Ved 4 meter DVR90 vil også dobbeltspor midt på Amager blive ramt.

Hvordan vil infrastrukturselskaberne blive ramt?

Sund & Bælt har løbende fået udarbejdet analyser, der kortlægger kritiske områder i forhold til oversvømmelse:

- Kastrup Halvø øst for Kastrup lufthavn, hvor vandet i særlige situationer vil kunne oversvømme det sydlige dige, der forbinder halvøen og Amager
- Kalveboddiget på Vestamager og
- Stormflod fra syd, der breder sig ind over land

Ved ekstreme stormfloder vil *Metroselskabets anlæg* få vandskader, der vil kræve større og mindre reparation, men som i sidste ende vil kræve langvarige driftsstop. Skader vil kunne ske på alle dele af anlægget – nedgange, skakter, elevatorer, teknikrum, CMC, tunneller, mv. Afhængigt af hvor oversvømmelsen rammer, vil metroen have en forventet 'nedetid' på op til 12 måneder og efterfølgende reduceret drift i op til 6 måneder.

For Banedanmarks vedkommende er det særligt IT- og sikringsudstyr samt broer, der vil blive påvirket ved stormflod. Særligt kabler til sikring og IT vil kunne kortslutte ved højvande. Ved vand i skinnehøjde vil togdetekteringen ikke længere virke, og trafikken vil blive vanskeliggjort eller umulig. Tilsvarende vil udstyr som sporskiftedrev, baliser, akseltællere og lignende, som af indlysende grunde er anbragt i niveau med skinnerne, og som indeholder elektriske komponenter, risikere at blive ødelagt eller sat ud af drift ved vandstand i skinnehøjde. Afhængigt af varighed og intensitet vil afvandingen af oversvømmede og regnmættede områder endvidere kunne skade broer og dæmninger også ved vandstand under skinnehøjde.

Analysen af stormfloders udbredelse viser, at Øresund Landanlæg, herunder Kastrup Station, vil blive oversvømmet ved indstrømmede vand fra Kastrup Halvø. Endvidere er både motorvejen og jernbanen på Øresund Landanlæg meget udsat ved stormfloder, da de af støjhensyn flere steder er linjeført kun lidt over eller lige under havniveau.

I forhold til *lufthavnen* vil en oversvømmelse have store konsekvenser for flytrafikken i en periode. Efter en voldsom oversvømmelse vil der skulle ske en fysisk test af styrken af landingsbanernes bæreevne, hvilket kan risikere at tage flere uger og i værste fald op til en måned (kræver tilvejebringelse af en speciel testmaskine). Endvidere vil en nedlukning af Naviairs tekniske installationer være alvorlig og kunne berøre hele det danske luftrum. Der er kabler i hele lufthavnsarealet, hvorfor man særligt er bekymret for kortslutninger. Disse kan dog modvirkes ved nedlukning af det tekniske udstyr inden oversvømmelse.

Til hvilket niveau er infrastrukturejerne beskyttet i dag og hvilke løsninger er iværksat?

Infrastrukturejere som Metroselskabet og Sund & Bælt arbejder systematisk med at beskytte deres anlæg.

Beskyttelse mod oversvømmelse fra stormflod i metroen findes i dag som automatiske porte i tunnellerne, døre i passagertunnelene (der aktiveres manuelt) og pumpestationer i tunnellerne.

Der er opført en række diger på Amager herunder diger på Vestamager og Ullerupdiget. Endvidere er Københavns Lufthavn i dag beskyttet til kote 2,1 m DVR90. Herudover har lufthavnen investeret i mobile watergates, så man reelt kan beskytte sig til 2,5-2,6 m DVR90.

Flere af infrastrukturejerne ser endvidere i fællesskab på permanente lokale løsninger og herunder løsninger, der vil kræve forhøjelse af Ullerup Diget.

3.3 Forsyningselskaber mv.

Kriterier

Flere forsyningselskaber er også yderst følsomme over for oversvømmelse og har udarbejdet analyser over kritiske vandstande i forhold til deres anlæg. Den kritiske vandstand varierer alt efter hvor i hovedstadsområdet, man befinder sig. BIOFOS har eksempelvis tre renseanlæg, hvor Renseanlæg Lynetten har en kritisk vandstand på 2,13 m DVR90, Renseanlæg Avedøre 2,55 m DVR90 og endelig Renseanlæg Damhusåen, som har en kritisk vandstand på 2,55 m DVR90. Ved HOFOR's Amagerværket på det nordlige Amager, som leverer el og fjernvarme til det storkøbenhavnske fjernvarmenet, er kriteriet ved kajkantens højde på 2,7 m DVR90. HOFOR har en række øvrige anlæg længere inde på land med varierende kriterier for kritisk vandstand.

By og Havn dækker et større geografisk område og ejer arealer med tekniske anlæg på Prøvestenen, Refshaleøen, i Nordhavn og i Inderhavnen, hvor stormflod fra nord kan have store negative konsekvenser. Prøvestenen har et kritisk niveau ved over kote +2,5 m DVR90. For Refshaleøen er vandstande over kote ca. +2,0 m DVR90 ved halvøens østside kritiske, mens Nordhavnen kan blive udsat for oversvømmelse ved vandstande over kote ca. 2,5 m DVR90.

Hvordan vil forsyningselskaberne blive ramt?

Oversvømmelse kan have store konsekvenser for forsyningselskaberne i forhold til driftsforstyrrelser af kortere eller længere varighed og i forhold til elektriske installationer. For eksempel vil BIOFOS ikke kunne drive deres anlæg, hvis der sker vandindtrængning i el-anlægget. Indtrængende vand vil forstyrre de biologiske processer, som efterfølgende vil skulle genopbygges, ligesom berørte elinstallationer vil skulle udskiftes.

En stormflod, der rammer hovedstadsområdet, kan have en række konsekvenser for HOFOR's anlæg og forsyningsopgaver ift. fjernvarme, fjernkøling, gas, vandforsyning og spildevand. HOFOR har således oplyst, at hvis Amagerværket rammes af en stormflod, vil dette medføre skader på fjernvarmenettet og nødvendiggøre nyanskaffelse af elinstallationer, mekaniske dele som fx pumper, inventar, køretøjer samt oprydning/tørring, m.v. Der forventes ligeledes driftsstop, hvor der ikke kan leveres fjernvarme i op til ca. 3 måneder afhængigt af skadernes omfang. Dette kan påvirke opvarmning af store dele af København, hvilket kan udgøre en trussel for byens borgere særligt i vinterperioden, hvor risikoen for stormfloder er størst. En stormflod vil også kunne medføre store skader på gasforsyningen, særligt koncentreret til Amager, Kløvermarken Gasværk, der beskyttes lokalt op til kote 3,2 ved hjælp af stormflodsbarrierer. Oversvømmelser over dette niveau vil resultere i nyanskaffelse af elinstallationer og en mulig anlægsrenovering i op til 6 måneder. Op til ca. 15.000 kunder på lavtryksnettet kan risikere at blive afbrudt fra bygasforsyningen i en periode efter stormfloden. Endelig vil en

stormflod også kunne få konsekvenser for afløbssystemet og pumpestationerne. Her kan forventes skader på selve pumperne, mekaniske- og elinstallationer, niveaumålere i overløb, samt mandskabsfaciliteter, værksteder og køretøjer. Herudover vil de oversvømmede områder plus de tilstødende områder kunne risikere manglende eller stærkt forringet spildevandsservice i op til flere måneder afhængigt af oversvømmelsens alvor.

For Energinet kan en oversvømmelse af en højspændingsstation i hovedstadsområdet i værste fald medføre, at hele stationen kobler ud. Hvorvidt en udkobling af en station fører til nedbrud i strømforsyningen afhænger af flere forskellige faktorer, bl.a. om stationen er ensidet eller flersidet forsynet, og om der samtidig er andre stationer, som er driftsmæssigt udfordret. Hvis flere stationer oversvømmes samtidigt, øges risikoen for, at der kan forekomme større forsyningssvigt. Et forsyningssvigt kan variere fra at være kortvarigt i et begrænset geografisk område til at være længerevarende og omfatte hele Sjælland. De skader, der sker på de tekniske komponenter på grund af en oversvømmelse fra havet, kan være af en sådan karakter, at samtlige komponenter skal udskiftes. Dette afhænger naturligvis af oversvømmelsens udbredelse og dybde. Derudover bør det tages i betragtning, at saltvand vil medføre større skade på metalkomponenter end ferskvand.

By og Havn ser ligeledes udfordringer med driftsforstyrrelser og skader på tekniske anlæg og bygninger. Ved ekstreme vandstande kan tankanlæg, oplag, driftsmateriel, bygninger og eventuelle kommende infrastrukturanlæg potentielt blive skadet, samt medføre spredning af forurening ved Prøvestenen. Der peges ligeledes på, at der er mange boliger og arbejdspladser i hovedstadsområdet med tilhørende infrastruktur og tekniske installationer. En oversvømmelse vil derfor kunne ramme aktiviteter og trafik i et stort område og dermed få store konsekvenser for mange menneskers dagligdag.

Til hvilket niveau er forsyningsselskaberne beskyttet i dag og hvilke løsninger er iværksat?

De fleste forsyningsselskaber er i dag beskyttet i nogen grad. For eksempel er alle BIOFOS-anlæg i dag sikret med diger, men der er sandsynligvis behov for forhøjelse frem mod 2050 og 2100. Endvidere kan der være udfordringer med indtrængning af vand fra baglandet på Renseanlæg Avedøre og Renseanlæg Damhusåen.

HOFOR overvejer i varierende omfang beskyttelse fra havet. Fx ved geninvestering i Kløvermarks pumpestation, så den er stormflodssikret til en relativt høj kote på 2,8 meter. Endvidere er HOFOR er i gang med at reducere risici for bl.a. nedbrud på servere ifm. NIS 2-direktivet, som også forventes at bidrage til risikoreduktion ved en mulig stormflod gennem flytning af den kritiske infrastruktur.

Også Energinet er i gang med at identificere og efterfølgende implementere forebyggende foranstaltninger, som har til hensigt at sikre mod oversvømmelser fra hav. Eksisterende sikrings tiltag varierer lokalt.

By & Havn er i gang med anlæg af Lynetteholm, der etableres med naturbaseret stormflodssikring, råjordsplanum inden for perimeterkonstruktionen i minimum kote +4,0 meter DVR90 og færdig byggemodnings- og belægningskote højere end +4,0 meter DVR90. Byudvikling og anlæg på halvøen kan frem til år 2075 stormflodssikres yderligere ved forhøjelse/forstærkning af perimeteren baseret på nyeste viden til den tid. By & Havn er ligeledes i gang med udvikling af Ydre Nordhavn med nye bykvarterer, arbejdspladser og grønne arealer. En af de væsentligste forudsætninger for udviklingen er, at området sikres mod oversvømmelse ved stormflod. Der er opstillet to principper for stormflodssikring med hver deres overordnede løsning på en sikring af Ydre Nordhavn mod oversvømmelse ved stormflodshændelser; hhv. langs kajkanterne eller ved terrænbearbejdning på land. Begge principper forudsætter, at der etableres sluseporte mellem Oceankaj i Nordhavn og Lynetteholm, samt i Kalkbrænderiløbet.

4. Forudgående sikkerhedsvurderinger

Klimaforandringer og et stigende havniveau vil have store konsekvenser for hovedstadsområdet. Kommuner, infrastrukturejere og mange andre aktører har derfor arbejdet med tilpasnings- og sikringsløsninger i en del år. En række undersøgelser og analyser er udarbejdet af blandt andet private rådgivende ingeniørvirksomheder. Undersøgelser har forholdt sig til historiske højvandsstande, ekstremværdistatistikker, sikringskoter og forskellige beskyttelsestiltag for hovedstadsområdet mod oversvømmelser fra hav. I det følgende præsenteres en oversigt over arbejder, som har en direkte faglig relation til denne delundersøgelse om sikringsniveauer. Sidst i kapitlet præsenteres en oversigt over rapporter mv. om stormflodssikring af hovedstadsområdet udarbejdet over de seneste årtier.

Allerede i foråret 2010 besluttede Københavns Kommune at undersøge potentielle oversvømmelser og disses skadesomfang ved ekstreme højvandshændelser i fremtiden for den centrale del af København, på Amager og Christianshavn, hvis der ikke blev etableret stormflodssikring i området. COWI (2010) konkluderede dengang, at der er umiddelbare løsninger til sikring af Københavns Kommune mod et højvande på 2,55 meter DVR90. Dette skyldes blandt andet, at baglandets terræn begynder at stige kraftigere ved højere koter, hvilket betyder at oversvømmelse ikke vil brede sig så langt ind i baglandet. Sikringskoten på 2,55 cm DVR90 svarer jf. COWI's rapport til en 70-årshændelse i 2110.

I 2016 udarbejdede COWI et designgrundlag for beskyttelse mod oversvømmelse af området omkring København. Undersøgelsesområdet omfattede hele kyststrækningen fra Nordhavn/Oceankaj til Avedøre Holme. Denne tekniske udredning havde til formål at få et første og samlet overblik over truslen fra højvande i hovedstadsområdet og hvordan denne trussel vil udvikle sig i fremtiden som følge af havniveaustigninger. Udredningen bygger desuden videre på COWI's omfattende arbejde i vurdering af historiske hændelser fra 1997 for Ørestadsselskabet. Udredningerne var et supplement til Københavns Kommunes Klimatilpasningsplan, og foreslog umiddelbart ud fra et økonomisk synspunkt, at der fastlægges et beskyttelsesniveau "op til et niveau svarende til et højvande, der forekommer ca. hvert 1.000 år i 2050, og at alle aktiviteter i området tager højde for en fremtidig sikring, svarende til et 1.000-årshøjvande, som det forventes at forekomme i år 2100." COWI's rapport pegede dog fx også på, "at for Metroen har der været anvendt en sikring op til et 10.000-årshøjvande, som det forventes i år 2100". Disse anbefalede sikringsniveauer svarede til følgende sikringskoter ved Nordhavn/Oceankaj og Avedøre Holme (Tabel 4.1).

Tabel 4.1. Sikringskoten til et 1.000-årshændelse som det i middel forventes i perioden frem til 2100 for to udvalgte kystpunkter i nord og syd, jf. COWI (2016).

Kote til 1.000-årshændelse	År 2015 cm (DVR90)	År 2050 cm (DVR90)	År 2100 cm (DVR90)
NORD (Nordhavn/Oceankaj)	180	205	270
SYD (Avedøre Holme)	355	380	450

I rapporten præsenterede COWI endvidere en ny højvandsstatistik for stormflodshændelser fra syd. Statistikken baserede sig på et omfattende udredningsarbejde, som rådgiveren udførte for Metroselskabet i perioden 2015-16. I beregningerne til den nye højvandsstatistik blev der anvendt rapporteringer af højvande helt tilbage fra år 1044. Fra 1044 til omkring 1700 omfattede observationerne dog udelukkende registreringer af ekstreme højvande fra Tyskland, der er videregivet som øjenvidneberetninger. Samlet viste den nye højvandsstatistik lidt højere ekstreme vandstande for de helt sjældne stormflodshændelser fra syd end andre tilgængelige statistikker. Dette blev begrundet med, at den længere tidsserie med ældre historiske observationer indeholdt forholdsvis mange meget ekstreme hændelser, som ikke kan forudses ved anvendelse af en normal fordelingsfunktion ud fra en kort tidsserie med få ekstremer.

Efter COWI's udgivelse af rapporten "Designgrundlag for beskyttelse mod oversvømmelse" (2016) bestilte Københavns Kommune i 2017 en kvalitativ vurdering af rapporten og en statistisk genberegning af stormflodsekstremer for Køge Bugt hos DMI (2017). DMI's vurdering var, at COWI's 10.000-årshændelse formentlig var for højt beregnet set ud fra hvilke vindstyrker og varigheder, der er meteorologisk mulige i området. DMI's vurdering var på dette tidspunkt, og på det daværende foreliggende datagrundlag, at en stormflod i Køge Bugt formentlig ikke kan overstige 3,5-4,1m. Genberegningen af ekstremstatistikken viste, at returnniveauerne når en mætningsgrænse, som kun medfører en lille forskel på værdien for en 1000-årshændelse og en 10.000-årshændelse. DMI anbefalede, at fremtidige modelberegninger af oversvømmelser fra stormfloder i hovedstadsområdet skulle baseres på mere detaljeret stormflodsmodellering i Køge Bugt.

I 2017 præsenterede COWI (2017) en opdatering af rapporten "Diger til beskyttelse af København", (COWI, 2013), for så vidt angår en ydre sikring mod oversvømmelse fra havet af Københavns Kommunes kyststrækning fra Femøren til Svanemøllestranden i dag og i fremtiden. Rapporten omfattede også opdaterede kurver for skadesomkostninger, udvikling i økonomisk risiko og økonomisk mest attraktivt sikringsniveau og investeringstidspunkt efter de principper, der blev brugt i COWI's rapport fra 2010. Opdateringen baserede sig på de nyeste data og statistikker fra COWI's tekniske udredning for Københavns Kommune" (COWI, 2016). Rapporten COWI (2017) indgik som bilag til den stormflodsplan, som Københavns Kommune vedtog i 2017, hvoraf det fremgik, at "Sikringsniveauet for København bør søges koordineret med det sikringsniveau, der arbejdes med hos aktører med aktiver af stor værdi". De samfundsøkonomiske analyser blev udført efter Finansministeriets dengang gældende retningslinjer.

I forhold til den geografiske placering af stormflodsbeskyttelse gennemførte NIRAS i 2017 en teknisk-økonomisk-miljømæssig undersøgelse af to overordnede digeløsninger med to forskellige sikringsniveauer for Dragør Kommune. Undersøgelsen (NIRAS, 2017) tog udgangspunkt i de eksisterende diger og stier i området, og stillede linjeføringer med et fremskudt kystdige og et tilbagetrukket kystdige over for hinanden. I "Udviklingsplan Morgendagens Dragør" fra 2021, har COWI og Arkitema udarbejdet en udviklingsplan for en samlet kystbeskyttelse i Dragør Kommune, som anviser kystbeskyttelsesløsninger frem mod 2050 og 2100, opdelt på seks delstrækninger langs kommunens 13 km kystlinje.

I rapporten "Udredning om stormflod og havvandsstigning i regi af regnvandsforum – Stormflodssikring" (COWI 2019) præsenterede COWI i 2019 konkrete tiltag og analyser til optimale sikringsniveauer samt tidsperspektiver for etablering af stormflodssikring i fem fokusområder: (1) kyststrækningen fra Ishøj Kommune til Avedøre Holme i Hvidovre, (2) det sydlige indløb til Københavns Havn, (3) Amager syd langs både Tårnby, Dragør og Københavns kystlinje, (4) Amager nord og det nordlige indløb til Københavns Havn samt (5) Øresundskysten med kystlinjen i Gentofte Kommune. Rapporten (COWI, 2019) beskriver endvidere de samfundsøkonomiske omkostninger og gevinster ved de forskellige tiltag.

Stormflodssikringsløsninger ved Kalveboderne og i Kronløbet mellem Nordhavn og den kommende Lynetteholm er også blevet undersøgt. I 2019 udarbejdede Rambøll (2019) en analyse af, hvilke stormflodskoter ved Kronløbet og hvilke portløsninger, der kan arbejdes med i en fremtidig stormflodssikring, samt hvilke muligheder der er for sammentænkning med ind i den fortsatte havnedrift og en planlagt Østlig Ringvej. Vurderingen indeholdt endvidere en perspektivering af, at det mod slutningen af dette århundrede kan være nødvendigt at have en permanent lukning af havneindløbet Kronløbet.

I forhold til stormflodssikring af Kalveboderne undersøgte Rambøll i 2020 forskellige løsninger, som skal forhindre oversvømmelser ved en stormflod fra syd. Rapporten (Rambøll, 2019) indgik som del af et modningsprojekt, der skulle kvalificere grundlaget for senere beslutninger om etablering af et fysisk kystsikringsanlæg. Arbejdet omfattede en kortlægning af oversvømmelser ved stormflodshændelser fra syd, beregnede skadesomkostninger som følge af oversvømmelserne samt en beskrivelse af stormflodssikringsløsninger med tilhørende estimat af anlægsomkostninger.

Tabel 4.2 oplister rapporter med faglig relation til stormflodssikring og analyser vedrørende ekstremhændelser, oversvømmelse og stormflodssikring af hovedstadsområdet.

Tabel 4.2. Oversigt over rapporter fra rådgivende ingeniørvirksomheder mv. med relation til stormflodssikring af hovedstadsområdet.

Udarbejdet af	Titel	Årstal	Udarbejdet for
COWI	Flooding of the Minimetro II. Minimetro Phase I, Civil Works, COWI.	1997	Ørestadsselskabet I/S
DHI	Vandstandsstatistik for Køge Havn. Teknisk notat udarbejdet af DHI for Køge Kommune.	December 2006	Køge Kommune
Rambøll	Forstærkning af Kalveboddiget	2007	Vestamager Pumpe-digelag
DHI	Vandstandsstatistik i Køge Bugt under klimaændringer. Analyse/Teknisk notat udarbejdet af DHI for Greve Forsyning.	2008	Greve Forsyning
COWI	Muligheder og konsekvenser af klimasikring af København mod oversvømmelser	Oktober 2010	Københavns Kommune
COWI	Diger til beskyttelse af København.	2013	Københavns Kommune
COWI	Designgrundlag for beskyttelse mod oversvømmelse af København. Teknisk udredning	Juni 2016	Københavns Kommune
DHI	'Second Opinion' / kommentering af rapporten "Designgrundlag for beskyttelse mod oversvømmelse af København". Kunderapport (upubl.)	2016	Københavns Kommune
DMI	Kommentering af rapporten "Designgrundlag for beskyttelse mod oversvømmelse af København" samt alternativ beregning af ekstremstatistik for stormfloder i Køge Bugt. Kunderapport	Februar 2017	Københavns Kommune

NIRAS	Stormflodssikring Dragør Kommune. Teknisk-økonomisk-miljø-mæssig undersøgelse af to overordnede digeløsninger med to forskellige sikringsniveauer	August 2017	Dragør Kommune
COWI	Stormflodsberegninger med planlagt ydre dige	2018	
COWI	Udredning om stormflod og havvandsstigning i regi af Regnvandsforum. Stormflodssikring	2 rapporter: Februar 2018 og Juni 2019	Region Hovedstaden Regnvandsforum (flere kommunale forsyninger)
Rambøll	Portløsninger i Kronløbet. Lynetteholm Perimeter	August 2019	Københavns Kommune
COWI	Muligheder for fælles sikring mod stormflod ved Amager	September 2019	Sund & Bælt
Incentive	Samfundsøkonomiske konsekvenser af stormflodssikring af Kalveboderne. Bilag 6	Juli 2020	Københavns Kommune Hvidovre Kommune
Rambøll	Stormflodssikring af Kalveboderne. Oversvømmelser og skadesomkostninger. Bilag 4	Juli 2020	Københavns Kommune Hvidovre Kommune
Smith Innovation	Sammen om vandet. Stormflodssikring ved Kalveboderne.	2020	Københavns Kommune Hvidovre Kommune
Lundgrens Incentive Rambøll	Modningsprojekt		
COWI	Stormflodssikring af Amager – Lynetteholmen. Stormflod fra syd, vand ind fra nord	August 2021	A/S Øresund
Smith Innovation	Den levende kyst - Visionsoplæg	Juni 2021	Københavns Kommune Hvidovre Kommune Tårnby Kommune Dragør Kommune
Arkitema COWI	Udviklingsplan Morgendagens Dragør	2021	Dragør Kommune

5. Ekstremhændelser

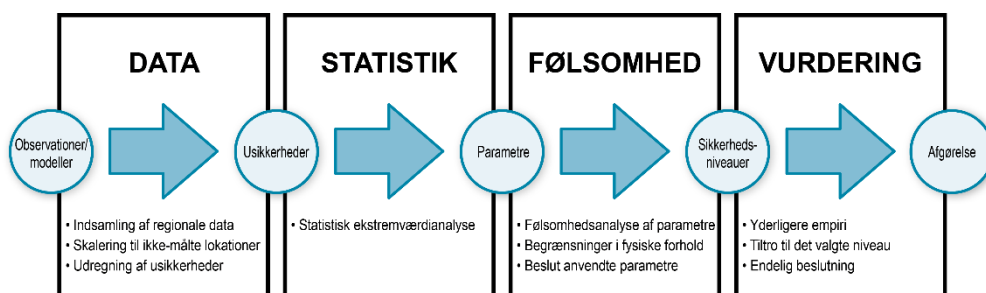
5.1 Valgt metode og rammeforståelse

Stormfloder har op gennem historien haft alvorlige konsekvenser. Viden om stormfloder og deres fysiske karakteristika er essentielle i forhold til klimatilpasning og i beskyttelse af mennesker, samfund, natur og miljø mod oversvømmelse.

Helt centralt står spørgsmålet om, hvor høj vandstanden kan blive under en stormflod ved København, og hvad det betyder for sikringsniveau(er) til at minimere skadevirkningerne af fremtidige stormfloder. Det kræver kendskab til en række faktorer omkring byen og Øresunds udformning og til de fysiske forhold, der skaber stormfloder. En del faktorer kendes ikke med sikkerhed. Man kan ikke præcist sige hvor meget vandstanden vil stige som følge af klimaforandringer, og hvordan det påvirker stormfloderne, ligesom man ikke med sikkerhed kan sige, hvordan historiske stormfloder beskriver nutidens og fremtidens klima. Det er et valg i foreliggende arbejde at anlægge det princip, at hvad der en gang er sket også kan ske igen, hvilket trods alt angiver et mindstemål for hvad man bør gardere sig imod.

Fra faglitteratur i forskellige former samt skriftlige vidnesbyrd er der kendskab til en række historiske stormfloder fra den vestlige Østersø (Sverige, Polen, Tyskland og Danmark), og der er tidligere foretaget ret omfattende statistiske analyser af ekstremvandstande med henblik på at beregne sandsynligheden for at disse eller endnu mere ekstreme hændelser indtræffer. Gængse statistiske metoder til vurdering af ekstremhændelser indeholder i sig selv usikkerheder og begrænses af datatilgængelighed og datakvalitet. Forståelsesmæssigt fastslås, at der er en øvre fysisk grænse for, hvor høj vandstanden under en stormflod kan blive.

I de følgende afsnit beskrives metoden til vurdering af den maksimale vandstand under en ekstremhændelse omkring København og de usikkerheder, der indgår.



Figur 5.1. Metodemæssig tilgang til vurdering af øvre grænse for stormflod.

Figur 5.1 skitserer metodetilgangen. Første skridt er indsamling af data. Data kan komme fra observationer og målinger, eller de kan være resultatet af modelarbejde. Derudover kan der også, inden der udføres en statistisk analyse, foretages en bearbejdning af data; for eksempel med det formål at overføre data fra en målt lokalitet, til en ikke-målt lokalitet. I andet skridt daner data, med deres tilhørende usikkerheder, som er et resultat af måleusikkerheder og de antagelser, der er blevet gjort i bearbejdningen af data, grundlaget for den statistiske analyse. På baggrund af den valgte analysemodel, opnås et sæt parametre, som skal vurderes i en følsomhedsanalyse. Følsomhedsanalysen tager hensyn til konfidensintervallet for den statistiske analyse, om parametrene beskriver forholdende meningsfyldt, og om der er overensstemmelse med øvrig viden om fysiske og meteorologiske forhold. Herefter foretages en samlet

vurdering af de vurderede maksimale vandstande, og der præsenteres en indstilling til sikringsniveauer med inddragelse af designvandstand og klimabetinget havniveaustigning, bølgepåvirkning mv.

5.2 Marine vandstandsmålere

Måling af vandstand sker i dag fra marine vandstandsmålere opsat langs kysten og typisk i havne. Der er opsat over 100 målere langs de danske kyster. Målerne foretager i dag digitale registreringer som et minuts midlet vandstand hvert 10. minut, mens der tidligere er anvendt en målefrekvens på 15-60 minutter. Før dette, dvs. indtil omkring midten af 1970'erne, blev vandstanden registreret analogt på skriveark. For denne periode er vandstanden som oftest registreret på timebasis eller man har blot optegnet den maksimale vandstanden under ekstremhændelser. Eftersom antallet af målere er kraftigt forøget over tid, er kendskabet til den tilgængelige, generelle viden om vandstande og deres variation langs kysterne vokset.

Der er foretaget systematiske registreringer af vandstande enkelte steder i løbet af 1800-tallet, bl.a. i Københavns Havn, men ellers blev de første ti målere opsat af DMI omkring 1890. Det er således over 130 års kontinuerede serier af målte (systematiske) vandstande fra blandt andet København, Gedser og Hornbæk, der giver detaljeret og robust kendskab til vandstandsvariationer, inklusive ekstremhændelser og langsigtede trends.

Eftersom stormfloder og vandstande udvikler sig forskelligt nord og syd for København, jf. nedenstående Afsnit 5.3.1, undersøges vandstande både nord og syd for hovedstaden.

Bortset fra Gedser Havn og til dels Rødbyhavn, er der sparsomt med måleserier fra den danske del af den vestlige Østersø. Køge Havn har en måleserie på omkring 60 år, men i Dragør Havn er der kun målt systematisk i lidt over ti år. Til at beskrive og relatere vandstandsforholdene til den sydlige del af København, tages der derfor udgangspunkt i målinger fra Køge- og Gedser Havn, for de perioder, hvor der foreligger danske målinger.

Idet vandstandsmålerne måler en midlet vandstand på én lokalitet, iagttages en række forhold:

- Vandstanden kan variere inden for et relativt lille område, og der kan være variation (højere/lavere vandstand) både på tværs af og på langs med kysten.
- Lokale forhold vedrørende stuvning og bølger, kan påvirke den lokale registrering af vandstanden.
- Lokale forhold som by- og havneudvikling, ændret udformning af kysten og klimatiske faktorer kan påvirke vandstande og målinger over tid.

Der kan endvidere være fejl og usikkerheder på selve målingerne, der afhænger af målertype og målerens vedligeholdelsesmæssige stand, ligesom højdereferencen for måleren ikke altid kendes (jf. fx Kystdirektoratet, 2018b). Analyser af vandstande bør tage højde for disse faktorer.

Ovenstående betyder, at hverken en historisk registreret, en systematisk målt eller en modeleret vandstand giver et eksakt udtryk for den maksimale vandstand langs kysten eller på land under en oversvømmelse, og i særdeleshed at en historisk registreret vandstand er svær at vurdere nøjagtigt i forhold til, hvis den var blevet målt som en midlet vandstand ved en målestation i dag. Data er altså upræcise i forhold til den virkelighed de skal repræsentere og er desuden ikke homogene i forhold til målemetoden.

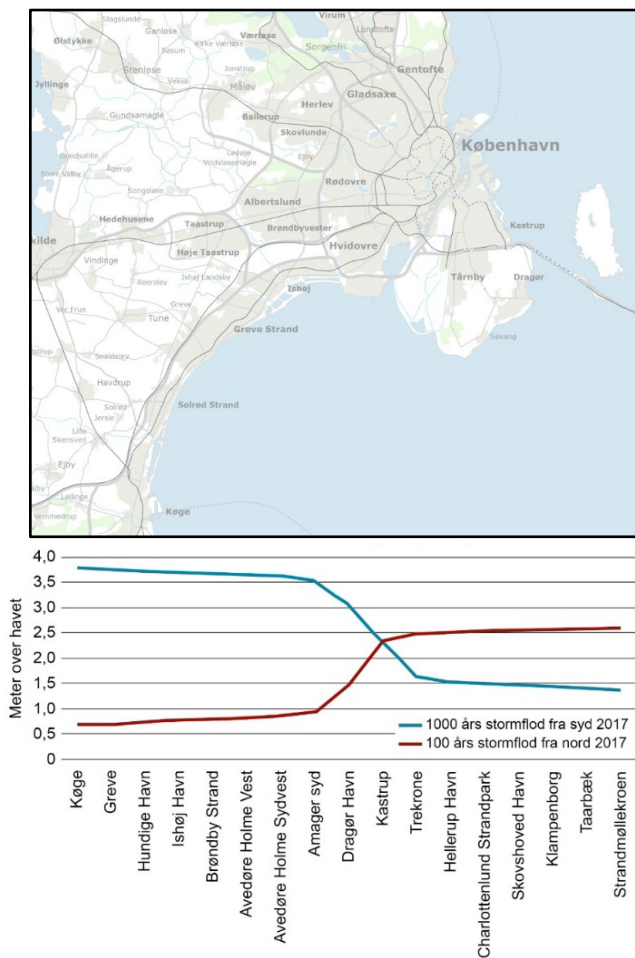
Referenceniveau for historiske og målte vandstande, og dermed også for stormflodsvandstande og statistiske analyser, er højdereferencen DVR90 med referenceår 1990, idet 0 m DVR90 antages at repræsentere middelhavniveau i 1990.

5.3 Studieområde

Undersøgelsens primære fokus er hovedstadsområdet og tilstødende vandområder i Øresund og Køge Bugt. I forhold til data og regionale analyser inddrages forhold i Kattegat og den vestlige Østersø samt tilstødende kyster.

5.3.1 Storme fra nord og syd og vandstandsgradienten

Drogden-tærsklen, med relativ lav vanddybde mellem Amager og Malmø, hæmmer og forsinket vandgennemstrømningen i Øresund, så der ofte ses en hældning, en vandstandsgradient, af vandspejlet. Ved storme fra nordlige og vestlige retninger staves vand fra Kattegat i den nordlige del af Øresund og medvirker til forhøjet vandstand i Københavns Havn, mens der ofte er lavvande syd for København (Dragør, Hvidovre mv.). Ved særlige hændelser af lang varighed, kan højvandet dog forplante sig til Køge Bugt (eksempelvis i marts 2007). Tilsvarende kan storme fra øst og syd medføre forhøjet vandstand syd for København, hvor forsinkelsen over Drogden betyder lav eller tæt på normal vandstand mod nord. Målinger og modelleringer viser, jf. Kapitel 7, at høje vandstande fra syd ikke medfører højere vandstande mod nord, end de, der kan indtræffe under stormfloder fra nord og *vice versa*. Ekstremhændelser kan derfor opdeles i stormfloder henholdsvis fra nord og fra syd og i udgangspunktet behandles individuelt statistisk. Langs kysten af hovedstadsområdet vil ses en potentiel gradient i den vurderede maksimale vandstand svarende til forskellen mellem nord og syd, dog ikke nødvendigvis lineært, som vist i Figur 5.2.



Figur 5.2. Vandstandsvariation langs Øresundskysten ved en 100-års stormflod fra nord (rød linje) og ved en 1000-års stormflod fra syd (blå). Efter COWI (2018).

5.3.2 Historiske hændelser

Langs kysterne i den vestlige Østersø, i bæltterne og Øresund er der gennem tiderne forekommet adskillige stormfloder. Kendskab til stormfloderne stammer dels fra beretninger i historiske kilder og de seneste århundreder fra registreringer af vandstand. Blandt andre Krüger (1910), Petersen & Rohde (1978) og Gram-Jensen (1991) har lavet sammenstillinger af og oversigter over stormfloder op gennem tiden baseret på omfattende kildemateriale som fx krøniker, kirkebøger, avisartikler, vandstandsregistreringer mv. Ovennævnte og andre forfatteres arbejder bygger på- og refererer til en vis grad hinandens tidligere arbejder med at give et overblik over stormflodshistorikken. Kildematerialet giver ofte et indblik i opfattelsen af stormflodernes relative styrke (fx "Den kraftigste stormflod siden...", eller "Vandet nåede næsten lige så højt som stormfloden i..."), ligesom den udløsende meteorologiske begivenheds karakter i form af vindstyrke og vindretning kan være angivet. For det danske område giver Gram-Jensen (1991) sin vurdering af både kildematerialets troværdighed (fx tvivlsom, mulig, sikker) og af stormflodens karakter (fx mindre, større, stor). Efterfølgende arbejder har under- og udbygget vidnesbyrd om specifikke hændelser med yderligere kilder (se fx COWI, 2015; COWI, 2016) og/eller vurderet potentielt skadesomfang af indtrufne hændelser ud fra tilgængeligt kildemateriale (se fx Kystdirektoratet, 2011).

I forhold til de indtrufne og/eller oplevede vandstande under stormfloder findes målinger fra Travemünde siden 1826 – idet der dog også fra tidligere stormfloder enten er berettet om vandstandshøjder i kilderne eller opført "stormflodssten" på bygninger eller i landskabet til minde om stormfloden i både Danmark og Tyskland. For stormfloden i november 1872 gælder specifikt, at der blev foretaget samtidige videnskabelige studier (Baensch, 1875; Colding, 1881), og hændelsen generelt kan betragtes som velbeskrevet i forhold til vejr- og vandstandsforhold.

De seneste årtier har en række arbejder vurderet hændelser og indtrufne vandstande i Østersøen tilbage i tiden (til år 1044) til brug i statistisk arbejde og som designgrundlag for kystbeskyttelse (COWI, 1997, 2016; DHI, 2006; Jensen & Müller-Navarra, 2008; Jensen & Töppe, 1986, 1990; Jensen et al, 2022; Mudersbach & Jensen, 2009 a,b m.fl.). I nyere studier foretages ofte revurdering af vandstande og af metoder for udvælgelse af ekstreme hændelser, og der sker en "konsolidering" af målte/registrerede/vurderede stormflodshøjder gennem modelleringer for de tyske og danske kyster. En sammenstilling af lister udviser nogen variation mellem de indgående hændelser – og evt. tilhørende vandstande, der primært beror på de metodemæssige tilgange og herunder, hvor kraftige de enkelte stormfloder er vurderet til at have været, kildernes troværdighed mv., samt kildernes geografiske tilhørsforhold. Her kan der til lige på forskellig vis være foretaget oversættelse af en vandstand fra Tyskland til at repræsentere danske forhold (fx i Køge).

Når fx MacPherson et al. (2023, Tabel 1) omtaler historiske målinger (eng.: historic measurements) er det væsentligt at forstå, at termen dækker over en lang række oprindelige kilder, der ikke nødvendigvis indeholder oplysninger om en aktuel vandstand samt, hvis de gør, at denne kan være omgærdet af stor usikkerhed. Den ældste kilde vedrører en stormflod i år 1044 og stammer fra en krønike nedskrevet 1200-tallet. I forhold til denne hændelse er der i tidligere arbejder således foretaget en vurdering af stormflodens voldsomhed med en vandstand i Tyskland på 210-230 cm (jf. Mudersbach og Jensen, 2009), >250 cm (Jensen et al. 2022) og i Danmark på 270 cm og 343 cm (jf. COWI, 2016). Der er altså stor variation i angivelserne, også selv om vandstandene er relateret og korrigeret i forhold til forskellige højdesystemer - især taget i betragtning af, at kilden ikke har information om vandstand. For 1044-hændelsen, som for flere senere hændelser, er der fx lavet antagelser om, at hændelsen har haft et vist niveau (Jensen et al 2022 anvender >250 cm) for at være nedskrevet (i kirkebøger mv). Der

findes ikke et fuldt overblik over stormflodshændelser og et udvalg af de nok kraftigste medtages i de forskellige studier. Flere både danske og tyske studier redegør egentlig grundigt for anvendt metode og forudsætninger for beregninger, idet disse dog ofte "glemmes" og/eller for-simples i den videre bearbejdning og formidling. Eksempelvis præsenteres stormflodshændelser frem til 1600-tallet som baseret på tyske øjenvidneskildringer i COWI (1997, 2016). Her kan det kildekritisk anfægtes, om en beretning i en kirkebog, om end det kan være en pålidelig kilde, er at betragte som en øjenvidneskildring. I vurderingen bør også indgå, jf. ovenstående, om en decideret øjenvidneskildring er samtidig, eller om vidnet har nedfældet sin beretning mange år efter hændelsen.

Vedrørende det tyske område findes enkelte hændelser helt tilbage fra 1300-tallet med angivelse af vandstand fra en eller flere lokaliteter, mens dette først er tilfældet for Danmark i 1700-tallet. Der er et naturligt sammenfald mellem hændelser langs de danske og de tyske kyster, hvor forskellige metoder har fundet anvendelse til at overføre vandstande fra en lokalitet til en anden; bl.a. baseret på information om vind og meteorologiske forhold. Der er dog stor metodemæssig usikkerhed på angivne vandstande. Specifikt for en stormflod i Køge Bugt/København i 1760 (COWI, 2016; Gram-Jensen, 1991; DMI, 2017) gælder, at dens rapporterede vandstand på over 350 cm i samtidige kilder synes kraftigt overdrevet – og/eller umulig at verificere. Stormfloden er ikke at finde i tyske oversigter (hvilket potentielt kan forklares ved særlige meteorologiske forhold), men en så kraftig hændelse burde give omfattende oversvømmelser regionalt, hvilket der ikke eksisterer vidnesbyrd om. At der har været østenstorm over det danske område vidner blandt andet en samtidig avisartikel om (Københavnske danske post-tidender, 1760), der rapporterer om skader på og forlis af skibe ved Århus, men ikke anfører vandstande tilhørende hændelsen. Der findes dog flere kilder, der beskriver stormfloden end de ovenfor angivne.

For denne hændelse som for mange øvrige gælder, at validiteten af en rapporteret vandstand er omgivet af usikkerhed – både i forhold til lokale forhold (jf. fx DMI, 2012; Petersen, 1924), kildens troværdighed (jf. fx Gram-Jensen, 1991), og at den desuden afhænger af metodemæssige tilgange i udvælgelse og analyser.

Det er dog uomtvisteligt, at danske og tyske kyster gennem tiden er ramt af mange og kraftige stormfloder. 1872-stormfloden betragtes generelt i både Danmark og Tyskland (og Sverige) som den kraftigste stormflod de seneste 1000 år (idet der dog på enkelte lokaliteter i Tyskland har været andre hændelser, hvor vandstanden vurderes at have overgået 1872-hændelsen). Fra studier af strandvoldssystemet Feddets (ved Præstø) 4000-årige udvikling ses ikke spor af stormfloder, der har haft større indvirkning end 1872-stormfloden (Clemmensen et al, 2014). Jensen et al (2022) vurderer ud fra deres metodemæssige tilgang, at flere af de historiske hændelser har medført vandstande, der er sammenlignelige med 1872-hændelsen med en i størrelsesordenen 10-50 cm lavere vandstand end i 1872.

I vurderingen af historiske vandstande indgår, udover ovennævnte usikkerheder og metodemæssige valg, det valgte referenceniveau, samt i hvilken form vandstanden anvendes i analyser. To afgørende faktorer er ændringer i middelhavniveau tilbage i tid (jf. fx Jensen et al, 2022, Madsen et al, 2019) og den anvendte højdereference. Her er der gennem tid anvendt forskellige tal for udvikling i middelhavniveau, ligesom der i Danmark har været anvendt forskellige højdereferencesystemer, der kan besværliggøre en direkte sammenligning af indtrufne vandstande i litteraturen. Denne problematik kan man dog korrigerer for ved at udtrykke, hvor meget en given vandstand overstiger middelhavniveauet på det tidspunkt, hvor den indtraf. Sådanne korrigerede vandstande kaldes "trendfri".

Endelig kan anvendte metoder til analyse og i modellering give forskellige tal for den maksimale vandstand under en given hændelse.

For 1872-stormfloden findes i litteraturen forskellige angivelser af maksimalvandstanden i Køge: I Coldings (1881) arbejde findes følgende angivelse for Køge: En punktangivelse på 9 fod (2,83 m); en isolinje-optegning (kort over hele regionen), hvor Køge kan aflæses til ca. 8 ¼ fod (2,59 m), og to tidsserier med kurver for vandstand i Køge på henholdsvis 8 ¼ fod (2,59 m) og 9 ½ fod (2,98 m). Det er uklart, hvad hver af disse to kurver repræsenterer. Det er formentlig to målepositioner, da dette genfindes ved enkelte andre lokaliteter (fx Kramnitz: a) Østersø, b) Rødby Fjord), men hvilke to vides ikke (Omregning fra fod til meter er strengt taget: 1 fod = 0,313854 m, idet meget ældre litteratur dog anvender 0,3139 m, og den senere ved lov bestemte er 0,314 m).

Petersen (1924) anvender 8,25 fod (2,59 m), mens senere studier anvender 2,80 eller 2,86 m (DHI, 2006; COWI, 2016a; Kystdirektoratet, 2011), hvoraf sidstnævnte tal er i DVR90. Modelerede vandstande baseret på meteorologiske forhold og/eller 'oversættelser' af vandstande fra det tyske område opnår typisk vandstande på mellem 2,5-2,9 m afhængigt af metoden. Det er således ikke ukompliceret at angive den "korrekte" vandstand eller opnå fuldstændig overensstemmelse mellem forskellige studier. Centrale angivelser for historiske hændelser vil have indflydelse på analyseresultater og en efterfølgende evaluering. De 2,59 m kan måske anses som et centralt estimat for den reelt indtrufne vandstand i Køge i forhold til, hvis den var målt ved en vandstandsmåler i dag. I det videre arbejde tages dog udgangspunkt i de 2,86 m DVR90, idet denne værdi er den der oftest er anvendt i litteraturen, og fordi den tilgodeser usikkerheden på angivelsen af den indtrufne vandstand i 1872. I forhold til modeller mv. vil andre vandstande forekomme fx med baggrund i forskellige modelopsætninger, typer og meteorologisk input.

Målinger af vandstande i Danmark gennem de seneste 130 år tegner et godt men ikke fyldestgørende billede af ekstreme hændelser. Stormfloder syd for København indtraf blandt andet i 1904, 1913 og 1941 (og en del flere tilfælde, også siden 1913) og kendes fra kilder, men er pga. målerudfald dårligt repræsenteret i målinger fra Gedser Havn. I perioder af 1700- og 1800-tallet målt vandstande i Københavns Havn, og COWI (2016a,b) undersøgte, om hændelser kunne henføres til nordfra eller sydfra kommende stormfloder grundet at byen den gang var anderledes udformet. Stormfloder fra nord forud for vandstandsmålinger i Københavns Havn og Hornbæk Havn (dvs. før 1890) er beskrevet i litteraturen (Colding, 1881). Der er imidlertid mangelfulde eller ingen beskrivelser af vandstande, der overgår de indtrufne under stormfloden i december 2013 (Stormen Bodil). Det bør dog nævnes, at der har været flere stormflodshændelser fra nord, hvor vandstandene har været på niveau med – eller endda lidt over (Bodil) – fx under julestormen 1902, hvor vandstandsmåleren gik i stykker i København. Registreringer fra Københavns Havn alene vurderes derfor at udgøre det bedste analysegrundlag for vurdering af maksimale vandstande ved stormfloder fra nord. Det bemærkes, at vandstandsmåleren over flere omgange er blevet flyttet siden 1890, at København og havnen har udviklet sig i perioden, samt at målefrekvens og målemetode løbende har ændret sig, hvilket betyder, at dataserien ikke er fuldstændig homogen.

Stormfloder fra syd er således relativt bedre beskrevet i litteraturen fra både det danske og tyske område. Det afspejler dels at Østersøen udgør en større risiko for stormflod end Kattegat, og dels byudvikling og samhandel i Østersøen historisk set. Målinger fra Travemünde på den tyske Østersøkyst går tilbage til 1826 (Jensen & Töppe, 1990), mens kilder og nedskrevne beretninger om stormfloder kan dateres tilbage til 1200-tallet (fx Mudersbach & Jensen, 2009). Hverken for det tyske eller det danske område findes sikre vidnesbyrd om hændelser, der i voldsomhed med hensyn til vandstand har nået eller overgået stormfloden i 1872. Der er usikkerhed om præcisionen af historiske vidnesbyrd om stormfloder, der ligger før den systematiske serie fra Travemünde. Det vurderes, at inddragelsen af disse vidnesbyrd ikke giver et troværdigt bidrag til statistisk analyse, når de står alene (idet tidligere statistiske arbejder, der in-

deholder historiske vandstande, indgår i vurderingerne). De historiske hændelser, der er inddraget i nærværende analyse, tager derfor udgangspunkt i målinger fra i Travemünde i perioden fra 1826 frem til 1960, hvorefter data fra Køge Havn indgår.

Tabel 5.1 viser de årstal og vandstande fra Travemünde (Tyskland), der indgår i den videre analyse.

Tabel 5.1. Stormflodsvandstande målt i Travemünde, der er anvendt i analysen.

Dato	Vandstand i Travemünde (cm)
15/16-01-1867	181
29/30-12-1867	197
13-11-1872	340
24/25-11-1890	210
19/20-11-1893	167
24/25-03-1898	172
30/31-12-1904	222
09-01-1908	196
10-01-1914	200
09-02-1936	220
27/28-12-1941	170

5.4 Statistiske beregninger

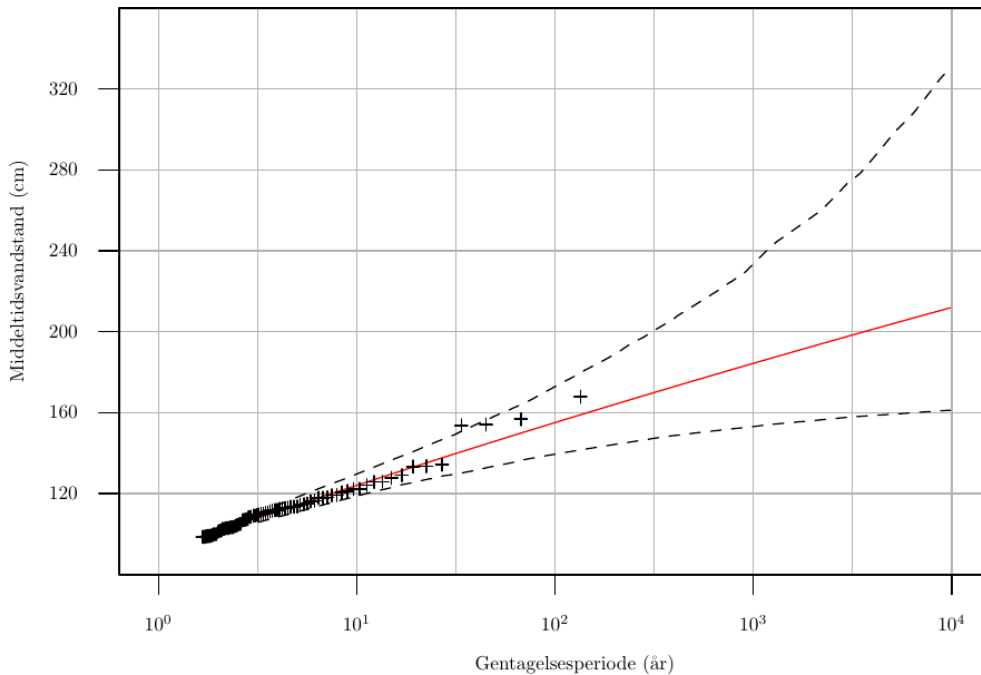
Ved brug af en statistisk ekstremværdianalyse kan man til en vis grad udtale sig om tidsrum, der er længere end perioden med måledata eller rapporter, og om sandsynligheden for at opnå værdier, der er højere end hidtil registreret. Det bør dog bemærkes, at jo længere man strækker analysen ud over datagrundlaget, jo mere usikkert bliver resultatet, men man får i det mindste et estimat, og dermed et beslutningsgrundlag.

I den statistiske analyse tages udgangspunkt i en Peak-Over-Threshold (POT) metode, hvor fordelingen af ekstremer, der overstiger en estimeret tærskelværdi, beskrives ved en Generalized Pareto Distribution (GPD) (Coles, 2001). Eftersom Drogden udgør en tærskel, hvor stormfloder hhv. nord og syd for Drogden ikke nødvendigvis har hverken samme årsag eller hændelsesforløb, anses det for nødvendigt at udføre separate analyser for de to områder (jf. gennemgangen i Afsnit 5.3.1). Analysen nord for Drogden er baseret på den 130 år lange måleserie fra Københavns Havn (1890-2022), mens analysen syd for Drogden er baseret på måleserien fra Køge, der blev påbegyndt i 1955 og den historiske måleserie fra Travemünde der blev påbegyndt i 1826, jf. Afsnit 5.3.2.

5.4.1 Området nord for Drogden

Resultatet af ekstremværdianalysen af området nord for Drogden ses af Figur 5.6, hvor middeltidshændelserne er indtegnet som funktion af gentagelsesperioden på baggrund af en GPD, med parametrene $\mu = 98$, $\sigma = -14,5$ og $\xi = 0,025$, som er bestemt ved Maximum Likelihood Estimation. Resultatet af analysen giver, at en gentagelsesperiode på 1000 år har en middeltidshændelse på 184 cm. De 184 cm er angivet som en trendfri vandstand relateret til middelhavniveauet i 1990 (DVR90).

Metoden viser god overensstemmelse med tidligere udførte statistiske beregninger af rådgivende ingeniørvirksomheder. Ændringer i byens/havnens udformning samt flytning af vandstandsmåleren og ændring i målefrekvens over perioden kan have betydning for resultaterne, men overordnet vurderes datagrundlaget for statistikken at være robust. På denne baggrund vurderes at beregning af en 1000-års hændelse er "på grænsen af", hvad de statistiske beregninger tillader. Statistisk beregning af større gentagelsesperioder medfører ikke markant højere vandstande, mens usikkerhedsspændet øges markant.



Figur 5.3: Sammenhæng mellem vandstand og gentagelsesperiode. Den røde linje viser middeltidshændelser som funktion af gentagelsesperioden for Københavns Havn på baggrund af en ekstremværdianalyse, hvor den anvendte fordelingsfunktion er GPD med en tærskelværdi på 98 cm. Prikkerne repræsenterer de målte vandstande korigeret for havniveaustigning og landbevægelse (trendfri), de stiplede linjer angiver 95 % konfidensintervallet.

5.4.2 Området syd for Drogden

Til analysen med inddragelse af historiske hændelser er anvendt Bayesian Marchow Chain Monte Carlo (Bayesian MCMC), som beskrevet i (Gaume et. al 2010), fortsat med en POT-metode og GPD-fordelingsfunktion (Su et al, in prep.). Med Bayesian MCMC metoden genereres et stort udvalg af de tre parametre (lokation (μ), skala (σ) og form (ξ)) hørende til GPD'en, hvorved GPD'en svarende til den aktuelle fordeling af vandstande fastlægges med tilhørende konfidensinterval.

Analysen afhænger af følgende valg:

- **Udvælgelse af historiske data:** Hvilke historiske vidnesbyrd skal medtages i analysen?
- **Fastsættelse af længden på den historiske periode:** Længden af den tidsperiode, som de historiske data er indsamlet over. Denne periode kan godt være længere end tidsspændet mellem den ældste og den yngste måling.
- **En model til oversættelse af vandstande fra observationsområdet til studieområdet**
- **Valg af tærskelværdi for systematiske data:** Et afskæringsniveau, hvor kun hændelser med vandstande over dette niveau medtages i analysen.

- **Valg af tærskelværdi for historiske data:** Et antaget vandstands niveau, hvorunder det ikke forventes, at vandstande vil blive overleveret i de historiske kilder.

Det historiske datasæt er udvalgt til at være måleserien fra Travemünde som beskrevet i Afsnit 5.3. Denne måleserie startede i 1826, og vandstande fra Køge er målt fra 1955, så længden af den historiske periode sættes til 129 år.

De indgående historiske, systematisk registrerede data fra Travemünde er ikke homogene og repræsenterer ganske givet ikke en hyppigt midlet vandstand, hvorfor man også må forholde sig til bølgetillæg og lignende. Eftersom de historiske data i analysen stammer fra Travemünde, skal de "oversættes" til vandstande i Køge (Køge Bugt).

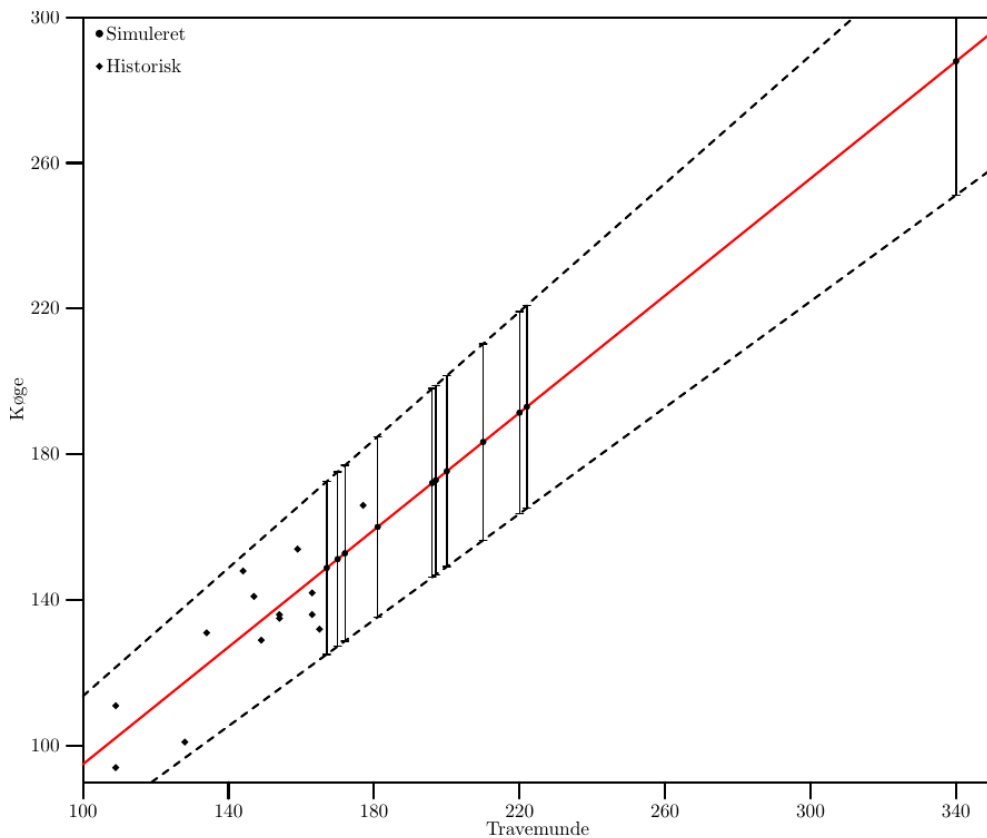
Stormene, der forårsager stormfloder i den vestlige Østersø kan overordnet deles i to: type 1 er mest almindelig og forårsages af lavtryk fra Atlanterhavet, der bevæger sig mod øst, og, type 2, der har et højtryk over det nordlige Skandinavien og et lavtryk, der samtidig bevæger sig fra syd mod nord over Centraleuropa. I realiteten er det altså to forskellige fysiske procesforløb, der leder til stormflod, idet det dog ikke umiddelbart er muligt at adskille dem i to fordelinger.

I perioden fra 1904 til i dag er der fra området i den sydvestlige Østersø rapporteret et antal stormfloder, hvor vind- og lufttrykforhold har været tilstrækkeligt kendt til, at man har kunnet beskrive lavtrykkets bane og til, at det har været muligt at modellere vandstandens udvikling i hele området. Hertil er benyttet DMI's operationelle stormflodsmodel, som beregner havets cirkulation i hele Nordsø-Østersø regionen, som funktion af vind- og trykfordeling samt eventuelt tidevand.

På den baggrund har det været muligt at modellere vandstandene for disse storme i hhv. Travemünde og Køge. Modellen der er anvendt er HIROMB-BOOS modellen (HBM) (Berg og Poulsen, 2012). I Figur 5.4 repræsenterer diamanterne sådanne modellerede vandstande.

Som det fremgår af Figuren er der tilnærmelsesvis lineær sammenhæng mellem vandstanden i Travemünde og vandstanden i Køge. x -koordinatet for de fyldte cirkler er alle målte (ikke-modellerede) fra den lange og systematisk målte dataserie siden 1826, og y -koordinatet beregnet på baggrund af tendenslinjen med ligningen:

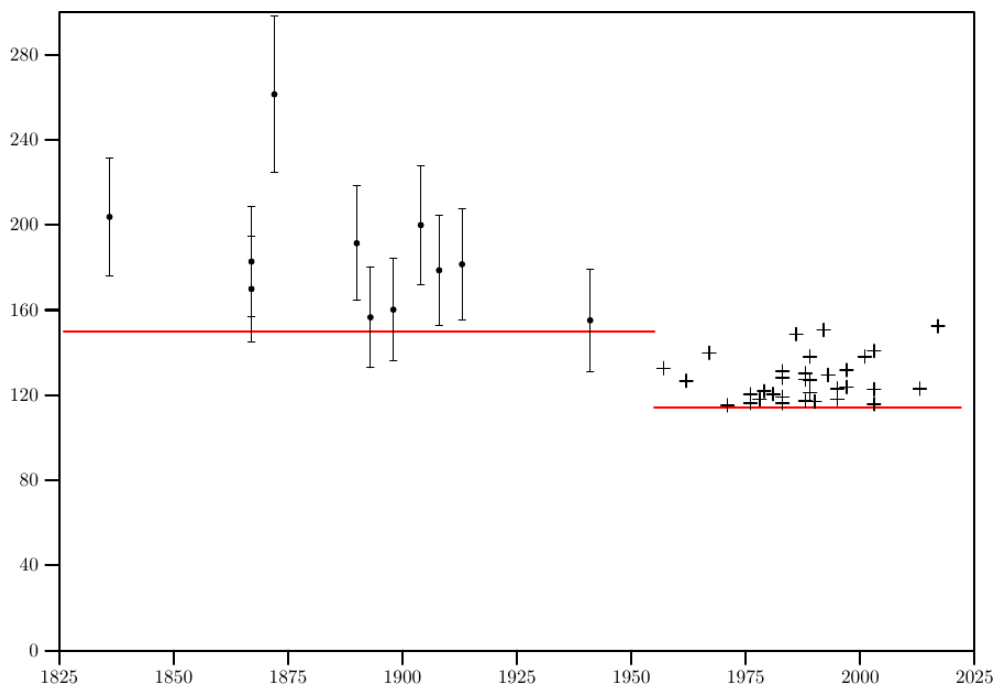
$$y = 0,804x + 14,54 \text{ cm.}$$



Figur 5.4. Modelleret sammenhæng mellem vandstande i Travemünde og Køge. ♦ viser vandstande modelleret på baggrund af storme af type 2 i hhv. Travemünde og Køge. ● viser historisk beskrevne vandstande i Travemünde oversat til vandstande i Køge på baggrund af den lineære sammenhæng, der antages af de modellerede vandstande.

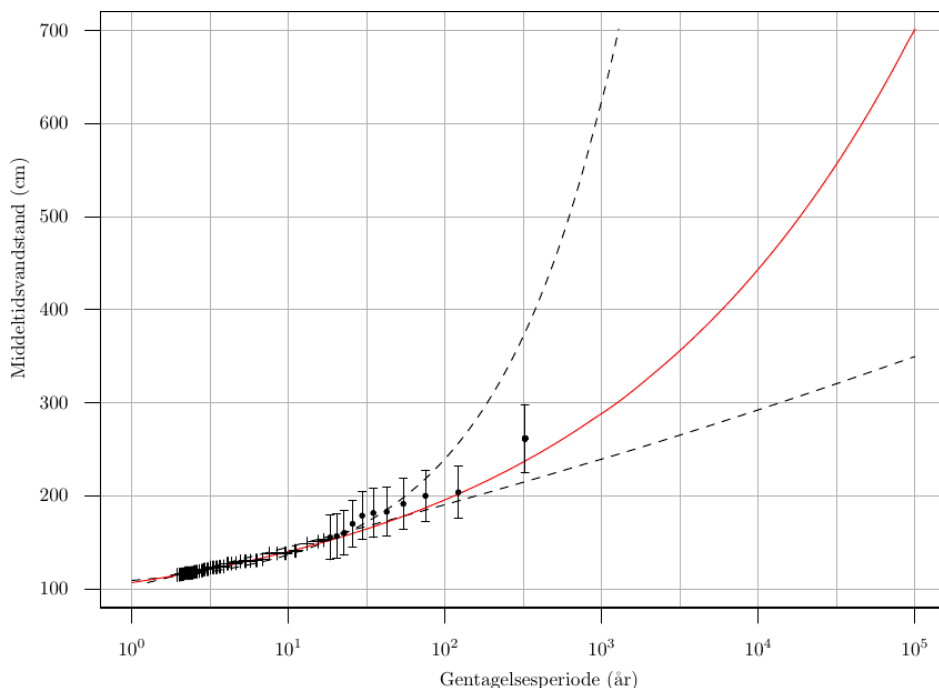
I Figur 5.4 indgår også vandstanden for 1872-hændelsen, men de meteorologiske forhold under 1872 var anderledes end dem som den lineære fremskrivning i Figur 5.4 betinges af. Derfor er der i den statistiske analyse anvendt en modelleret (på baggrund af de velbeskrevne meteorologiske forhold under 1872-hændelsen) værdi på 252 cm for stormfloden i 1872.

De systematiske data indeholder alle vurderede ekstremer over en tærskelværdi 114 cm, hvorimod den historiske dataserie, der kun medtager stormflodsforløb af type 2, kun indeholder de mest ekstreme ekstremer, jf. Figur 5.5. Der tages således højde for, at tærskelværdien for den historiske dataserie er højere end for den systematiske dataserie. Tærskelværdien for den historiske dataserie sættes til 150 cm, hvilket svarer til vandstanden af den laveste måling inklusive usikkerhed.



Figur 5.5. Historisk optegnede og systematisk målte vandstande. Vandstande er indtegnet i det år, de indtræffer. Røde linjer indikerer forskellige tærskelværdier for hhv. de historisk optegnede og de systematisk målte vandstande; jf. tekst for yderligere forklaring.

Resultatet af analysen er illustreret ved den røde linje i Figur 5.6, der angiver middeltidshændelsen som funktion af gentagelsesperioden. De stiplede linjer markerer [5 %; 95 %] konfidensintervallet. Tærskelværdien for de systematiske data er sat til 114 cm, 150 cm for de historiske (svarende til den laveste værdi i dataserien) og længden af den historiske periode er sat til 129 år (1826-1955). Herved opnås en fordelingsfunktion med parametrene $\mu = 115$, $\sigma = 12,9$ og $\xi = -0,22$, hvilket giver en middeltidshændelse på 288 cm for en gentagelsesperiode på 1000 år. Nogle af de ofte anvendte gentagelsesperioder med dertilhørende middeltidsvandstande er oplistet i Tabel 5.3.



Figur 5.6. Bayesian MCMC analyse. Den røde kurve viser middeltidsvandstanden som funktion af gentagelsesperioden udregnet ved en historisk periode på 129 år og en historisk tærskelværdi på 150 cm. Tærskelværdien for de systematiske data (+) er 114 cm. De stiplede linjer angiver hhv. 5 % og 95 % konfidensgrænse.

5.4.3 Konklusion på analysen

Analysen resulterer i et estimat for 1000-års hændelsen fra hhv. syd og nord, som angivet i Tabel 5.2.

Tabel 5.2. Middeltidsvandstande for en 1000-årshændelse hhv. fra nord og fra syd.

	Nord	Syd
Middeltidsvandstand (cm)	184	288

I analysen syd for Drogden, opnås en negativ formlparameter på $-0,23$ (kurven i Figur 5.6 "bøjer" opad"). Rent matematisk har en negativ formlparameter den konsekvens for fordelingsfunktionen, at den ikke konvergerer mod en øvre grænse for middeltidsvandstandene, hvilket også tydeligt fremgår af Figur 5.6, hvor den røde kurve blot bliver stejlere med en voksende gentagelsesperiode. Sagt med andre ord kan vandstanden blive uendeligt høj, hvis blot man vælger gentagelsesperioder der er lange nok. Analysens formål er at finde den mest ekstreme vandstand, der kan forekomme i området. Men i henhold til den statistiske analyse må det konkluderes, at der ikke er nogen øvre grænse for ekstreme vandstande. En sådan øvre grænse kan på baggrund af den statistiske analyse kun opnås ved at vælge et arbitrært maksimum for gentagelsesperioden (10.000 år har normalt været benyttet) som målet for de mest ekstreme hændelser. Metoden er således ikke egnet til at beskrive de mest ekstreme vandstande.

Området nord for Drogden har ganske vist en svagt positiv formlparameter på $0,025$, men da usikkerhederne allerede ved en 1000-års gentagelsesperiode er betydelige, såvel for analysen af området nord som syd for Drogden, vurderes den statistiske analyse ikke at have gyldighed for hændelser, der er sjældnere end 1000-årshændelser. Det konkluderes derfor, at den øvre

grænse for vandstanden ved en ekstremhændelse ikke kan bestemmes ud fra en statistisk analyse alene, men må vurderes i tilknytning til viden om fysiske og meteorologiske forhold i området.

5.5 Fysiske begrænsninger for ekstremhændelser i Køge Bugt og Øresund

Der er grundlæggende tre fænomener, der kan give anledning eller bidrage til forhøjet vandstand i den vestlige Østersø herunder Køge Bugt:

1. Lavtryksvejr
2. Højtryksvejr
3. Forhøjet vandstand i hele Østersøen

Både lavtryksvejr og højtryksvejr kan være associeret med vindretninger, der omfordeler Østersøens vandmasser fra øst mod vest. Kritiske vindretninger er østenvind over den sydlige Østersø, og/eller nordenvind over den østlige del af Østersøen. Den geografiske placering og forskydning af trykssystemet afgør, om en sådan vindretning forekommer og med hvilken varighed og styrke. Lavtryksvejr er som regel kortvarige 'passager' ("vandrende lavtryk"), oftest fra vest mod øst. Højtryksvejr kan være stabilt over længere tid. Hvor alvorlig en hændelse bliver ved en given vindstyrke, er kraftigt afhængigt af de præcise vindretninger.

Under et sådant østligt vejrforløb mister Østersøen vand ved udstrømning gennem de danske bæltter og Øresund. Over tid vil den mængde vand, der er til rådighed, således aftage. Modsat, stiger Østersøens middelvandstand ved kraftig vestenvind i en længerevarende periode. Middelvandstanden er godt repræsenteret ved døgnmidler af vandstand observeret i Stockholm siden 1774, først ugentligt, siden dagligt, og siden 1889 tilgængelige som timedata fra SMHI (<https://www.smhi.se/data/oceanografi/ladda-ner-oceanografiska-observationer>; Ekman, 2003). Ud fra disse 133 års data (1889-2022) ligger det totale udsving fra [-0,65; +1,02] m. Det stemmer fint med den erfaringsmæssige variation på ca. +/- 0,75 m, idet ekstreme højvande (over 0,75 m, skabt af kraftige vestenstorme) kun forekommer i 12 dage, altså sjældnere end hvert 10. år.

De fleste stormfloder i den vestlige Østersø skyldes et enkelt lavtryksystem (1) i kombination med forhøjet middelvandstand (3). Lavtrykkets bane ligger ofte sådan, at der trækkes vand ind i Østersøen i en periode, inden vinden slår om i øst. Modsat er stormflod ved et højtrykssystem (2) mere sjældent. Dels befordrer højtrykkets stabile placering ikke en sådan forudgående øgning af vandmængden, og dels er vinden associeret med et højtrykssystem svagere end ved et lavtrykssystem.

Sjældent forekommende ses to trykssystemer, et lav- og et højtrykssystem (1+2), på en måde, så deres associerede vindfelter forstærker hinanden. Dette forekom under stormfloden i 1872. Et lavtryk bevægede sig fra et område omkring de østlige Alper nordpå til en placering over det nordlige Tyskland samtidig med, at et stabilt højtryk over Midtsverige blokerede for en forskydning videre nordpå. Forløbet gav anledning til en kraftig østenstorm og stormflod i den vestlige Østersø med vandstande, der ligger markant over, hvad der siden er observeret. Middelvandstanden i Østersøen ved den lejlighed var ikke markant forhøjet (ca. +0,1 m iht. Col-ding, 1881), men også vandstands niveauer i spændet 0,2-0,3 m ses, afhængigt af dato under begivenheden.

Der kan have været tidligere hændelser i historisk tid af lignende omfang, men det er som tidligere nævnt ikke veldokumenteret, og i overleveringer skiller 1872 sig ud som en katastrofe. Der er dokumenteret hændelser før 1872 af "middel-kaliber", dvs. højere end de sidste 150 år,

men dog stadig lavere end 1872-hændelsen. Dokumentationen af vandstande stammer fortrinsvis fra tyske kystbyer, men der er også fra det danske område vidnesbyrd om oversvømmelser.

Det tyder på, at 1872-stormfloden ikke er langt fra at være den i praksis højest opnåelige vandstand forårsaget af vind og vejr. Denne type hændelse (1+2) kan betragtes som dimensionerende for stormfloder i den vestlige Østersø, og har mange steder været det for kystbeskyttelsen. Et væsentligt spørgsmål er: Hvordan ser en "1872+ -hændelse" ud?

For det første: Dette forløb er inkompatibelt med markant forhøjet middelvandstand i Østersøen. Det stabile højtryk modarbejder en sådan tænkt situation. Vi udelukker dermed kombinationen (1+2+3). Det er dog vurderet i det foreliggende arbejde at en lettere forhøjet vandstand er fysisk mulig. Det vil sige en middelvandstand i Østersøen med et tillæg på +0,28 m ved Køge, som er vurderet ud fra modelleringeksperimenter af Andrée et al (2023, Tabel 1 (FL2)) som det mest realistiske af de, i dette studie, benyttede forceringer til brug for bestemmelse af et fysisk maksimum ved det foreliggende videnskabelige grundlag. I Andrée et al. (2023) vurderes også hændelsesforekomsten for forskellige fyldningsgrader i Østersøen, og en højere fyldningsgrad kombineret med forhold som svarer til "den perfekte storm" som i 1872 må anses for urealistiske. I en statistisk tilgang for sammenfaldende hændelser multipliceres hver enkelthændelses individuelle sandsynlighed (korrigeret for evt. indbyrdes korrelation, positiv såvel som negativ og evt. med sæsonvariationer). Dvs. at for ekstreme sjældne enkeltstående hændelser, vil den kombinerede hændelse fremstå ekstremt usandsynlig (to ikke-korrigerede 100-årshændelser vil, ved denne tilgang, have en kombineret 10000-årsfrekvens).

For det andet: Stormens varighed. Modellsimuleringer har sandsynliggjort, at for en given vindstyrke opnås ret hurtigt, dvs. i løbet af 12-24 timer, en balance mellem vindens træk og vandspejlets hældning, så vandstanden ikke stiger yderligere (Andrée et al. 2022). Når vinden først har nået sit maksimum (og det skal ses som den samlede effekt over Østersøens overflade), stabiliseres vandstandsgradienten ret hurtigt. Tværtimod vil Østersøen langsomt begynde at blive drænet for vand, som beskrevet ovenfor. Man får således ikke en højere vandstand på kysten ved en længere varighed. Man får til gengæld større skadevirkninger inde i landet ved en oversvømmelse til en given vandstand, jo længere tid stormen varer. Dette forhold, altså udbredelsen ind i landet, er dog ikke en del af modelarbejdet i de her nævnte simuleringer, som kun omfatter de åbne farvande.

Tilbage er for det tredje: Stormens styrke. Under tiltagende vind fra øst bliver vandstanden ved med at stige, og det centrale spørgsmål bliver dermed i hvor høj grad, endnu højere vindstyrke er mulig i en lignende situation. Ligesom for Østersøens middelvandstand må det antages, at vi ikke har set det absolutte maksimum, men at det ikke er langt fra.

Her er det værd at bemærke, at i modelarbejder baseret på numeriske simuleringer ved brug af en regional klimamodel er der ikke konstateret storme, hvor forholdene kom i nærheden af 1872 hvad angår vindretning, vindstyrker og varighed. Coldings (1881) arbejde rapporterer en højeste (middel)vindhastighed på 85 fod/s = 26,6 m/sek. Colding argumenterer for, at den højeste vind har været 7 % større end det, dvs. 28,6 m/sek. Dette ligger lige på grænsen mellem Beaufort 10 og Beaufort 11. Lægger vi 10 % til det, fås en vindhastighed på 31,5 m/sek., hvilket stadig er vindstyrke 11, men lige under orkanstyrke. Det skal tilføjes at de resulterende stormflodsniveauer er afhængige, ikke kun af vindstyrke men også af varighed (samt selvfølgelig vindretning). Hvad angår varigheden, giver det derfor ikke mening at snakke om maksimalvinde alene, men derimod middelvinde over perioder på 12-24 timer (Andrée et al. 2022), samt ligeledes vindens udbredelse over det areal hvorfra vandmasserne skal flyttes. Ved Ellerbeck, tæt på Kiel, målttes også 30,7 m/s i time-middelvind.

Det er også værd at bemærke, at det samme modelarbejde resulterer i nordenstorme over Kattegat af typen Bodil (december 2013), som fører til højere vandstande end hidtil målt i Hornbæk (ca. 130 år). Modellerne er fuldt ud i stand til at generere storme, der er kraftigere end vi hidtil har set. Desuden har flere stormflodsmodeller genskabt 1872-stormfloden ved brug af rekonstruerede atmosfæriske forhold.

Vurderet på det foreliggende grundlag, og for de her forelagte varigheder og geografiske områder, vurderes en øgning af vindstyrken på 10 % i forhold til 1872 som en passende størrelsesorden for et fysisk maksimum. Yderligere studier af historiske hændelser og af de fysiske forhold kan bidrage til, med større sikkerhed, at vurdere om yderligere forøgelser af vindstyrke er realistiske. Ved en 10 % forøgelse i fht 1872 når de kraftigste vinde op omkring orkanstyrke, uden dog at nå vindstyrker associeret med tropiske orkaner. Denne forøgelse forøger, jf. modelstudier, vandstanden ved Køge med 0,54 m (Andrée et al, 2023 - Figur 7 interpoleret for Køge med amplifikationsfaktor 1,1). Andrée et al. (2023) anvender i deres eksperimenter en forøgelse i vindhastigheder på op til 30 %, idet det dog ikke er undersøgt, hvorvidt dette er plausibelt. Endelig er vindretningen undersøgt, også med udgangspunkt i 1872-hændelsen, hvor modelleringer viser, at vindretningen ved denne hændelse var "noget nær perfekt" i forhold til at maksimere vandstandene blandt andet i området syd for hovedstaden (Andrée et al. 2022). De 10 % forøgede vindhastigheder hidrører andre historiske storme fra bl.a. 1904 og 1913, hvor trykforholdene var sammenlignelige med 1872, dog uden samme vindretning, men hvor vindhastighederne til gengæld i kortere tidsrum antages at være højere, baseret på en analyse af reanalyseedata, (CR20) som kombinerer observationer med modeller. Andre historiske storme havde endnu højere målte vindhastigheder, men en direkte sammenligning besværliggøres af forskellige forhold såsom lokalitet, varighed, målehøjde, brudte tidsserier pga. ødelagte målere samt geografiske skalaer (punktmålinger kontra regionale mønstre og sammenligning med modelceller).

Tidligere studier har antydnet, at kombinationen af fænomen 1 og 2 kan være mere fremtrædende i nogle tidsperioder end i andre tilbage i tid som følge af naturlig klimatisk variation. Det er uklart, om en sådan situation forekommer hyppigere i fremtiden som følge af klimaforandringer, og bør gøres til genstand for forskningsstudier fremadrettet. Her er yderligere klimamodeleringsstudier af vejr-situationerne bag ekstreme stormfloder og klimaforandringernes indflydelse på disse relevante at inddrage. Med det nuværende vidensgrundlag om fremtidens ændringer i vejr-mønstre omkring Danmark kan det altså ikke afvises, at lavtryk, der bevæger sig mod øst over det nordlige Tyskland, udvikler sig med højere resulterende vindstyrker i et varmere klima. Endelig, om end spekulativt, kan lavtryk, der er rester af tropiske cykloner, forekomme hyppigere i fremtiden. Der er dog fra modelleringer endnu ingen indikationer på, at disse vil forekomme hyppigere end hidtil (Stendel, 2021).

Ud over studier af de mulige atmosfæriske ændringer, vil mere detaljerede studier af risikoen for store havniveaustigninger, fx fra kollaps af isen omkring Antarktis, jf. Kapitel 6, også kunne robustliggøre grundlaget for analysen omhandlende havniveaustigning som følge af klimaændringer.

Alt i alt er vurderingen, at 1872-hændelsen og de tilhørende vandstande kan bruges som udgangspunkt for en vurdering af de mest ekstreme stormflodshøjder i hovedstaden for storme fra syd og øst (Østersøen), der understøtter ønsket om "nul-tolerance" ift. til oversvømmelser fra hav. Det vurderes nødvendigt, bl.a. ud fra en usikkerhedsbetragtning, at inddrage indflydelsen af forøgede vindhastigheder og fyldningsgrader. Til dette benyttes Andrée et al. (2023) hvorfra stormflodssimuleringer for 1872 med forøgede vindhastigheder på 10 % samt en højere initial fyldningsgrad af Østersøen. Disse forhold (forøgelser af vindhastighed, fyldningsgrad af Østersøen samt andre forhold såsom vindretning) underkastes fremadrettet yderligere

analyser ved DMI, hvorved indeværende resultat må betegnes som det bedste bud på det foreliggende grundlag. Her bemærkes, at Andrée et al (2023) udfører deres eksperimenter på endnu kraftigere storme, hvor yderligere studier kan underbygge fysikken og vurdere, hvorvidt disse vil kunne forekomme. Endelig diskuterer Andrée et al (2023), at der formentlig ikke er lineær sammenhæng mellem forøget fyldningsgrad og havniveaustigninger, hvilket kan føre til en overestimering af maksimalvandstanden, såfremt disse blot adderes i fremskrivninger, hvilket underbygger behovet for yderligere modelkørsler hvor matricen af modelforçeringer indgår i højere grad end i eksisterende studier.

På basis af ovenstående benyttes en øvre grænse baseret i højere grad baseret på modelarbejde end på statistik alene. Udtrykt ved de statistiske beregninger og eksisterende viden om meteorologiske forhold og deres påvirkninger i Østersøen, er dette vist konceptuelt i Figur 5.7 (jf. endvidere Madsen et al. (2017) og DMI (2017)).

Ifølge Colding (1881) blev der under stormfloden i november 1872 rapporteret en maksimal vandstand på 9 fod over daglig vande i Køge, hvilket svarer til: 2,83 m. Det er valgt i foreliggende arbejde at antage, at termen 'daglig vande' er et udtryk for middelhavniveauet i 1872, og de 2,83 m udtrykker den maksimale vandstand under stormfloden i Køge. Hvis det endvidere antages, at stormflodsvandstanden øges lineært med den relative stigning i havniveau (Relativ stigning = 1990-1872 * 1,5 mm/år havniveaustigning - 1,2 mm/år landhævning \approx 3 cm, jf. Kapitel 8), og højdereferencen DVR90 svarer til middelhavniveauet i 1990 (1990 er referenceniveau), vil en tilsvarende stormflod i 1990 nå en vandstand på 2,86 m DVR90 i overensstemmelse med tidligere angivelser (COWI, 2016; DMI, 2021).

Eftersom 0 m DVR90 beskriver en reference til et middelhavniveau omkring Danmark omkring 1990, er dette ikke en eksakt nul-reference for, i dette tilfælde, Køge. Yderligere analyser af udvikling i middelhavniveauet fra måleserier kan evt. verificere referenceniveauet yderligere, hvilket dog ikke er foretaget her.

En øget fyldningsgrad i Østersøen (Andrée et al, 2023, eksperiment B) giver en forøgelse i maksimalvandstanden af 1872 stormfloden på 0,28 m, og en forøgelse af vindstyrken på 10% giver en forøgelse af maksimalvandstanden på 0,54 m, begge tal for Køge, og hvor der af forfatterne er påvist en omtrent lineær sammenhæng mellem forøgelse af vindstyrke og vandstand. Vindretningen under 1872-hændelsen vurderes som meget nært optimal i at maksimere vandstandene.

Begivenheden d. 20.-21. oktober 2023 med de højest observerede vandstande i store dele af de indre danske farvande syd for bælteerne og Øresund var af typen som her i rapporten omtales som storme fra syd hvor vand transporteres fra Østersøen, generelt, til den vestlige Østersø med ophobning her til følge. Denne begivenhed indtraf sent i arbejdet med indeværende rapport og giver ikke anledning til modifikation af hverken modelforçeringer eller konklusioner: For hvad angår vindstyrker lå de i 2023 markant lavere end i 1872, også uden 10% forøgelsen som er benyttet her til udregning af det fysiske maksimum. Det samme gør sig gældende for opfyldningsgraden – her overstiger hændelsen i 2023 både de observerede og modellerede niveauer i 1872, men er langt fra de til rapporten benyttede niveauer som er baseret på et opfyldningsscenarie svarende til FL2 i Andrée et al. (2023).

En vurderet øvre grænse for stormflodsvandstand i Køge Bugt kan kvalificeres yderligere ved hjælp af bl.a. 1) analyser af ændrede vindmønstre og -hastigheder samt 2) modelarbejde omkring stormfloden 1872. På denne baggrund har DMI bl.a. gennemført supplerende undersøgelser i løbet af efteråret 2023 (DMI, 2024), som indbefatter en markant udfoldet serie af systematiske justeringer til de grundlæggende forhold og antagelser som modelkørslerne i Andrée et al. (2022) og Andrée 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, vandstandsgradienter omkring København samt klimaændringer (for havniveau).

DMI (2024) konkluderer på basis af de supplerende modelkørsler med HBM stormflodsmodellen bl.a. at rationaler og principper for indflydelsen af fyldningsniveau i Østersøen på resulterende vandstande i de indre danske farvande, og specifikt i hovedstadsområdet, kan bekræftes og viser samme generelle sammenhæng. Endvidere viser de supplerende analyser af historiske vindforhold, med fokus på vindstyrker og varighed, ikke forekomster af vind som kan overgå den atmosfæriske vindforcing som fører til høje vandstande i de indre danske farvande. Dette, hverken for reproduktionen af 1872, og dermed ej heller for kørslen med en øgning af vindstyrken på 10 % i forhold til 1872, som det anbefales i foreliggende rapport.

En manuel manipulation af vindretningen i løbet af stormfloden 1872 i spændet -15 til 15 grader medfører derimod en maksimal ændring i resulterende stormflodsvandstand ved Køge på 11,2 cm ved en -15 gr. ændring (DMI, 2024). Disse resultater om ændret vindretning anbefales inddraget ved vurderingen af anbefalede sikringsniveauer for stormfloder fra syd.

På det foreliggende grundlag vurderes maksimalvandstanden og dermed den maksimale stormflodshøjde i Køge Bugt refereret til år 1990 til:

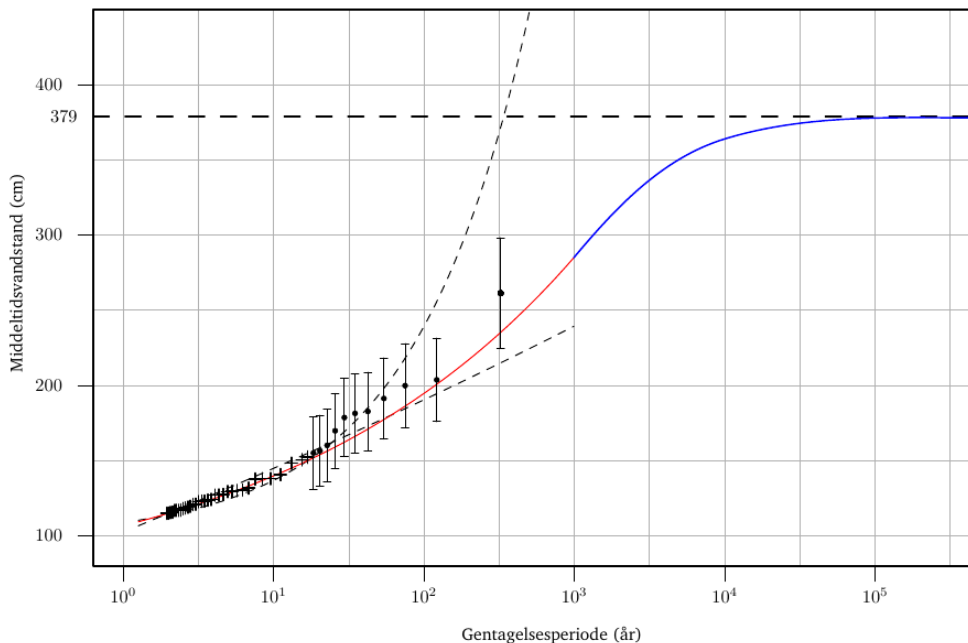
$$SL_{\text{maxSYD}} = SL_{\text{obs}} + FL2 + WS_{\text{amp10\%}} + WD_{-15\text{gr}} = 2,86 \text{ m} + 0,28 \text{ m} + 0,54 \text{ m} + 0,11 \text{ m DVR90} = 3,79 \text{ m (alt i DVR90)}$$

Hvor "FL2" relaterer sig til opfyldningsscenarioet i Andrée et al. (2023), "WS_amp10%" relaterer sig til forøgelsen af vindstyrke på 10% og "WD_-15gr" relaterer sig til ændring af vindretningen med - 15 gr, som beskrevet ovenfor.

Denne maksimalvandstand udgør således, jf. Kapitel 8, designvandstanden for stormfloder fra syd som summen af vandstanden under 1872-hændelse tillagt bidrag for en øget fyldningsgrad i Østersøen på 0,28 m og bidrag på 0,54 m fra en 10 % forøgelse af vindhastigheden samt et bidrag på 0,11 m for en ændring af vindretningen med 15 gr.

En vurderet øvre grænse for stormflodsvandstand på 3,79 m i Køge Bugt er sammenlignelig med tidligere vurderinger (95 %-konfidens), baseret på statistisk analyse af historiske hændelser, hvor hændelserne i 1044 og 1760 er udeladt (DMI, 2017; Madsen et al, 2017). Analysen gennemført for perioden 1826 til i dag med en indlagt øvre grænse på 3,79 m er skitseret i Figur 5.7.

Figur 5.7 illustrerer, hvorledes det øvre fysiske maksimum i ekstremvandstand for stormfloder fra syd tilnærmes for meget høje returperioder.



Figur 5.7: Vurdering af den fysiske øvre grænse for stormflodsvandstand (syd) i DVR90. Den røde linje viser resultatet af den statistiske analyse op til en 1.000-årshændelse med tilhørende statistiske usikkerheder (stiplet linje) og indgående data (se også Figur 5.6). Den blå linje illustrerer den videre udvikling i ekstremvandstand i vurderingen af en øvre fysisk grænse for ekstremhændelser (vandret fed, stiplet linje). Jf. tekst for yderligere forklaring.

Overgangen fra en statistisk vurdering af sikkerhedskoter til en ekspertvurdering af et fysisk maksimum for ekstremvandstanden er problematisk. Problematikken kommer deraf at der i spændet mellem det statistiske gyldighedsområde (som går op til en 1.000-årshændelse, rød kurve) og det fysiske maksimum er et vakuum, hvor der hverken estimeres middeltidshændelser eller gives ekspertvurderinger for givne gentagelsesperioder. Dette kan give udfordringer for de interessenter der ønsker at sætte sandsynligheder på ekstremhændelser større end en 1.000-årshændelse. For disse interessenter er det derfor ønskeligt at man også vurderer middeltidsvandstanden ved en 2.000-, 5.000- og en 10.000-årshændelse.

Dette hensyn er som udgangspunkt ikke muligt at imødekomme eftersom det er et centralt budskab i dette Kapitel at statistikken maksimalt kan strækkes til at estimere middeltidsvandstanden ved en 1.000-årshændelse. For at imødekomme ønsket om middeltidsvandstande mellem en 1.000-årshændelse og det fysiske maksimum skal middeltidsvandstandene aflæses af den blå graf i Figur 5.7.

Nogle af de ofte anvendte gentagelsesperioder med dertilhørende middeltidsvandstande op til en 1.000-årshændelse, samt tre aflæste gentagelsesperioder med dertilhørende middeltidsvandstande større end en 1.000-årshændelse er præsenteret i Tabel 5.3. Disse værdier er dog tydeligt markeret i en gul ramme for at understrege, at disse aflæste værdier ikke forstås som et udtryk for traditionel statistik. Den blå linje er dermed kun en skitse til at illustrere koblingen mellem de statistiske estimater og ekspertvurderingen af et øvre fysisk maksimum, den kunne have været tegnet med flere forløb, og de aflæste værdier er derfor ikke et udtryk for egentlige gentagelsesperioder og middeltidshændelser.

Tabel 5.3. Middeltidshændelser for hændelser fra syd for ofte anvendte gentagelsesperioder på baggrund af analysen som er illustreret i Figur 5.7.

Gentagelsesperiode	Middeltidsvandstand (cm)
10 år	140
20 år	154
50 år	176
100 år	196
200 år	219
500 år	255
1.000 år	288
2.000 år	318
5.000 år	350
10.000 år	364

Vedrørende stormfloder fra nord er der ikke fundet tilsvarende videnskabeligt arbejde som basis for estimering af en øvre fysisk grænse. Den højest målte vandstand siden 1890 er 1,68 m DVR90 (trendfri 1990), og den statistisk beregnede 1000-års hændelse er 1,84 m med meget store usikkerheder for endnu sjældnere hændelser samtidig med at hændelser større end Bodil er registreret, men uden for de officielle statistikker. Nogle af de ofte anvendte gentagelsesperioder med dertilhørende middeltidsvandstande op til en 1.000-årshændelse vises i Tabel 5.4.

Tabel 5.4. Middeltidshændelser for hændelser fra nord for ofte anvendte gentagelsesperioder.

Gentagelsesperiode	Middeltidsvandstand (cm)
10 år	124
20 år	134
50 år	146
100 år	155
200 år	164
500 år	176
1.000 år	184

Vandmængden i Kattegat er begrænset i forhold til Østersøen, men der kan være vandstands-mæssige koblinger til Skagerrak/Nordsøen i udfoldelsen af ekstremhændelser. Samtidig viser modelsimuleringer at vandstande nord for København kan være påvirket af ekstreme vandstande ved storme fra syd, hvorved den statistiske tilgang bør suppleres af modelstudier herfor. For fastlæggelsen af en potentiel maksimal vandstand for området nord for Drogdetærsklen skal der derfor anvendes en anden metodisk tilgang, som redegøres for i Afsnit 8.1.3. Vurdering af usikkerheder på stormfloder set i klimaperspektiv foretages i Kapitel 8. Her belyses også muligheder for videre studier til at udbygge vidensgrundlaget om stormfloder omkring København og i den vestlige Østersø og Øresund på kort og mellemlang sigt.

6. Klimaændringer

6.1 Udledningsscenarier

Klodens klima er stærkt påvirket af menneskers aktiviteter - ikke mindst gennem emissionen af drivhusgasser. Fremskrivninger med klimamodeller, der kan beskrive det forventede fremtidige klima, kræver derfor som en forudsætning beskrivelser af den forventede samfundsudvikling på verdensplan og betydningen for den globale udledning af drivhusgasser. Der er mange faktorer, som påvirker de fremtidige emissioner, så allerede før klimafremskrivningerne kan foretages, er der behov for viden fra fx socioøkonomiske og teknologiske eksperter, der kan give deres bedste bud på den fremtidige udvikling.

Resultatet af de forskellige bud på fremtiden præsenteres i såkaldte "udledningsscenarier", der beskriver de fremtidige udledninger af drivhusgasser (fx CO₂ og metan) og andre faktorer, som påvirker klimaet (fx partikler fra luftforurening). Her er det vigtigt at understrege, at fremskrivninger fra klimamodeller ikke skal anses som forudsigelser: De er altid betinget af det bagvedliggende udledningsscenarie, og resultaterne skal altid vurderes i forhold til de valgte scenarier. FN's klimapanel, IPCC, præsenterer fremskrivninger baseret repræsentative scenarier, der er designet og udvalgt i et omfattende internationalt forskningssamarbejde forud for klimapanelets hovedrapporter. DMI er Danmarks 'focal point' i IPCC.

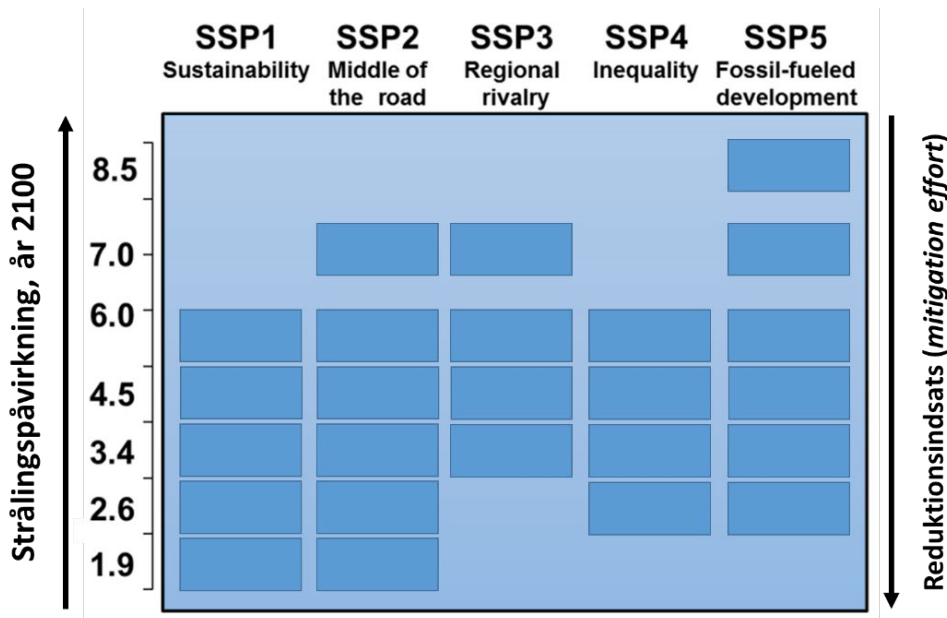
FN's klimapanel, IPCC, baserer hver af sine hovedrapporter på et sæt af udledningsscenarier. Femte hovedrapport fra 2014 og de fokuserede særrapporter fra 2018 og 2019 benyttede de såkaldte RCP-scenarier (Representative Concentration Pathways). RCP-scenarierne er betegnet med ét tal, som beskriver, hvor meget ekstra energi kloden absorberer i år 2100 (angivet i W/m²) – jo højere tal, jo højere er strålingspåvirkningen og den resulterende opvarmning. I den lave ende i RCP2,6 holdes den globale opvarmning under 2 grader i år 2100, mens RCP8,5 i den anden ende af spektret svarer til en høj udledning uden omfattende klimatiltag, der giver en global opvarmning over 4 grader i år 2100.

Den sjette hovedrapport fra IPCC (2021-23) bruger et nyt sæt af scenarier kaldet SSP-scenarier (Shared Socioeconomic Pathways). Til forskel fra RCP-scenarierne er SSP-scenarierne baseret på sammenhængende socioøkonomiske beskrivelser af verdenssamfundets fremtidige udvikling. Ligesom for RCP-scenarierne beskrives SSP-scenarierne med tal, men sammenlignet med RCP er der tilføjet et ekstra tal (fx første femtal i SSP5-8,5), som indikerer hvilken 'historik', verdensudviklingen følger. Der beskrives fem karakteristiske veje, udviklingen kan tage, hvor nr. 1 beskriver et yderst bæredygtigt samfund, mens nr. 5 beskriver et samfund drevet af fossile brændstoffer. Det sidste tal i SSP-scenariernes navne indikerer samme strålingspåvirkning, som betegnes i RCP-scenarierne, hvilket giver en sammenlignelighed med RCP-scenarier med en tilsvarende klimapåvirkning. Forskellen i de bagvedliggende scenarier for verdens udvikling gør dog, at udviklingen i emissionerne frem til 2100 kan være forskellige.

6.1.1 SSP-scenarierne

SSP-scenarierne er udviklet på baggrund af et omfattende arbejde, der har haft til formål at kortlægge mulige udviklinger af verdenssamfundet ud fra et tværfagligt perspektiv. Vurderingerne i IPCC's sjette hovedrapport baseres på fem udvalgte SSP-scenarier (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 og SSP5-8.5), der spænder på tværs af spektret for fremtidens sandsynlige udviklinger, men som samtidigt langt fra dækker alle de mulige socioøkonomiske scenarier for fremtiden. Scenarierne tager udgangspunkt i en række 'historikker', der beskriver,

hvordan verdenssamfundet kan udvikle sig. Hver af disse historier muliggør en række mulige udledningsscenarioer, som illustreret på Figur 6.1. Figur 6.1 viser alle de mulige niveauer af strålingspåvirkning for hver socioøkonomiske historik, samt hvor omfattende en omstillingsindsats (*mitigation effort*), der skal til for at begrænse emissionerne til det givne niveau under hver historik.



Figur 6.1: Den fulde oversigt over SSP-scenarier. De fem mulige 'historikker' kan resultere i forskellige niveauer af klimapåvirkning; nogle bliver dog udelukket. Fx gør den bæredygtige udvikling i SSP1, at de højeste emissionsniveauer udelukkes. Kilde: DMI, efter O'Neill et al, Geoscientific Model Development (2016).

Karakteristikkerne for de fem overordnede SSP-historikker er kort beskrevet (og direkte oversat fra engelsk):

- SSP1: Bæredygtighed – den grønne vej (få/begrænsede udfordringer for mitigation og tilpasning)
- SSP2: Midtvejsscenario (medium udfordringer for mitigation og tilpasning)
- SSP3: Regional rivalisering – en ujævn vej (store udfordringer for mitigation og tilpasning)
- SSP4: Ulighed – en opdelt vej (få/lave udfordringer for mitigation, store udfordringer for tilpasning)
- SSP5: Fossil-drevet udvikling – motorvejen (store udfordringer for mitigation, lave udfordringer for tilpasning)

Klimaforandringerne omfang afgøres først og fremmest af den samlede udledning af drivhusgasser (jf. *carbon budgets*, som beskrevet fx i IPCC (2021)). For at undgå at det internationale forskningsråd skal foretage adskillige klimamodelberegninger med næsten identiske klimaforandringer, udvælges der i den forberedende fase til hver ny IPCC-hovedrapport nogle repræsentative udledningsscenarioer fra den fulde matrix af muligheder – illustreret i Figur 6.1. Således baserer IPCC's sytten hovedrapports analyser (2021, 2023) sig på netop fem udvalgte kombinationer af SSP- og RCP- scenarier: SSP1-1.9 (meget lav udledning), SSP1-2.6 (lav udledning), SSP2-4.5 (mellemløjt udledning), SSP3-7.0 (høj udledning) og SSP5-8.5 (meget høj udledning). Bemærk derfor, at der fx ikke findes klimafremskrivninger af noget scenarie, der repræsenterer historikken SSP4.

6.1.2 Udledningsscenarier i aktuelle statslige klimatilpasningsværktøjer

Vurderingerne i IPCC's sjette hovedrapport (2021) baseres både på RCP- og SSP-scenarier. Det skyldes, at selvom rapporten benytter et opdateret sæt af globale klimamodelberegninger baseret på SSP-scenarier, så er de detaljerede regionale klimaberegninger fortsat baseret på RCP-scenarier. Det internationale forskningssamfund er nu i gang med at opdatere de regionale klimamodeller ud fra de nye globale beregninger, men det er et omfattende og beregningstungt arbejde. Det betyder, at et opdateret datagrundlag med detaljerede regionale klimamodelberegninger baseret på SSP-scenarierne først vil være klar om nogle år.

Dette gælder dog ikke for data om havniveau og stormflod. Beregningsmetoden bag disse tal for området omkring Danmark er ikke afhængig af de detaljerede regionale klimamodeller, og dermed kan tal og scenarier fra IPCC's sjette hovedrapport (2021) allerede nu benyttes til vurderinger af danske forhold. Derfor blev havniveaufremskrivningerne i DMI's KlimaAtlas (klima-atlas.dk) opdateret med de nye SSP-scenarier i starten af 2023.

De dele af klimatilpasningsindsatsen i Danmark, der konkret vedrører atmosfæriske fænomener som temperatur og nedbør er, for nuværende, fortsat baseret på klimafremskrivninger med RCP-scenarier, mens indsatsen målrettet stormfloder og et stigende havniveau nu kan baseres på fremskrivninger med SSP-scenarier. Således anvendes RCP-scenarierne stadig som fundament for mange statslige klimaværktøjer, bl.a. de atmosfæriske indikatorer indeholdt i KlimaAtlas. Heldigvis er der, som beskrevet ovenfor, høj sammenlignelighed mellem de to sæt af scenarier: Det sidste tal i SSP-scenariernes navne indikerer samme strålingspåvirkning, som betegnes i RCP-scenarierne, hvilket giver en sammenlignelighed med RCP-scenarier med en tilsvarende klimapåvirkning.

På trods af sammenligneligheden er der dog forskelle på de to sæt af udledningsscenarier, RCP og SSP. Da der kun findes konsistente, detaljerede klimamodelberegninger af atmosfærens ændringer for tre udledningsscenarier, er det alene disse scenarier, som er inkluderet i DMI's KlimaAtlas – RCP2.6 (lav udledning), RCP4.5 (mellemhøj udledning) og RCP8.5 (meget høj udledning). Alle tre scenarier har sammenlignelige udgaver blandt SSP-scenarierne (hvh. SSP1-2.6, SSP2-4.5 og SSP5-8.5), der dog også indeholder scenarier svarende til to yderligere udledningsniveauer: SSP1-1.9 (meget lav udledning) og SSP3-7.0.

Det supplerende materiale til KlimaAtlas indeholder havniveaufremskrivninger for Danmark i alle de fem SSP-scenarier, som IPCC's sjette hovedrapport benytter. De fem scenarier beskrives i det følgende afsnit både ift. den forventede globale opvarmning, de vil lede til, i år 2100, og sammenholdes også med de nuværende udledningspolitikker og reduktionsambitioner.

6.1.3 Nuværende emissionspolitikker og -ambitioner

IPCC's sjette hovedrapport inkluderer en delrapport med fokus på udledninger (*Mitigation of Climate Change 2022*). Heri estimerer IPCC de fremtidige globale udledninger og den globale opvarmning ud fra de samlede klimapolitikker, som alle lande melder ind til FN's klimakonvention. Disse klimapolitikker kaldes nationalt besluttede bidrag (Nationally Determined Contributions, NDC's). IPCC's seneste analyse tager udgangspunkt i summen af de klimapolitikker, som var meldt ind forud for COP26 (pr. oktober 2021). IPCC sonderer desuden mellem implementerede politikker og annoncerede ambitioner.

IPCC konkluderer, at hvis de klimapolitikker, der var implementeret før COP26 (november 2021) forlænges efter 2030, og der ikke sker yderligere tiltag, vil drivhusgasudledningen fortsat stige og lede til en samlet global opvarmning på 3,2 °C i år 2100.

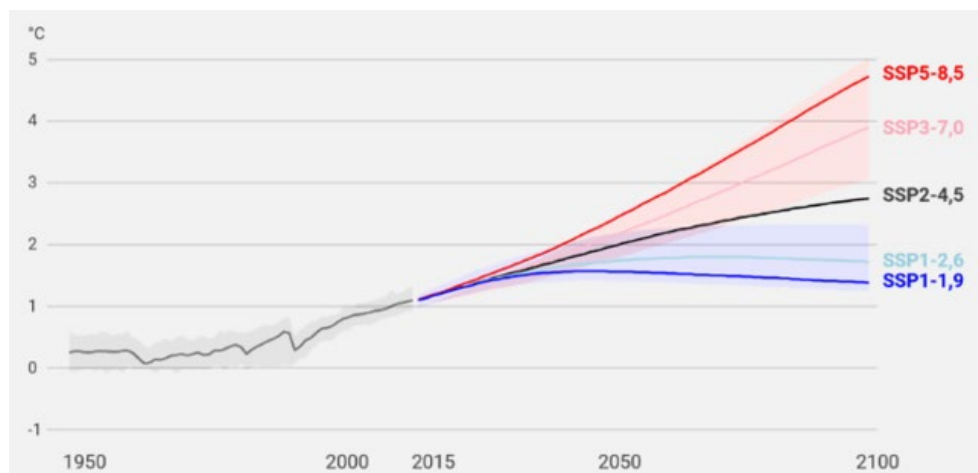
Tager man yderligere højde for annoncerede ambitioner, der endnu ikke er implementeret som konkrete politikker, svarer reduktionsmålene, som verdens lande har meldt ind til FN's klimakonvention inden COP26 (oktober 2021), til en global opvarmning på 2,8°C i år 2100.

Den lidt nyere analyse Emissions Gap Report 2022 fra FN's Miljøprogram (UNEP) vurderer også den globale opvarmning på baggrund af henholdsvis de annoncerede og de implementerede klimapolitikker. Analysen er gennemført på et senere tidspunkt og medtager derfor i et vist omfang klimapolitikker frem til midten af 2022. UNEP's estimater for den forventede globale opvarmning er derfor lavere, end hvad der fremgår af IPCC's synteserapport. UNEP finder, at de annoncerede ambitioner vil føre til en global opvarmning på 2,4-2,6 °C i 2100. Når kun de implementerede klimapolitikker medtages, vurderer UNEP, at det vil føre til en global opvarmning på 2,8 °C.

Ovenstående estimater kan sammenholdes med den beregnede globale opvarmning i hvert af de fem repræsentative SSP-scenarier; se Tabel 6.1 og Figur 6.2.

Tabel 6.1: Den globale opvarmning, sammenlignet med 1850-1900 i de fem SSP-scenarier. Kilde: IPCC sjette hovedrapport, arbejdsgruppe 1 (2021).

Scenario	Near term, 2021-2040		Midt-term, 2041-2060		Long term, 2081-2100	
	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)
SSP1-1.9	1.5	1.2 to 1.7	1.6	1.2 to 2.0	1.4	1.0 to 1.8
SSP1-2.6	1.5	1.2 to 1.8	1.7	1.3 to 2.2	1.8	1.3 to 2.4
SSP2-4.5	1.5	1.2 to 1.8	2.0	1.6 to 2.5	2.7	2.1 to 3.5
SSP3-7.0	1.5	1.2 to 1.8	2.1	1.7 to 2.6	3.6	2.8 to 4.6
SSP5-8.5	1.6	1.3 to 1.9	2.4	1.9 to 3.0	4.4	3.3 to 5.7



Figur 6.2: Den globale opvarmning, sammenlignet med 1850-1900. Med grå den observerede temperaturudvikling frem til i dag, og med farver fremskrivninger af den globale middeltemperatur frem mod år 2100 baseret på de fem SSP-udledningsscenarier: Et meget lavt (SSP1-1,9), lavt (SSP1-2,6), middelhøjt (SSP2-4,5), højt (SSP3-7,0) og meget højt (SSP5-8,5) udledningsscenarie. Kilde: IPCC sjette hovedrapport, arbejdsgruppe 1 (2021).

Sammenholdes vurderingerne af de nuværende udledningsscenarier med SSP-scenarierne, fremgår det at:

- De globale udledninger følger ikke længere det høje udledningsscenarie SSP5-8,5 og er således på et lavere niveau.

- Udviklinger svarende til SSP1-1.9 og SSP1-2.6, som holder den globale opvarmning under hhv. 1,5 og 2 °C, vil kræve yderligere udledningsreduktioner.
- SSP2-4.5 svarer tilnærmelsesvis til de nuværende indmeldte ambitioner fra verdens lande.
- Den forventede opvarmning med de nuværende implementerede udledningspolitikker ligger mellem SSP2-4.5 og SSP3-7.0.

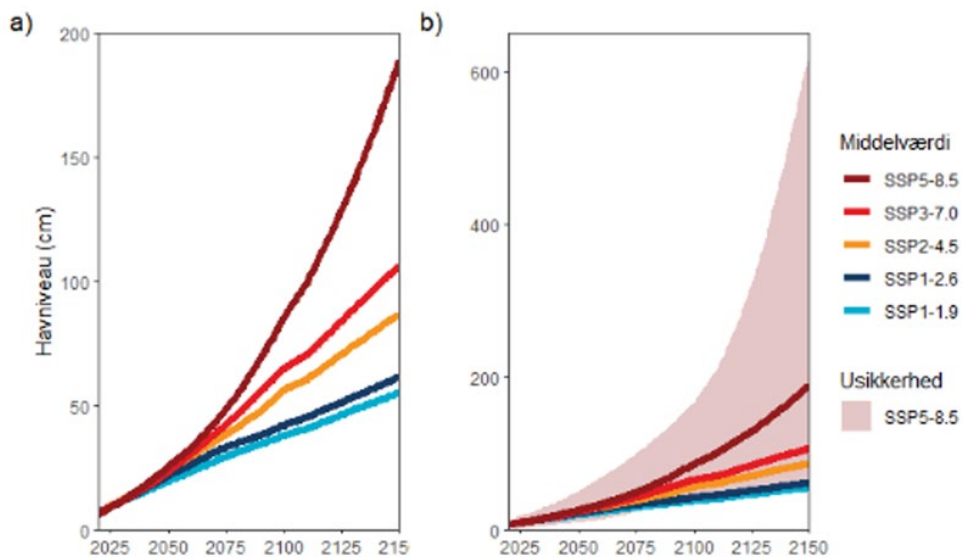
6.2 Havniveaustigninger

Fremskrivninger af havniveaue omkring Danmark præsenteres i DMI's KlimaAtlas baseret på data fra IPCC. Omkring Danmark kompenseres havniveaustigningen delvist af landhævning efter den sidste istid. Landhævningen svarer til ca. 20 cm på 100 år i det nordligste Jylland, men er faldende mod syd og vest til omtrent 0 cm i det sydligste Danmark. KlimaAtlas korrigerer havniveautallene fra IPCC med estimater af landhævning i Danmark (Knudsen et al, 2016), for at give et retvisende billede af den reelle, eller relative, havniveaustigning langs kysterne. Der kan dog være lokale faktorer og forhold, der gør, at et område hæver eller sænker sig anderledes end det overordnede mønster. Det kan fx være den underliggende geologi, grundvandsindvinding eller sætninger i områder, der udgøres af fyldmaterialer.

En anden faktor, der gør, at havniveaustigningen i Danmark afviger fra det globale gennemsnit, er, at ændringen i Danmark afhænger af de konkrete kilder til stigningen. Afsmeltningen fra de store iskapper i Arktis og Antarktis bliver ikke jævnt fordelt i verdenshavene, blandt andet fordi tyngdekraften fra de enorme ismasser, der normalt tiltrækker vandet i verdenshavene mod iskapperne, svækkes i takt med afsmeltningen. Det betyder, at afsmeltning fra Grønlands indlandsis øger havniveaue i Danmark relativt mindre end en tilsvarende afsmeltning fra Antarktis.

Havniveaufremskrivningerne i IPCC's sjette hovedrapport (2021-2023) indeholder som noget nyt såkaldte "*low-likelihood, high impact scenarios*". IPCC sætter dermed for første gang konkrete tal på den havniveaustigning, der potentielt kan komme fra processer, som ikke er inkluderet i modelfremskrivningerne, fx kollaps af ishylder omkring Antarktis. Selvom den internationale klimaforskning har konstateret potentielle risici for processer, der leder til omfattende og accelererende tab af is fra de store iskapper på Grønland og særligt Antarktis, er den videnskabelige forståelse af disse processer fortsat begrænset. Det er derfor ikke muligt at beskrive dem eksplicit i nutidens klimamodeller. IPCC har brugt et såkaldt "*expert judgement*" til at estimere størrelsen af de mulige bidrag til stigninger i havniveaue fra disse processer og tager dermed højde for dem som et yderligere usikkerhedselement i tillæg til fremskrivningerne fra klimamodellerne. I nogle tilfælde kan bidraget til havniveaustigning fra disse "*low-likelihood, high impact*" processer være dominerende, især under høje udledningsscenarier og på længere tidsskalaer (dvs. at de potentielle konsekvenser stiger markant efter år 2100). Selvom disse processer fortsat er forbundet med stor usikkerhed, vurderes det, at de bør inkluderes i en usikkerhedsvurdering for at opnå det mest retvisende billede af fremtiden. Dette er desuden indarbejdet i alle relevante tal i DMI's KlimaAtlas.

KlimaAtlas viser en forventet havniveaustigning ved København (Øresunds kyststrækning) i midten af århundredet (gennemsnit fra 2041-2070) på mellem 20 cm for et lavt udledningsscenarie (SSP1-2,6) og 27 cm for et højt udledningsscenarie (SSP5-8,5). Stigningen accelererer særligt i de højere scenarier frem mod slutningen af dette århundrede og ind i det næste, hvilket giver en gradvis større forskel mellem scenarierne: De tilsvarende tal er 38 cm og 86 cm for 2100 samt 55 cm og 189 cm for 2150 for hhv. det lave og det høje udledningsscenarie (jf. Figur 6.3 (a)). Usikkerheden på disse tal stiger tilsvarende frem i tiden, så det sandsynlige interval for fx det høje udledningsscenarie i 2100 spænder de 10. og 90. percentiler over 41-166 cm havniveaustigning (Figur 6.3 b)).



Figur 6.3. Havniveaustigning ved København (Øresund-kyststrækning). a) Havniveaufremskrivninger fra 2020 til 2150 under samtlige fem udledningsscenarioer, der benyttes af IPCC. b) Som a), men med usikkerheden (10. - 90. percentil) vist for det meget høje udledningsscenario, SSP5-8.5. Bemærk de forskellige lodrette skalaer mellem a) og b). Tallene her er vist for Øresund/København Nord; den gennemsnitlige havniveaustigning i Køge Bugt/København Syd er næsten identisk.

6.3 Fremtidens stormfloder i et klimaperspektiv

Havet omkring Danmark stiger i takt med den globale opvarmning. Det gennemsnitlige absolute havniveau i Danmark er steget ca. 2 mm om året siden år 1900. Den stigning vil fortsætte uanset den fremtidige drivhusgasemission frem mod slutningen af dette århundrede og efter år 2100. I de højere udledningsscenarioer vil stigningsraten accelerere.

Et stigende havniveau medfører større stormflodshøjder. En stormflod kan skyldes kraftig pålandsvind, eller at vand hober sig op i bunden af en fjord eller i et smalt stræde. Ophobning af vand kan desuden forekomme uden kraftig vind og kaldes 'en stille stormflod'. I danske farvande opstår stille stormfloder typisk i forbindelse med, at vand presses tilbage fra Østersøen og hober sig op langs de sydlige kyster og i bælteerne.

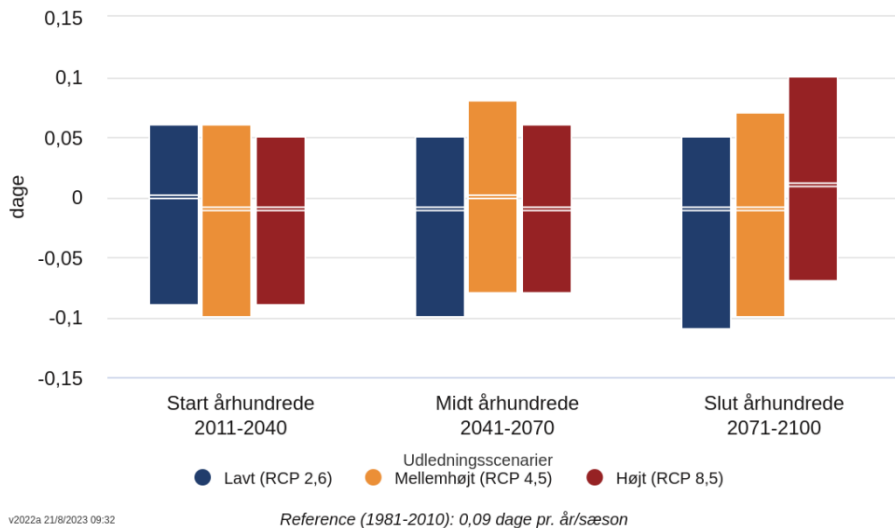
Fremtidens stormflodshøjder vil afhænge af størrelsen af den gennemsnitlige havniveaustigning, landhævning/-sænkning og mulige ændringer i kraftig vind over havet. For disse tre faktorer er den generelle havniveaustigning (justeret for landhævningseffekter) den primære kilde til ændringer i størrelsen af fremtidige stormfloder. Klimafremskrivningerne viser ikke samlet set store ændringer i vinden omkring Danmark. Men ændringer i vinden i et varmere dansk klima kan ikke udelukkes, fordi modelfremskrivningerne er usikre og forskellige klimamodeller viser forskellige tendenser omkring Danmark.

6.3.1 Vind

Den samlede vurdering på tværs af de klimamodelberegninger bag KlimaAtlas er, at vindmønstrene i Danmark stort set forbliver uændrede frem mod år 2100. Hverken antallet eller styrken af storme forventes med det forhåndværende datagrundlag at ændre sig signifikant. Klimamodellerne viser dog en svag tendens til faldende middelvindstyrke og stigende ekstremvindstyrke – men begge ændringer er forbundet med meget store usikkerheder.

I ensemblet af klimamodeller, som indgår i KlimaAtlas, er der relativt stor spredning i beregningerne af fremtidens ekstremvind. Betragtes ekstremvind over land, optalt som antallet af dage,

hvor middelvindstyrken er over 25 m/s i løbet af et år, forventes der heller ikke en markant ændring i takt med den globale opvarmning. Ifølge cirka halvdelen af klimamodellerne skal vi på landsplan forvente flere dage med ekstremvind, og ifølge den anden halvdel skal vi forvente færre. Det bedste bud på fremtidens ændringer i ekstremvind (medianværdien) er derfor cirka nul. Denne konklusion er forbundet med relativt store usikkerheder som følge af spredningen imellem klimamodellerne i model-ensemblet, som vist i Figur 6.4.



Figur 6.4. Ændring i antal dage hvor vindstyrken er over 25 m/s i løbet af et år, over land. Ændringerne er angivet for tre 30-års perioder og for tre udledningsscenerier. De lodrette søjler angiver modelusikkerheden af det bedste bud (medianværdien) for ændringen.

På landsplan ser den gennemsnitlige vindretning ud til at dreje en smule mod vest fra den nuværende dominerende sydvestlige retning i takt med opvarmningen. Men dette er igen en gennemsnitsbetragtning med relativt store forskelle mellem klimamodellerne.

Samlet set forventes der ikke en markant ændring i hverken middel- eller ekstremvind omkring Danmark. Uden signifikante ændringer i vindmønsteret vil størrelse og hyppighed af stormflodshændelser i fremtiden således primært afhænge af ændringerne i middelhavniveau (justeret for landhævning).

Eksisterende analyser af de forventede ændringer i Østersø-området viser den samme usikkerhed og mangel på klar tendens i både middel- og ekstremvind (se fx Christensen et al. (2021), et studie af atmosfæriske klimaændringer ledet af DMI som del af et større internationalt forskningssamarbejde mellem Østersølandene). DMI har foretaget en uddybende analyse af klimamodelfremskrivningernes ændringer i forskellige niveauer af ekstremvind i Østersøområdet over hav (DMI, 2024). Analysen er baseret på 79 forskellige fremskrivninger, og beregninger med fokus på hhv. vinter- og efterårsmånederne viser samme mønster. Beregningerne er på linje med de tidligere studier, og viser en tilsvarende stor spredning mellem de forskellige klimamodeller, med en sandsynligt interval for ekstremvindsændringer der spænder fra et mindre fald i vindstyrke til en mindre stigning. Samlet set ses en meget usikker, svagt stigende tendens for ekstremvind over Østersøen, men ingen robust statistisk sammenhæng mellem opvarmning og ændringer i ekstremvind. De maksimale ændringer blandt modellerne er større i det høje udledningsscenario, men spredningen er ligeledes stor blandt modellerne selv i et lavt udledningsscenario, hvor de forventede ændringer også spænder fra et mindre fald til en mindre stigning.

6.3.2 Havniveau og stormfloder

Vandstanden for en stormflodshændelse i fremtiden afhænger derfor, som nævnt, primært af hvilket udledningsscenarie, der ligger bag. DMI's Klimaatlas præsenterer lokale stormflodshøjder i form af 20-, 50-, 100- og enkelt steder også 10.000-årshændelser for forhøjet vandstand. Værdien for de nutidige stormflodshændelser er baseret på Kystdirektoratets Højvandsstatistik (2019), dog er 10.000-årshændelserne vurderet ud fra en kombination af flere datakilder. Tabel 6.2 og Tabel 6.3 viser forventede ændringer i stormflodshøjder for 20-, 100- og 10.000-årshændelser for et lavt, mellemhøjt og et højt udledningsscenarie (hhv. SSP1-2.6, SSP2-4.5 og SSP5-8.5) frem mod år 2100.

Usikkerhederne i forbindelse med fremtidens stormfloder langs de danske kyster er vurderet på baggrund af usikkerheden af de globale tal for havniveaustigninger. Det fremtidige havniveau kommer med sikkerhed til at stige. Som beskrevet ovenfor kan meget høje havniveaustigninger ikke udelukkes, og dermed bliver usikkerheden i den høje ende stor. I Klimaatlas benyttes 10- og 90-percentilerne som hhv. nedre og øvre usikkerhedsgrænse for det sandsynlige interval. Der gøres opmærksom på, at tallene for fremskrivningerne i Klimaatlas ikke helt stemmer overens med de tilsvarende i dette arbejde grundet forskelle i metoder og anvendt data, jf. Kapitel 5 & Kapitel 8.

Tabel 6.2. Stormflodshøjder med gentagelsesperioderne 20, 100, og 10.000 år fra 1981-2010 til 2071-2100 for Øresunds kyst (angivet i cm) fra Klimaatlas. Medianen angiver den mest sandsynlige stormflodshøjde for hhv. et lavt, mellemhøjt og højt udledningsscenarie. 10- og 90-percentilerne angiver den nedre og øvre værdi af usikkerhedsintervallet (det sandsynlige interval). Der er pt. kun stormflodshøjder for disse tre udledningsscenarier i Klimaatlas – havniveaustigninger for de to øvrige SSP-scenarier SSP1-1.9 og SSP3-7.0 findes dog som supplerende data.

København nord Øresunds kyst	Scenarie	1981-2010	2071-2100		
			Median	10-percentil	90-percentil
20-års stormflod	SSP1-2.6	143	171	144	208
	SSP2-4.5		181	156	222
	SSP5-8.5		202	167	271
100-års stormflod	SSP1-2.6	158	186	153	242
	SSP2-4.5		196	164	256
	SSP5-8.5		217	175	305
10.000-års stormflod	SSP1-2.6	189	217	169	296
	SSP2-4.5		227	180	310
	SSP5-8.5		248	190	359

Tabel 6.3. Som Tabel 6.2, men for Køge Bugt.

København syd Køge bugt	Scenarie	1981-2010	2071-2100		
			Median	10-percentil	90-percentil
20-års stormflod	SSP1-2.6	146	176	150	213
	SSP2-4.5		186	161	227
	SSP5-8.5		207	170	276
100-års stormflod	SSP1-2.6	159	189	157	239
	SSP2-4.5		199	168	253
	SSP5-8.5		220	175	302

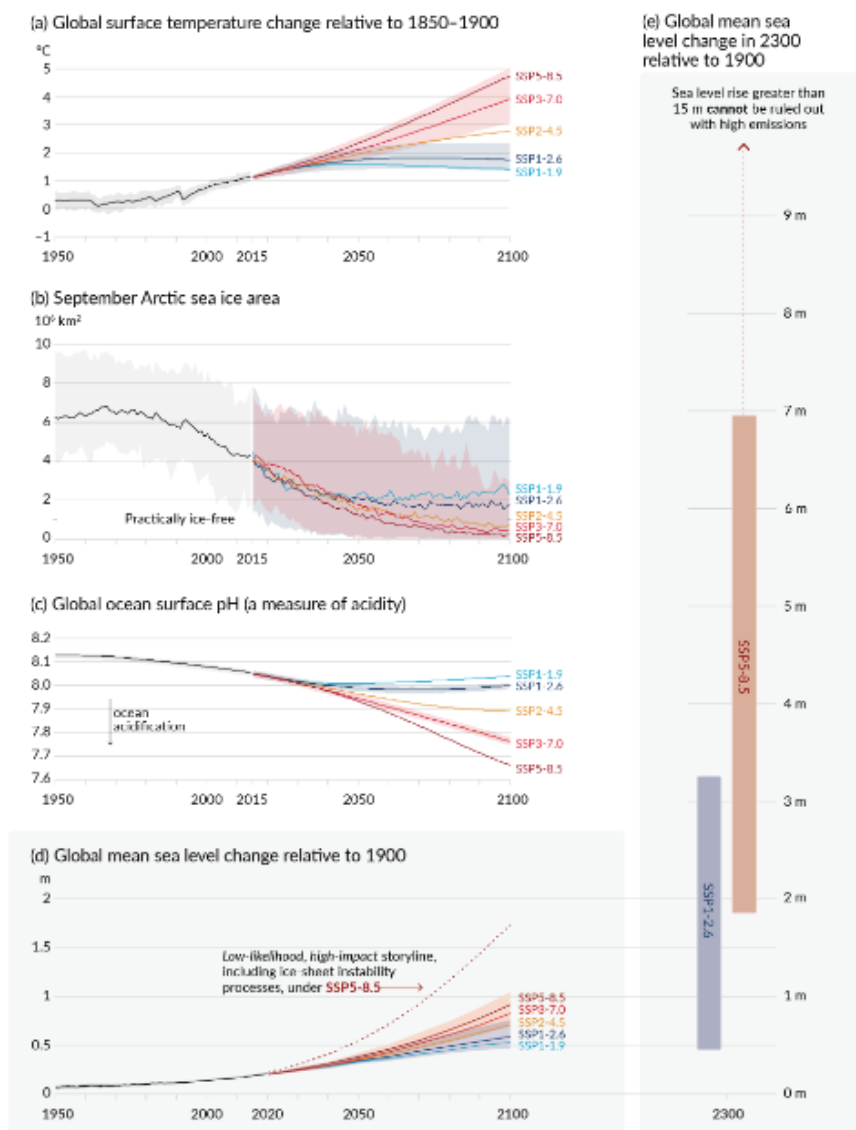
6.4 Havniveaustigninger ud over det mest sandsynlige

IPCC vurderer, at den øvre grænse for mulige havniveaustigninger på globalt plan er cirka 2 m i år 2100 og 5 m i år 2150. En sådan stigning ligger inden for det mulige, særligt i et højt udledningsscenarie, men er dog meget lidt sandsynlig.

Vurderinger af havniveaustigninger efter år 2100 er forbundet med meget større usikkerheder end stigningerne i dette århundrede, men IPCC angiver det sandsynlige interval for den globale stigning for år 2300 til 2-7 m for det meget høje udledningsscenarie (SSP5-8.5), jf. Figur 6.5, panel (e).

I forbindelse med udviklingen i det globale havniveau er der stor fokus på afsmeltning fra Antarktis, der, som nævnt, udgør en væsentlig usikkerhedsfaktor for beregning af havniveaustigningerne frem mod år 2100 og særligt år 2300. Den aktuelle stigning domineres dog af smeltvand fra mindre gletsjere og havets termiske udvidelse (varmeudvidelse).

Human activities affect all the major climate system components, with some responding over decades and others over centuries



Figur 6.5. Scenarieudvikling. Ændringer i temperatur (a), arktisk isdække (b), havoverfladens surhedsgrad (c) og globale havniveaændringer frem til 2100 (d) og 2300 (e). Kilde: IPCC sjette hovedrapport (2021).

6.5 Scenarievalg i andre lande

Det er udfordrende at rekvirere specifik information om, hvilke scenarier og dertilhørende usikkerhedsniveauer (konfidensniveauer), der benyttes til konkrete klimatilpasningsopgaver internationalt. Det er derfor ligeledes udfordrende at opnå et større overblik over tilgange på tværs af projekt- og administrationsniveauer. En af grundene hertil er, at den videnskabelige litteratur typisk baseres på et udvalg af scenarier for tilpasning til forestående klimatruser snarere end at beskrive aktuelt benyttede scenarier. Desuden er konsulentarbejdet bag konkrete klimatilpasningsløsninger ikke altid offentligt tilgængeligt. I kontrast hertil ses et studie af Hirschfeld et al. (2023), hvor specifik information omkring brugen af klimatilpasningsscenarioer i kystzoner på globalt plan er indsamlet ved brug af spørgeskemaundersøgelser, der er blevet distribueret gennem brede netværk med en opfordring til videre deling. Undersøgelsen havde 253 besvarelser af "fagfolk inden for arbejdet med kystsikring", hvoraf 89 % arbejder i lokale administrationer (byer, kommuner, distrikter, regioner, stater mv.). Studiet finder generelt en stor spredning i tilgangen til brug af udledningsscenarioer for tilpasningsprojekter i kystzoner og har en række gennemgående konklusioner: Der er en generel tendens til et større brug af fremtidige havniveauændringer (75-100 %) for lande i Nord- og Vesteuropa, Nordamerika, Sydafrika og Oceanien sammenlignet med Asien, Chile/Peru og dele af Sydeuropa (25-75 %) og dele af Afrika, Caribien og Brasilien (0-25 %). Denne tendens for hvert kontinent ses også ift. brugen af antal udledningsscenarioer: For Nordamerika, Europa, Asien, Afrika og Oceanien ses en større brug af flere udledningsscenarioer. For lande, som bruger et enkelt udledningsscenario, ses en median havniveaustigning på 90 cm med et spænd på 0-203 cm. For lande som benytter to udledningsscenarioer er disses medianværdier 61 cm og 140 cm. Tilsvarende for tre scenarier er værdierne 42 cm, 71 cm og 121 cm, og igen for fire scenarier; 53 cm, 119 cm, 191 cm samt et high-end scenarie på 305 cm. Der er med andre ord et meget stort kvantitativt spænd i de benyttede scenarier på verdensplan samt i tidshorizonten for disse.

Et andet studie (Hausfather & Peters, 2020) viser, at selv med en meget uambitiøs politik for at mindske emissionen af drivhusgasser på globalt plan, repræsenterer RCP8.5 et urealistisk højt emissionsniveau af drivhusgasser, hvorimod dette scenarie i meget litteratur op til fx IPCC's sjette hovedrapport (2021) blev beskrevet som et øvre maksimum ved en tilgang uden mitigerende af emissioner. Med det perspektiv kan en klimatilpasning til RCP8.5-scenariet, eller et scenarie med tilsvarende klimapåvirkning, resultere i overestimerede tilpasningsniveauer. Studiet (Hausfather & Peters 2020) peger i retning af scenarier baseret på udledningsniveauer under RCP8.5 og nævner deriblandt SSP3-7.0 som et mere plausibelt høj-udledningsscenario. Det skal dog understreges, at meget høje udledningsscenarioer som RCP8.5 og det tilsvarende SSP5-8.5 er designet af tværfaglige eksperter som realistiske fremtidsudviklinger, og der findes rigelige mængder af fossile brændsler til principielt at kunne nå disse høje udledningsniveauer.

6.5.1 Valg af udledningsscenario og konfidensniveau

Ovenstående (Afsnit 6.5) gælder imidlertid for selve scenarievalget. Der skal derudover tages stilling til de samlede klimafremskrivninger, hvori der indgår både et median-estimat og et statistisk konfidensinterval baseret på de forskellige klimamodelberegninger. IPCC definerer *det sandsynlige interval* til fra 17- til 83-percentilen, forstået som at sandsynligheden mellem den øvre og nedre grænse her er 66-100 %. Det lidt bredere *meget sandsynlige interval* spænder fra 5- til 95-percentilen og beskriver en sandsynlighed på mere end 90 %. Dette tilsvarende omtrunt en typisk tilgang i videnskabelig litteratur, hvor der med afsæt i normalfordelinger benyttes typiske konfidens-niveauer for den øvre usikkerhed på 84 % (én standardafvigelse) og 95 % (to standardafvigelser). "High impact, low probability"-scenarier, der ofte benyttes som term til at beskrive scenarier med en meget lille sandsynlighed og en meget stor konsekvens, benytter konfidensniveauer, som ligger på eller over 95-percentilen, og inkluderer ændringer ud

over det mest sandsynlige. Et komplet billede af de fremtidige klimaændringer kræver derfor samlet stillingtagen til udledningsscenarioer og konfidensniveau blandt klimamodellerne: Vil man planlægge efter det bedste bud (medianværdien) eller – ud fra en risikobetragtning – ud fra de klimamodeller, der forudsiger en relativt større ændring fremover?

Da spredningen blandt klimamodellerne, og dermed usikkerhedsintervallet, kan være sammenligneligt eller større end den gennemsnitlige forskel mellem to udledningsscenarioer, ses store overlap i de sandsynlige intervaller for ændringerne under de forskellige udledningsscenarioer. Betragter man den globale havniveaustigning, svarer fx 83-percentilen, som øvre sandsynlige grænse for et mellemhøjt scenarie SSP2-4.5 (76 cm), omtrent til medianniveauet for meget høje udledningsscenarioer SSP5-8.5 (77 cm) på globalt plan (Tabel 6.4). Valget af konfidensniveau kan således give et ligeså markant bidrag til den samlede vurdering af en stormflodshøjde, som valget af udledningsscenarioer i sig selv kan. Dertil kommer, at usikkerheden stiger, jo længere ud i fremtiden, man kigger. Et andet illustrativt eksempel er, at de forventede havniveaustigninger for udledningsscenarioet SSP3-7.0 er henholdsvis 68 cm, 90 cm og 111 cm i år 2100, afhængigt af om man baserer estimatet på medianen, 83- eller 95-percentilen (IPCC 2021). Illustrationen her er baseret på IPCC's tal for globale gennemsnitsændringer – effekten vil dog være helt tilsvarende efter korrektion til danske, lokale forhold.

Tabel 6.4. Forventet fremtidig global havniveaustigning (i meter) sammenlignet med 1995-2014 for de fem SSP-scenarioer. Tallene indikerer medianværdien (det bedste bud) samt det sandsynlige interval (17-83-percentilen) i parentes. Kilde: IPCC sjette hovedrapport (2021).

	SSP1-1.9 (m)	SSP1-2.6 (m)	SSP2-4.5 (m)	SSP3-7.0 (m)	SSP5-8.5 (m)	SSP5-8.5 Low Confidence (m)
Total (2100)	0.38 (0.28-0.55)	0.44 (0.32-0.62)	0.56 (0.44-0.76)	0.68 (0.55-0.90)	0.77 (0.63-1.01)	0.88 (0.63-1.60)
Total (2150)	0.57 (0.37-0.86)	0.68 (0.46-0.99)	0.92 (0.66-1.33)	1.19 (0.89-1.65)	1.32 (0.98-1.88)	1.98 (0.98-4.82)

I Kapitel 8 diskuteres og gives en samlet vurdering som grundlag for en samlet beslutning for så vidt angår udledningsscenarioer og konfidensinterval, herunder hvilken forventet havniveaustigning valget resulterer i frem mod år 2075 og 2125. De to valgte år er fastsat af arbejdsgruppen relevante tidshorisonter for vurdering af sikringsniveau. DMI bemærker, at valget af tidshorisonter efter 2100 øger usikkerheden markant. Således er usikkerhedsintervallet på den gennemsnitlige globale havniveaustigning i 2125 mere end 50 % større end i år 2100.

6.5.2 Sikringsniveauer og hændelsesberegninger i andre lande v. Østersøen

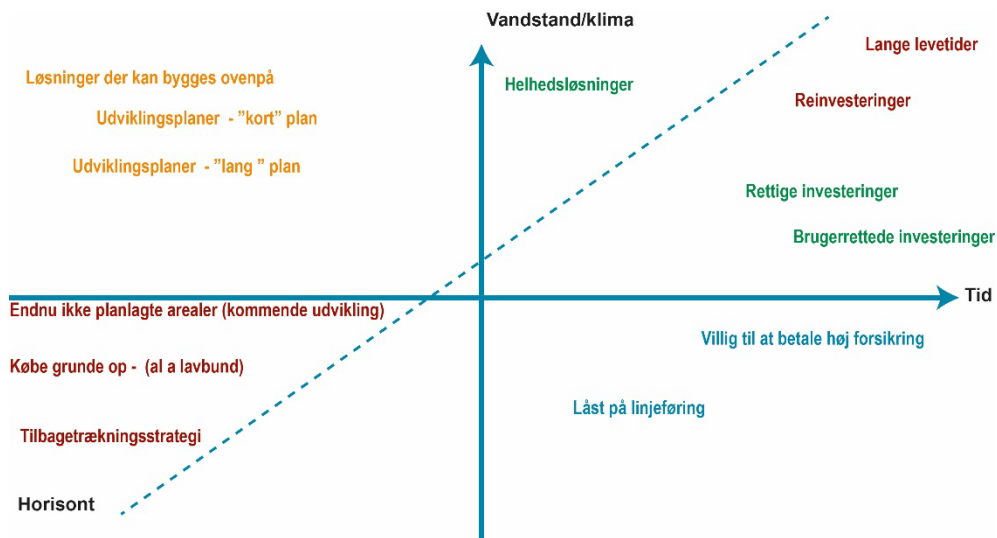
Ovenstående hændelsesberegninger for København kan sammenlignes med tilsvarende resultater fra, primært, den tyske Østersøkyst, jf. "Storm Surges in the southern Baltic Sea", Berichte des BSH, 2005. Her anvendes en Gumbel fordeling til at beregne returperioder op til 100 år for en række tyske samt to polske kystbyer. Endvidere viser Tabel 6.5 til hvilket niveau man har valgt at kystsikre i hver enkelt by (kilden er fra 2005). De højeste niveauer, både hvad angår returperiode og sikringsniveau, forekommer i bugte, der er åbne mod nordøst. Det højeste anvendte sikringsniveau er 3,70 m.

Tabel 6.5. Hændelses-statistik (op til 100 år, angivet i m) og beskyttelsesniveauer (m) i en række byer i Østersøen i primært Tyskland samt to polske byer (år 2005). Reproduceret fra BSH (2005).

Gauge/P	0.80	0.90	0.95	0.98	0.99	Defence level
Name / T in years	5	10	20	50	100	
Flensburg	1.45	1.63	1.81	2.04	2.21	3.50
Schleimünde	1.38	1.54	1.70	1.89	2.04	3.70
Eckernförde	1.43	1.63	1.82	2.07	2.25	3.60
Kiel	1.45	1.65	1.84	2.08	2.26	3.40
Neustadt	1.38	1.57	1.75	1.99	2.16	3.30
Travemünde	1.50	1.70	1.89	2.14	2.32	3.70
Wismar	1.49	1.68	1.86	2.09	2.26	3.20
Warnemünde	1.28	1.44	1.60	1.80	1.95	2.85
Stralsund	1.17	1.31	1.45	1.63	1.77	2.70
Greifswald	1.34	1.50	1.65	1.85	2.00	3.00
Swinoujście	1.16	1.31	1.46	1.65	1.80	0.80
Kolobrzeg	1.13	1.26	1.39	1.54	1.66	1.10

7. Yderligere aspekter til fastlæggelse af sikringsniveauer

7.1 Levetidsperspektiv



Figur 7.1. Skitse over dimensioner i betragtning af levetidsperspektiv.

Fastlæggelse af sikringshøjde for oversvømmelsesbeskyttelse af hovedstadsområdet kan med fordel inddrage et levetidsperspektiv. På den ene side skal der ikke herske tvivl om, at København også eksisterer om flere hundrede år, mens der samtidig sker en gradvis transformation og udvikling af byens indhold. Bygninger har generelt kortere levetid end bydele, og gangstiers levetid er kortere end større infrastrukturprojekter i forhold til byplanlægning, anlæg og vedligeholdelse.

Figur 7.1 skitserer tidshorisont i forhold til havniveaustigninger med input fra Arbejdsgruppe Sikringsniveauer. I tillæg til løbende vedligeholdelse gennemføres generelt større eftersyn på infrastruktur med en kadence på 10-30 år, hvor større beslutninger om fx "restlevetid" vurderes. Denne kan ses i sammenhæng med oversvømmelsesfaren.

Omfanget af fremtidige havniveaustigninger er usikkert og kræver tilsvarende, at beslutninger om beskyttelse tilpasses vandstandsudviklingen over tid. Her er det nødvendigt at træffe robuste beslutninger, samtidig med, at alt ikke skal beskyttes i dag til en vandstand, der – måske, indtræffer om 200 år.

Indstillingen er derfor, at beslutninger om designvandstand og sikringshøjde er holdbar 50-100 år frem i tid, hvorefter der er behov for et eftersyn på baggrund af den mellemliggende havniveaustigning og en øget viden om forventede havniveaustigninger efterfølgende. Dette understøtter rettidige investeringer og en tilstrækkelig investeringshorisont, der håndterer de gradvise havniveaustigninger og stormfloder i den mellemliggende periode.

7.2 Modelberegninger for ekstreme stormhændelser fra syd og nord

Delundersøgelsen af sikkerhedsniveauer for stormflodssikring af hovedstadsområdet omfatter modeltekniske oversvømmelsesberegninger til at estimere tilhørende udbredelser og vanddybder ved ekstreme højvande. Endvidere anvendes oversvømmelsesmodelleringer til estimering af ekstremvandstande og vandstandsgradienter langs Øresundkysterne i hovedstadsområdet.

Modelopsætningen for oversvømmelsesberegningerne bygger på to DHI MIKE 21 FM modeller, som i 2018 blev anvendt ifm. med kortlægning af faren og risikoen for oversvømmelse i de 14 risikoområder i Danmark til opfyldelse af plantrin 2 i anden planperiode af EU's oversvømmelsesdirektiv (Kystdirektoratet, 2020).

Der er i forbindelse med forundersøgelse udviklet to modelopsætninger for oversvømmelsesberegninger for stormflodshændelser fra henholdsvis syd og nord. Forudsætningerne for disse to modelopsætninger, såsom modeldomæne, terræn- og dybdeforhold, ruhedskoefficienter, stormflodskurver og særlige geografiske forhold mv., beskrives i de følgende afsnit. Til oversvømmelsesberegningerne anvendes den nyeste version af MIKE 21 FM fra 2023.

7.2.1 Modeldomæne

Der er opsat to modeldomæner for hele Øresund, som anvendes til oversvømmelsesberegninger ved stormflodshændelser fra nord og syd. Modeldomænerne er fastlagt med udgangspunkt i at kunne genskabe de særlige strømningsforhold og varierende vandstandsgradienter i Øresund ved enten en ekstremhændelse fra nord eller fra syd. På trods af bestræbelsen for at udvikle ét modeldomæne, som vil kunne anvendes til stormflodshændelser fra nord og syd, har det gennemførte modelleringsarbejde under forundersøgelsen af stormflodssikring af den centrale del af hovedstadsområdet resulteret i, at der skulle opstilles to modeldomæner for at kunne skabe tilfredsstillende modelleringsresultater.

Dette skyldes at vandgennemstrømningen i Øresund påvirkes af flere faktorer, herunder en tærskel mellem København og Malmø, samt sundets nordlige indsnævring ved Helsingør og Helsingborg, som kun er 4 km bred. En anden faktor er de historiske hændelser som er valgt til kalibrering af modelopsætningerne. Begge hændelser, 1872-stormfloden for modelopsætning af en ekstremhændelse fra syd og Bodil-stormfloden i 2013 for modelopsætning af en ekstremhændelse fra nord, medførte ekstreme vandstandsforhold med store gradienter til Øresund. Disse gradienter er svære at genskabe i en numerisk model.

For modellering af ekstremhændelser fra syd er modeldomænets afgrænsning valgt i nord ved en grænse som forløber fra Rågeleje til Kullens Fyr (Sverige). Herigennem tages højde for Øresundstragten i modellen. Mod syd er modeldomæne afgrænset ved en grænse nord for Bøgeskov Havn (Stevns) og Falsterbo i Skåne. Ved fastlæggelsen af den nordlig og sydlige modelgrænse er der endvidere taget højde for, at grænserne har omtrent samme længde, og at deres orientering understøtter de overordnede ind- og udstrømningsprocesser ved farvandet nordlige og sydlige ende.



Figur 7.2. Modeldomæne til oversvømmelsesberegninger for ekstremhændelser fra syd.

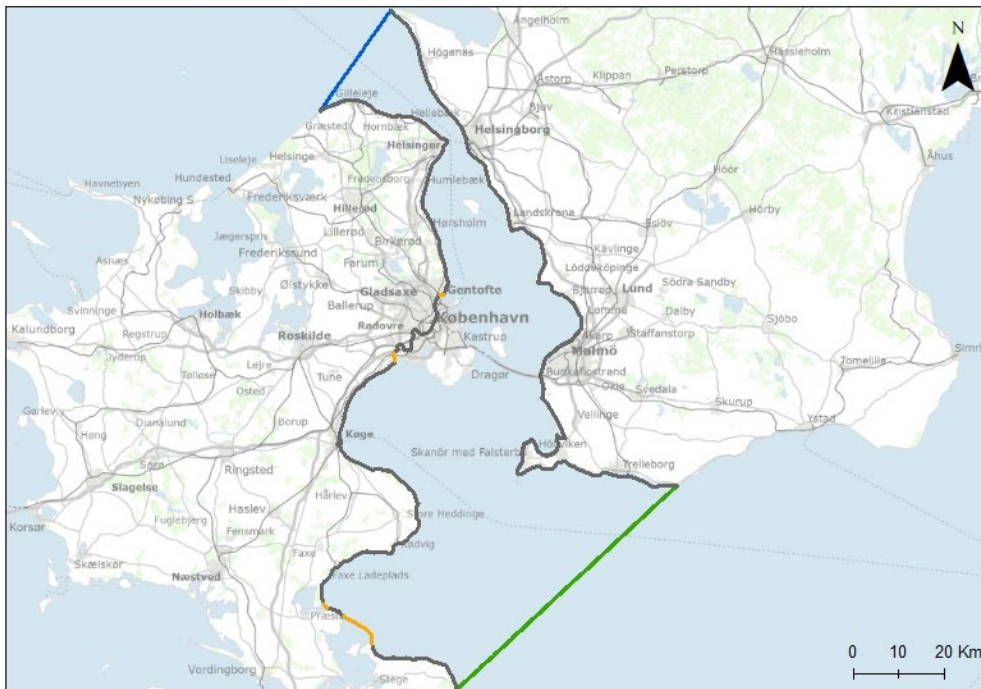
I modelopsætningen for hændelser fra syd bliver modellen forceret igennem den sydlige grænse, dvs. 1872-stormfloden og den tidsafhængige vandstandsstigning under stormen bliver spillet ind i modellen igennem modeldomænets sydlige grænse (blå linje) (se Afsnit 7.2.5). Modeldomænets udløbsgrænse (grøn linje) er defineret som *Free flow Boundary Condition* i modellen. Udstrømningen ved udløbsgrænsen beregnes automatisk i modellen vha. vandstandsgradienterne omkring udløbsgrænsen.

Modeldomænets grænse langs kystlinjerne er i MIKE modellen sat til funktion *Closed Outflow Boundary Condition*. Dette omfatter kystlinjerne nord og syd for hovedstadsområdet samt langs den svenske kyst. Denne indstilling betyder, at vandet, der når modelgrænsen, ikke kan forlade modellen; dog fortsat med en kontinuerlig beregning af de hydrauliske forhold langs grænsen under forudsætning af normale strømningforhold. Langs disse kystområder beregnes oversvømmelsesudbredelse ind i landet ikke og modelteknisk kan vandet under modelkørslen "stuve op" langs disse grænser. Det vurderes dog, at denne afvigelse fra de reale forhold ikke har større betydning i forhold til modelresultaterne af vandstandsudviklingen i hele Øresund og vandstandsudviklingen langs hovedstadens kystlinje.

For modellering af ekstremhændelser fra nord er modeldomænets afgrænsning i nord den samme som ved modelopsætningen for hændelser fra syd. Også her forløber den nordlige modelgrænse fra Rågeleje til Kullens Fyr (Sverige). I modellens sydlige del er modeldomænet blevet udvidet til også at omfatte Faxe Bugt og vandområdet syd for Skanør-Falsterbo og Trelleborg i den svenske del af Øresund. Den sydlige modelgrænse forløber fra Møns Klint til Smygehuk i Sverige, som vist i Figur 7.3.

I modelopsætningen for hændelser fra nord bliver modellen forceret igennem dens nordlige grænse ved at indspille de lokale vandstandsforhold under Bodil-stormen i 2013 (blå linje). Modeldomænets udløbsgrænse (grøn linje) er også defineret som *Free flow Boundary Condition* i modellen. Udstrømningen ved udløbsgrænsen bliver dog understøttet af et tidlig vandstandsforløb som er registreret i Rødvig under Bodil-stormen. Denne del af modelopsætning uddybes i Afsnit 7.2.4.

Modeldomænets grænse langs kystlinjerne er også defineret som *Closed Outflow Boundary Condition*, tilsvarende ved modelopsætning for stormhændelser fra syd. Ved fire korte strækninger langs modellens landegrænser, er der anvendt *Free flow Boundary Condition* i modellen (orange linje), som kun tillader en udstrømning af vandet. Denne opsætning er valgt for at tilgodese vandets udstrømning ind i Præstø Fjord og Bøgestrøm/Stege Bugt. Udstrømningen ved disse modelgrænser beregnes automatisk i modellen baseret på vandstandsgradienterne omkring udløbsgrænsen.



Figur 7.3. Modeldomæne til oversvømmelsesberegninger for ekstremhændelser fra nord.

7.2.2 Terræn- og dybdeforhold

Oversvømmelsesberegninger gennemføres på terrændata fra 2022, som bygger på Danmarks Højdemodel (DTM) fra SDFI med en opløsning på $0,4 \text{ m} \times 0,4 \text{ m}$. Disse terrændata er anvendt i begge modelopsætninger, dvs. for hændelser fra syd og fra nord. Data er suppleret med i alt 46 eksisterende diger (kystdiger og indlandsdiger) med en samlet længde på ca. 65 km (Figur 7.4). Terrændata er endvidere kontrolleret i forhold til større veje og eventuelle vejunderføringer, som hydraulisk kan bevirke en større oversvømmelsesudbredelse.

Harrestrup Å er integreret i modellen ved hjælp af højdedata, og broer er fjernet for ikke at blokere en potentiel oversvømmelsesudbredelse længere ind i baglandet. Områder af særlig interesse, såsom diger, er repræsenteret med en opløsning på $0,4 \text{ m} \times 0,4 \text{ m}$ og en punktafstand på 5 m.

Begge modelopsætninger inkluderer også Lynetteholmen i dens færdige udstrækning, som for øjeblikket er under etablering (Kapitel 3).



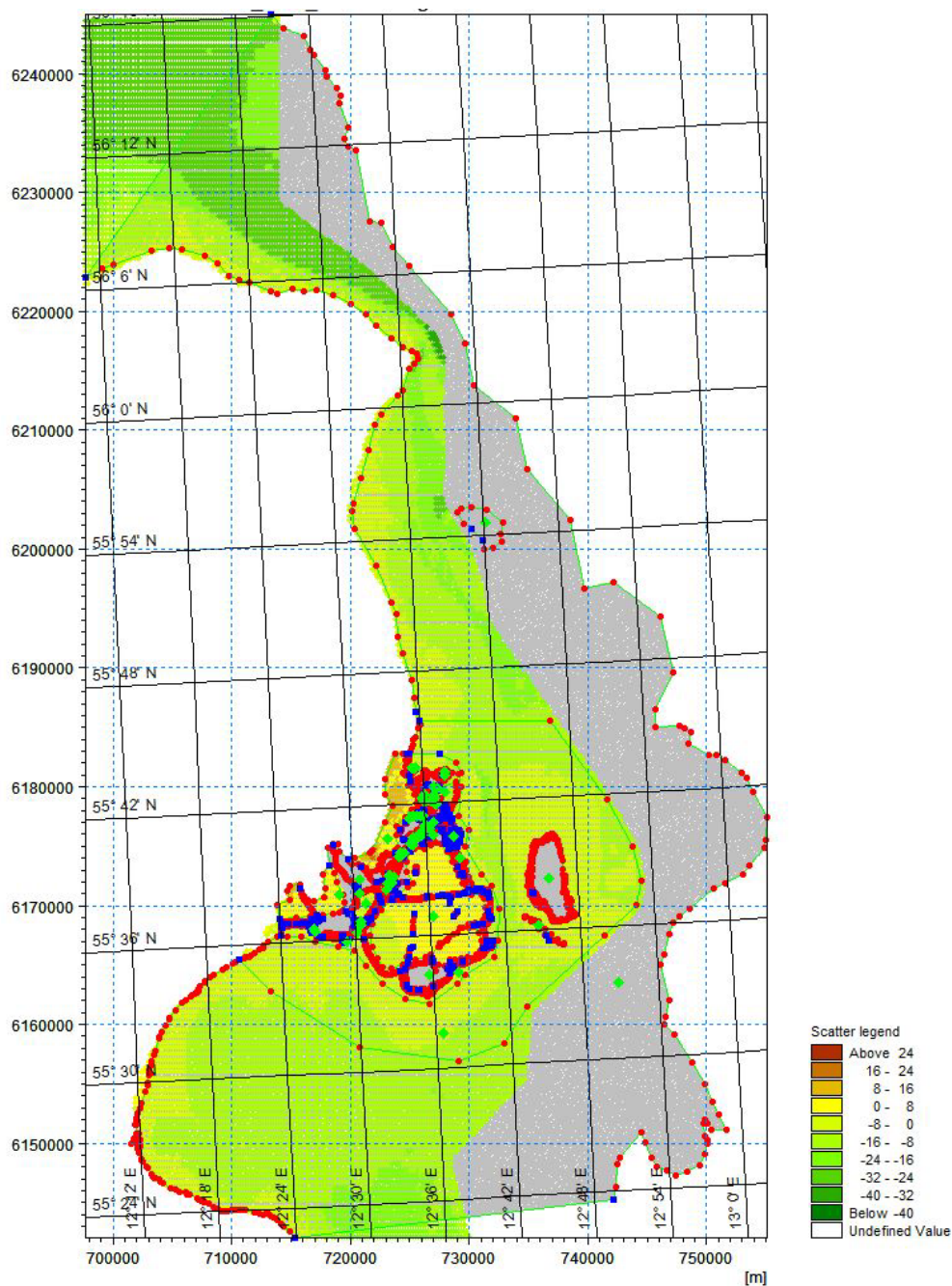
Figur 7.4. Diger inkluderet i modelopsætningen.

I begge modelopsætninger er der taget højde for en række tekniske konstruktioner, som påvirker vandgennemstrømningen og herigennem vandstandsforholdene i Københavns Havn. I alt er syv konstruktioner inkluderet i modellen: Jernbanebroen, Sjællandsbroen, Stigbordene, Bryggebroen, Langebro, Lille Langebro, Knippels bro og Inderhavnsbroen. Konstruktionernes tekniske dimensioner er fra Rambøll (2020) suppleret med yderligere tilgængelige oplysninger om anlæggene, jf. Figur 7.5. Endvidere tager modelopsætningerne højde for Lynetteholmen og forholdene ved Trekroner Fort.



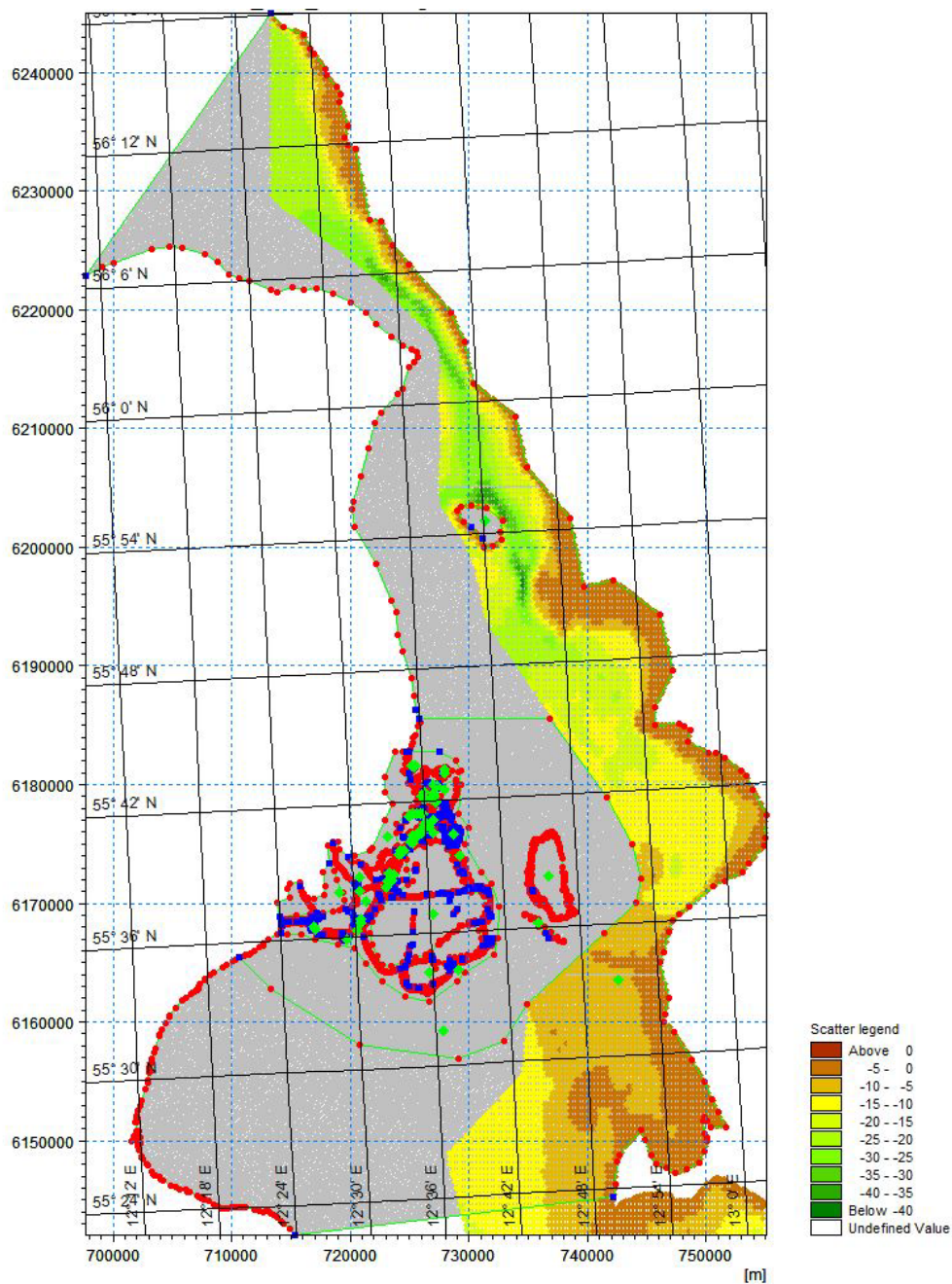
Figur 7.5. Tekniske konstruktioner inkluderet i Københavns Havn.

Beskrivelsen af vanddybderne i begge modelopsætninger tager udgangspunkt i Danmarks Dybdemodel (DDM) fra 2022 udgivet af Geodatastyrelsen. DDM er en dybdegennemsnitlig digital batymetrisk model, der dækker Danmarks eksklusive økonomiske zone (EEZ). Modellen har en gitteropløsning på 50 m og er baseret på en samling af hydrografiske undersøgelsesdatasæt og historiske kilder. Dybdeforholdene i Københavns Havn omkring de tekniske konstruktioner er korrigeret og tilpasset for at opnå mere retvisende dybde data til modelberegningerne.



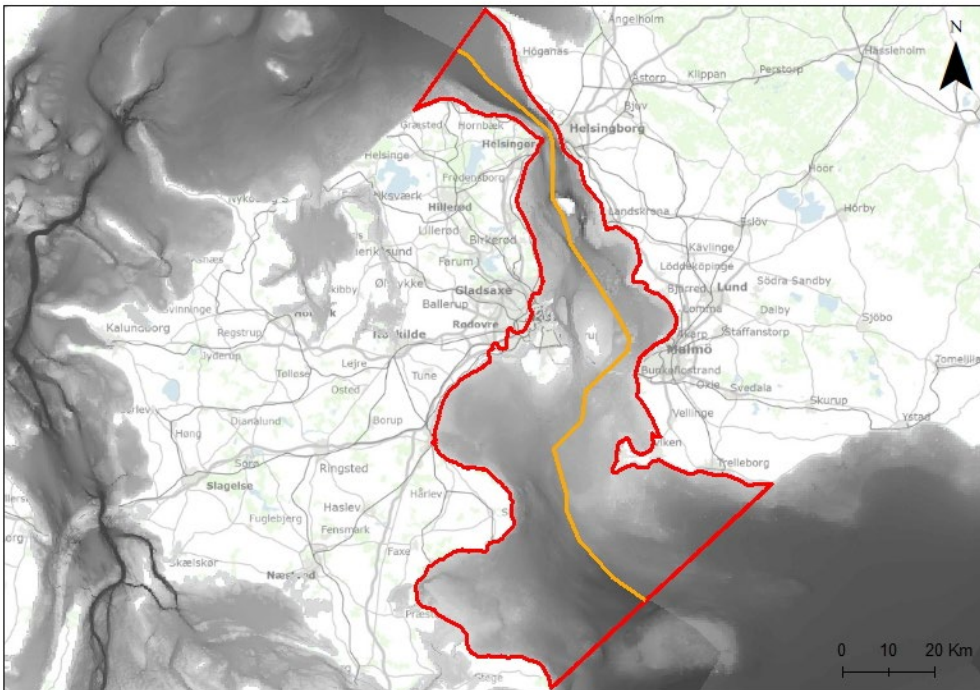
Figur 7.6. Anvendt dybde data fra Danmarks dybde model (DDM) for den danske del af Øresund i modellen for hændelser fra syd.

Figur 7.6 viser i anvendte dybde data fra Danmarks dybde model (DDM) for den danske del af Øresund. For den svenske del af Øresund er anvendte dybde data fra Baltic Sea Bathymetry Database (BSBD), som er udviklet af det svenske søfartsvæsen i samarbejde med andre Østersølande. Formålet med databasen er at levere en homogen batymetrisk model for hele Østersøen ved specifikke opløsninger. Dybde data har en opløsning på 500 m og er modelle-rede data (Figur 7.7). For sammenlægning af begge dataset er de svenske dybde data omreg-net til dybdelinjer, som efterfølgende er sammenlignet og tilpasset i forhold til de danske ra-ster-dybde data i en opløsning 50 m * 50 m.

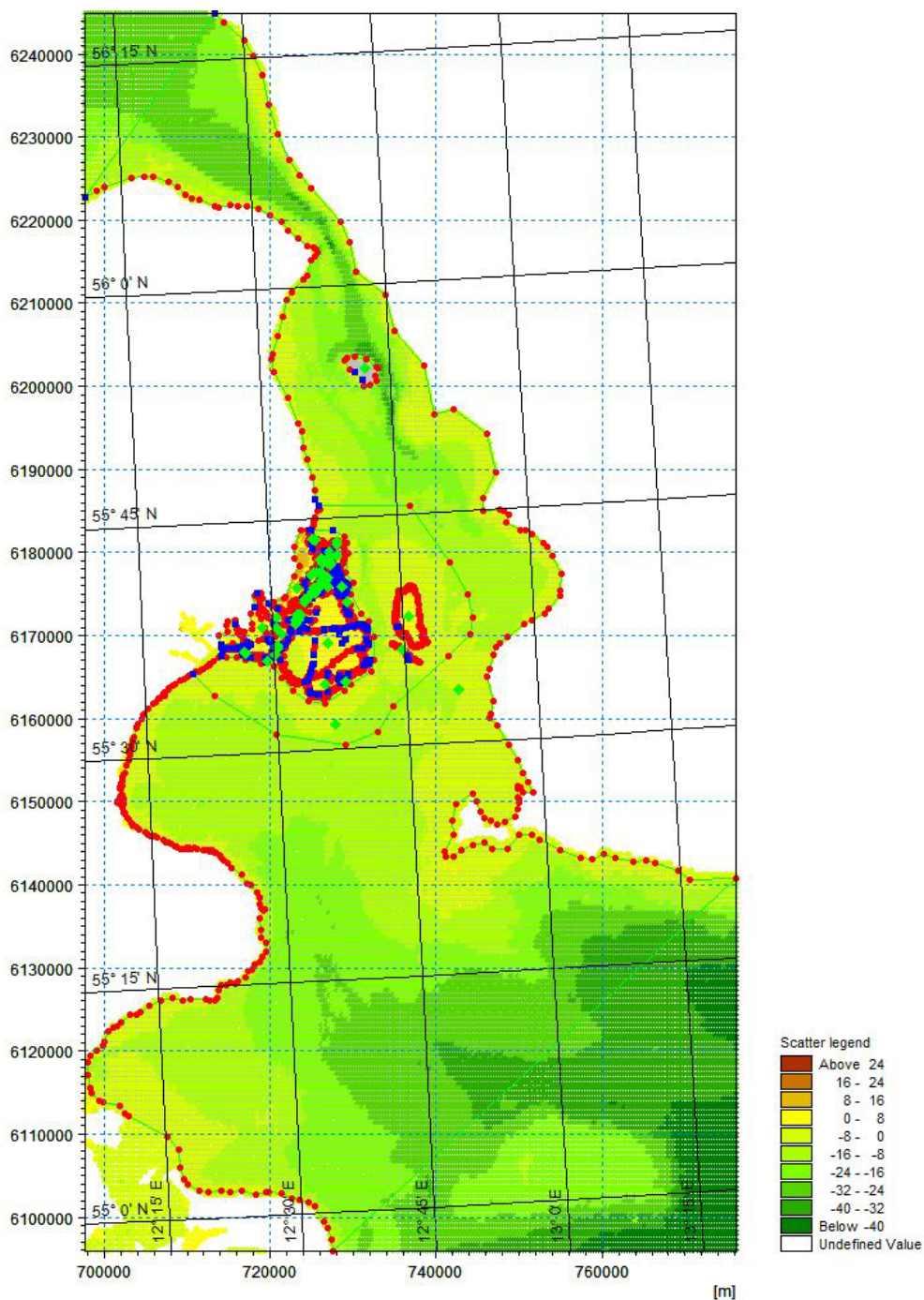


Figur 7.7. Anvendt dybde data fra Baltic Sea Bathymetry Database (BSBD) for den svenske del af Øresund i modellen for hændelser fra syd.

For modelopsætningen til beregning af hændelser fra nord er der anvendt den samme tilgang som ved modelopsætningen for hændelser fra syd. Dybdeforholdene i Øresund er konstrueret ved at sammenlægge dybde data fra Danmarks dybdemodel (DDM) og Baltic Sea Bathymetry Database (BSBD). Dybde data fra begge datakilder for modellen til beregning af hændelser fra nord er vist i Figur 7.8 og Figur 7.9.

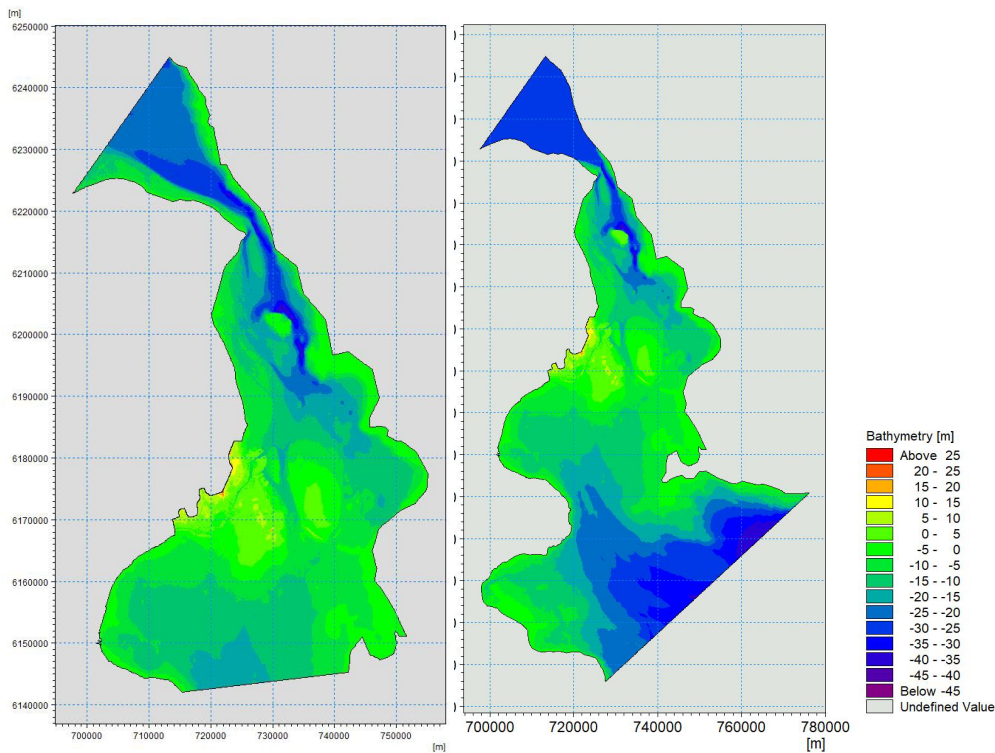


Figur 7.8. Opdeling af dybde data for den danske og svenske del af Øresund til beregning af ekstremhændelser fra nord.



Figur 7.9: Anvendt dybde data fra Danmarks dybdemodel (DDM) og fra Baltic Sea Bathymetry Database (BSBD) sammenlagt til beregning af ekstremhændelser fra nord.

Terrændata og data for dybdeforhold i Øresund er efterfølgende sammenlagt i én terræn- og dybdemodel for begge modelopsætninger, jf. Figur 7.10. Modelopsætningerne har en dynamisk opløsning, hvor områderne med særlig interesse, fx diger, har en meget høj opløsning ned til 6 m. Beregningsresultater (jf. Kapitel 8) bliver eksporteret i en opløsning på 5 m * 5 m.



Figur 7.10. Samlet højde- og dybdemodel baseret på Danmarks Højdemodel (DTM), Danmarks Dybdemodel (DDM) og Baltic Sea Bathymetry Database (BSBD) til beregning af hændelser fra syd (venstre) og hændelser fra nord (højre).

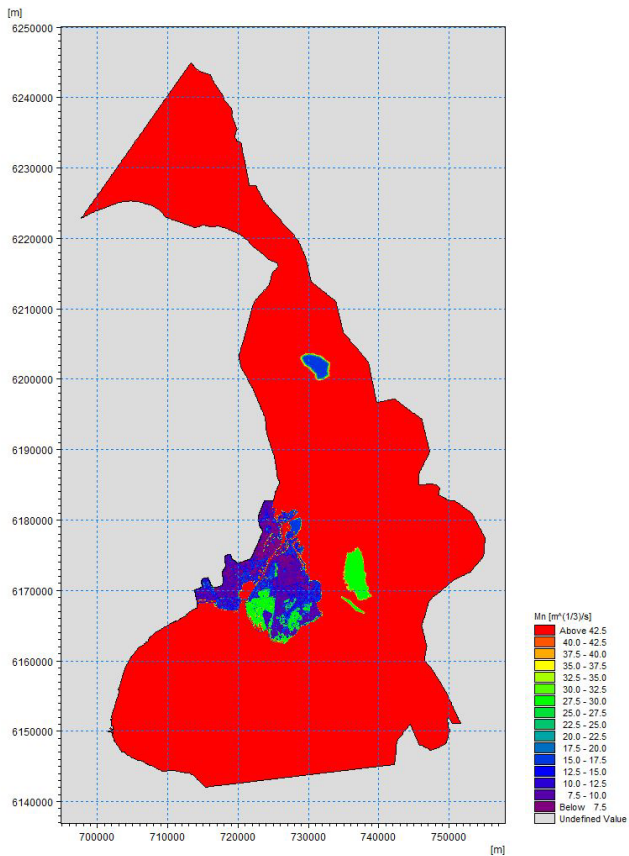
7.2.3 Ruhedsparemetre

Ruheden af overfladen, som påvirker strømningssimuleringen i den hydrodynamiske modellering, er inkluderet i begge modelopsætninger med Manning's ruhedskoefficienter (n), som angivet i Tabel 7.1.

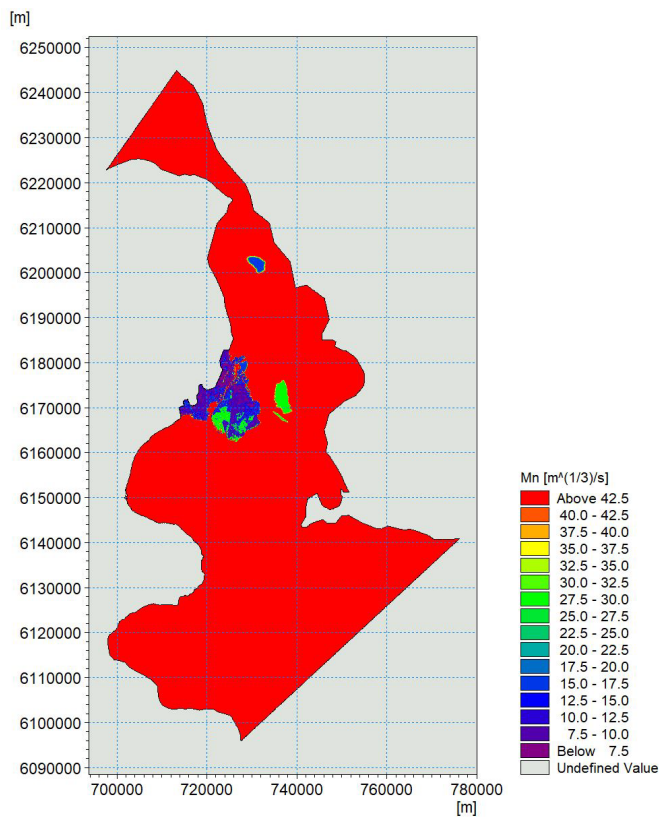
Tabel 7.1. Manning's ruhedskoefficienter.

Element	Værdi n [$m^{1/3}/s$]
Høj bebyggelse, bykerne	0,140
Skov	0,120
Lav bebyggelse	0,100
Klitter, diger	0,070
Lav bevoksning, hede	0,050
Vådområde	0,035
Søer, vandløb	0,023

Alle områder er repræsenteret som polygoner i modellen. Polygonerne er brugt til at skabe Ruheds-scatter-data og derefter en ruhed-inputfil til MIKE modellerne. Mannings n -værdier blev konverteret til Mannings reciproke M -værdi, vist i Figur 7.11 og Figur 7.12.



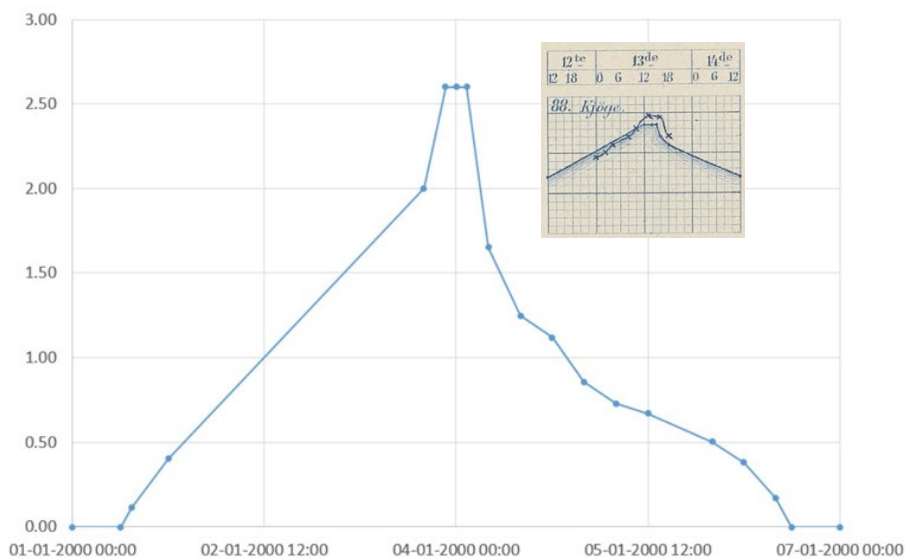
Figur 7.11 Beskrivelse af ruheden M , anvendt i modelopsætningen til beregninger for hændelser fra syd.



Figur 7.12 Beskrivelse af ruheden M , anvendt i modelopsætningen til beregninger for hændelser fra nord.

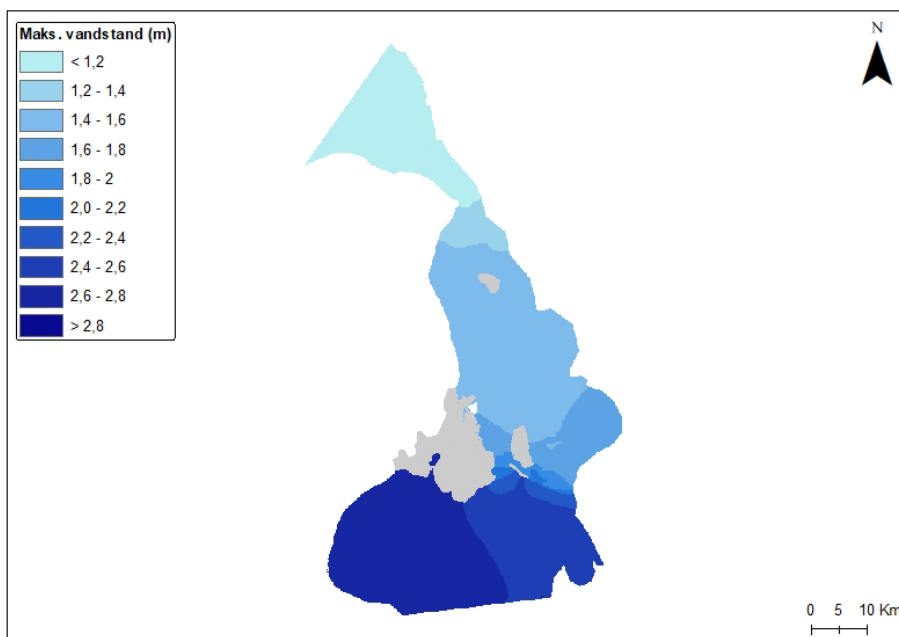
7.2.4 Stormflodshydrograf og modelkalibrering

Oversvømmelsesberegninger gennemføres for stormflodshændelser fra henholdsvis nord og syd, og beregningsmodellen er kalibreret op imod to historiske hændelser. For en stormflodshændelse fra syd er stormfloden i november 1872 anvendt som sydlige randbetingelse, da hændelsen anses meget ekstrem og danner grundlaget for vurderingen af en øvre grænse for stormflodsvandstande i området, jf. Afsnit 5.5. Stormflodshydrografen, som anvendes på den sydlige modelgrænse til forcering (se også Figur 7.2), er tilpasset Coldings (1881) optegninger af stormfloden i Køge med en peak-vandstand på 2,60 m i fire timer (se Figur 7.13).



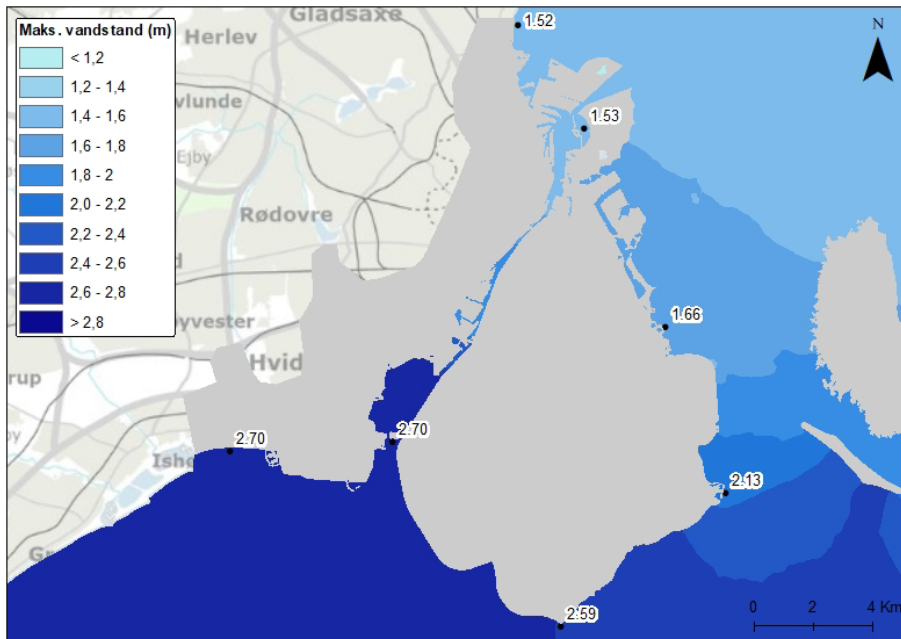
Figur 7.13. Stormflodshydrograf for modelforcering af en ekstremhændelse fra syd.

Resultater af modellering viser et varieret vandstandsforløb langs kysten fra Køge mod København, omkring Amager og videre nordpå. De modellerede vandstande viser en tydelig effekt af tærsklen ved Drogden, som medfører en opstuvning af vand mod syd i området.



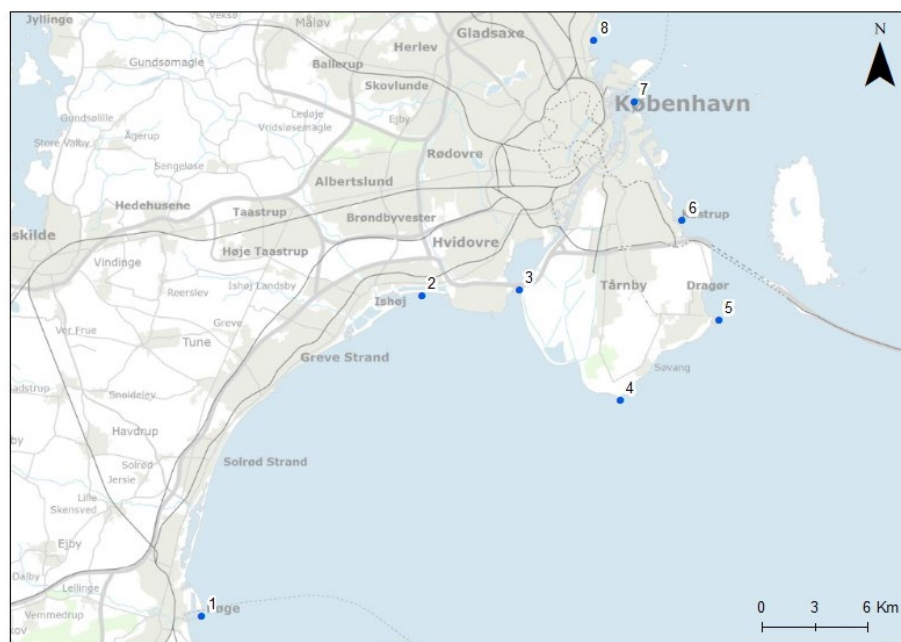
Figur 7.14. Maksimal vandstand under stormen 1872 og vandstandsgradienten langs Øresundskysten.

En nærmere betragtning af vandstandsvariationen langs hovedstadsområdet kystlinje (Figur 7.15) tydeliggør vandstandsvariationer og gradienten mellem Avedøre Holme og Nordhavn. Til at undersøge vandstandsvariation langs kysten er der udvalgt otte lokaliteter som referencepunkter (Figur 7.16) til at se, om det er stormflod fra syd eller nord, som har størst betydning for fastlæggelse af designvandstand for den pågældende lokalitet.



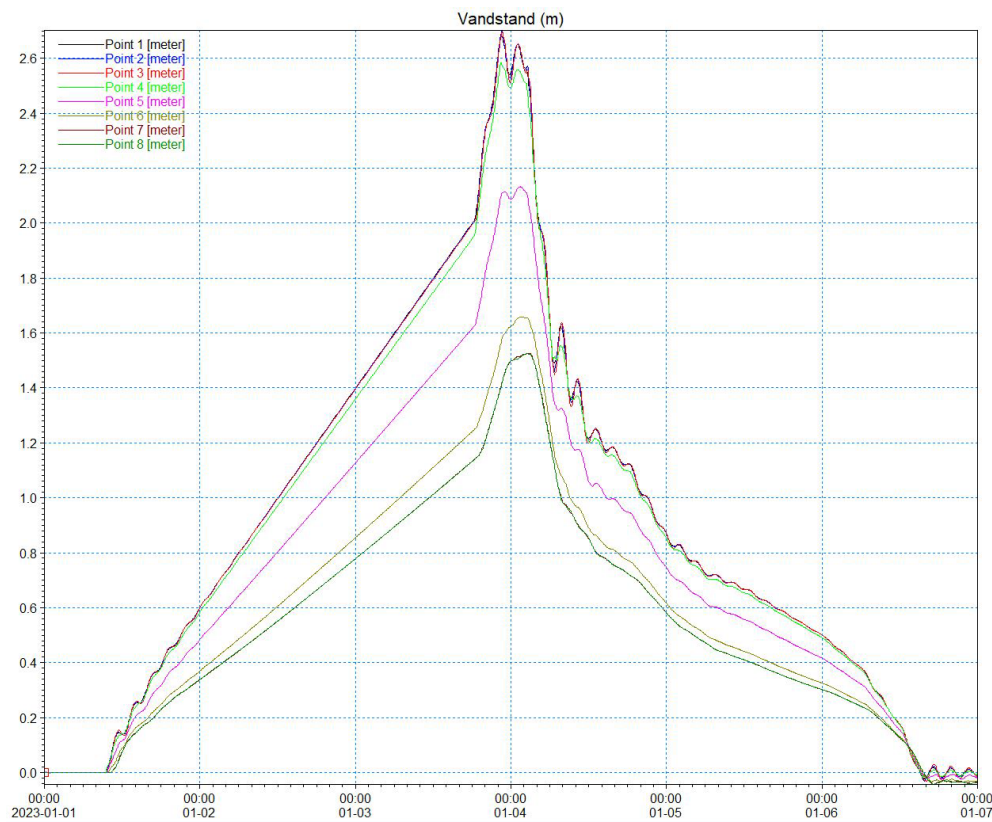
Figur 7.15. Vandstandsgradienten langs hovedstadskysten ved modelberegninger af 1872-stormfloden. Tallene angiver maksimalvandstand i referencepunkterne.

Vandstandsforskellen mellem Avedøre Holme og Dragør Fort modelleres til omkring 0,60 m (Figur 7.15). Forbi Kastrup Lufthavn bliver gradienten markant større og udgør fra Avedøre Holme til Amager Strandpark omkring 1,05 m og til Svanemøllestrand ca. 1,20 m.



Figur 7.16. Lokaliteter for referencepunkterne.

Modelberegningernes vandstandsforløb i de otte referencepunkter er vist i Figur 7.17. Herigennem kan det beregnede vandstandsforløb sammenlignes med stormflodshydrografen, der anvendes på modellens sydlige rand (Figur 7.13). De beregnede vandstandsforløb tillader en inddeling i tre områder. I punkterne Køge, Avedøre Holme og Kalvebodløbet beregnes de højeste vandstande i referencepunkterne 1, 2 og 3. For referencepunkt 4, Kongelundsfortet, modelleres en vandstand, som er omkring 0,10 m lavere end i referencepunkterne 1, 2 og 3. For referencepunkt 5 ved Dragør Fort viser modelberegningerne en 50-60 cm lavere maksimalvandstand, dog fortsat med det samme udviklingsløb som i de vestlige referencepunkter. Et tredje område kan defineres af referencepunkterne nord for Kastrup Lufthavn (6, 7 og 8), hvor den højeste vandstand i referencepunkt 6 er ca. 50 cm lavere i forhold til Dragør Fort. Ved de to nordligste referencepunkter falder peak-vandstanden med yderligere 10-15 cm. Inddelingen i disse tre områder uddybes i Afsnit 8.2 i forbindelse med fastlæggelse af sikringsniveauerne for hovedstadsområdet.



Figur 7.17. Beregnet vandstandsforløb i de otte referencepunkter ved modelberegninger af 1872-stormfloden.

Maksimalvandstande i referencepunkterne er sammenholdt med andre gennemførte modelberegninger af stormen 1872. I modelleringseksperimentet af Andrée et al (2023) beregnes en maksimalvandstanden i Køge til 252 cm og for København Nordhavn en vandstand på 114 cm (Case O). COWI (2016) modellerer den historiske 1872 stormflod med en vandstand på 2,92 m på modellens sydlige modelrande. Tabel 7.2 sammenstiller modelleringsresultater af maksimalvandstanden.

Tabel 7.2. Sammenstilling af modellerede maksimalvandstande med udgangspunkt i stormen 1872.
 Kilde: Andrée et al (2023), COWI (2016) og DMI (2024).

Lokalitet	Delundersøgelse Sikringsniveauer [cm]	COWI [m]	Andrée et al [cm]	DMI (2024), referencekørsel [cm]
Køge	269	2,7 – 2,8	252	250.5
Avedøre Holme	270	2,6 – 2,7		
Kongelundsfortet	259	2,6 – 2,7		
Dragør Fort	213	2,1 – 2,2		
Amager Øst	166	>1,5		
Nordhavn/Svanemølle	153	>1,5	114	110.3

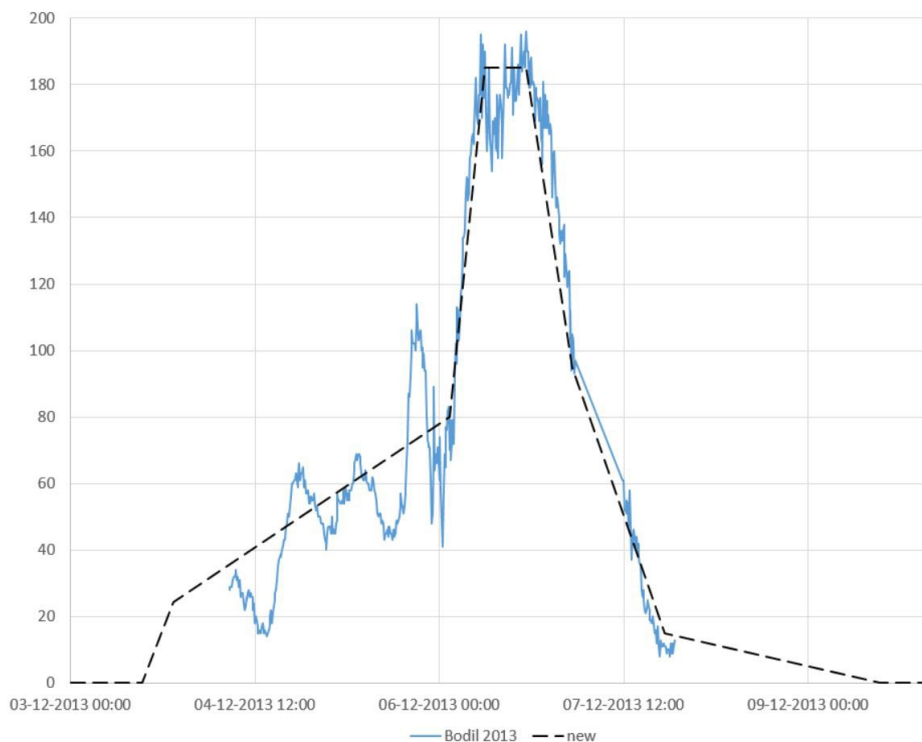
Sammenstillingen af maksimalvandstande med udgangspunkt i stormfloden 1872, jf. Tabel 7.2, tyder på at nærliggende modelberegninger resulterer i 30-35 cm højere vandstande langs hovedstadens østkyst, dvs. fra Amager Øst til Svanemølle. Det skal bemærkes, at modelberegningerne er gennemført uden vindpåvirkning. På tidspunktet af de højeste vandstande under stormen 1872 blæste vinden fra nordøstlig retning. Inddragelsen af en sådan vindpåvirkning i modelberegningerne vil kunne reducere de højeste vandstande i den nordlige del af området.

De foreliggende modelberegninger uden vindpåvirkning viser dog en vandstandsgradient ml. Avedøre Holme og Nordhavn/Svanemølle på 118 cm. Ved COWI (2016) udgør vandstandsgradienten mindst 110 cm, og modelleringsekperimentet af Andrée et al (2023) resulterer i en vandstandsgradient ml. Køge og Nordhavn i 138 cm. DMI's (2024) supplerende undersøgelser viser ca. 140 cm ml. Køge og København (for referencekørslen, med små variationer alt efter valg af kørsel). For alle fire modelopsætninger og –beregninger er ens, at vandstandsgradient mellem den sydvestlig del af hovedstadsområdet og den nordøstlig del af hovedstadsområdet er mindst 100 cm.

Det vurderes på baggrund af sammenstilling med andre modelberegninger, at modellen kan genskabe vandstandsforholdene langs Øresundskysten tilfredsstillende, og hydrografen er anvendt til følgende yderligere modelsimuleringer med reference i år 1990:

- Peak-vandstand på 3,80 m (øvre grænse for stormflodsvandstand i 2025)
- Peak-vandstand på 4,40 m (øvre grænse for stormflodsvandstand i 2075 + 60 cm havspejlstigning)
- Peak-vandstand på 5,00 m (øvre grænse for stormflodsvandstand i 2125 + 123 cm havspejlstigning)

For en ekstrem stormflodshændelse fra nord er stormfloden Bodil (5.-6. december 2013) anvendt som nordlig randbetingelse. Hændelsen er valgt som basis for vurderingen af stormfloder fra nord, da der ikke i litteraturen er sikker evidens for stormfloder fra nord tilbage i tid med havniveauer som overstiger stormen Bodil. Den målte vandstand på 1,72 m DVR90 (1,68 m DVR90, trendfri 1990) under stormen Bodil udgør således den højest officielt målte vandstand for målestation Københavns Havn (selvom andre ældre og højere registreringer forekommer). Stormflodshydrografen, som anvendes på den nordlig modelgrænse (se også Figur 7.3) til forcering er vist i Figur 7.18.

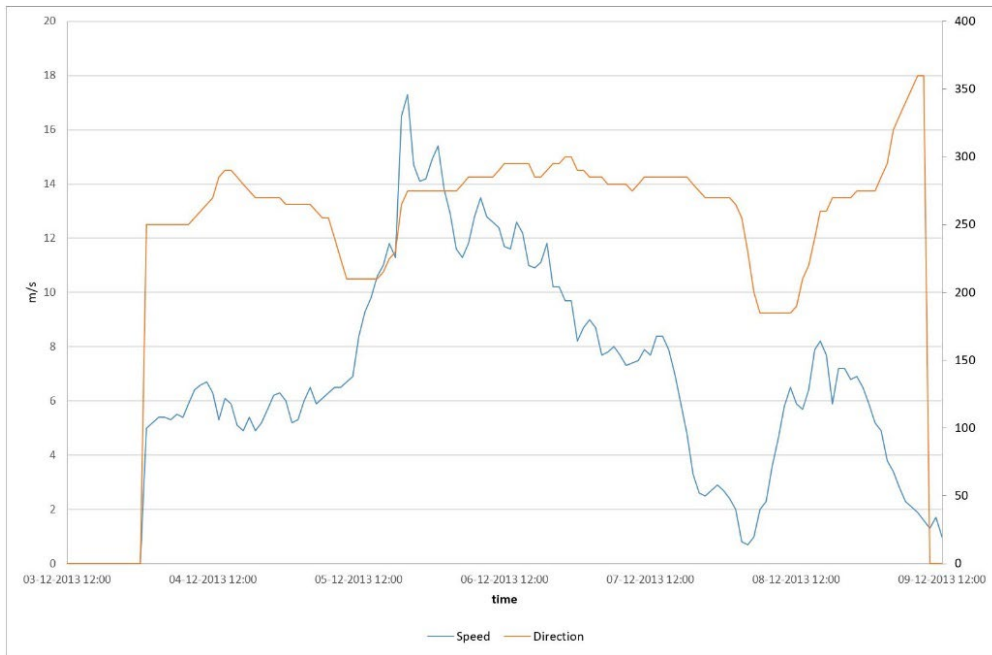


Figur 7.18. Stormflodshydrograf for modelforcering af en ekstremhændelse fra nord (blå linje: vandstandsforløb ved Hornbæk Havn; stiplede linje: stormflodshydrograf til forcering af modellen).

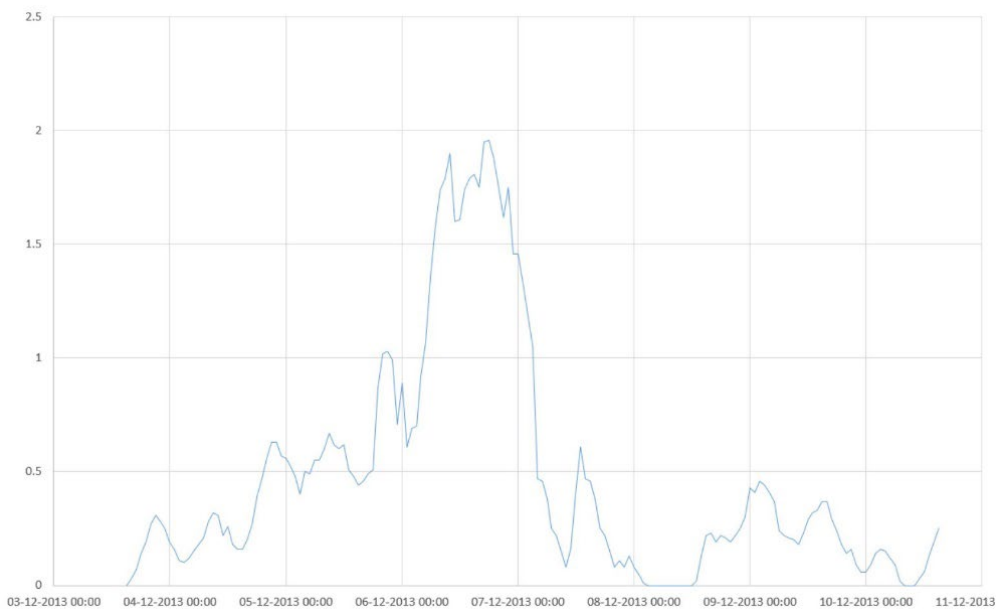
Under Bodil-stormen bredte sig et kraftigt vindfelt mod øst til resten af landet. I forbindelse med lavtrykkets passage over Danmark drejede vinden fra sydvest til nordvest og medførte store oversvømmelser især ved Nordsjællands kyst og i Roskilde- og Isefjord. I Køge Bugt blæste den kraftige nordvestenvind vandet væk fra de sydøstvendte kyster. I Køge og Rødvig Havn blev der målt vandstande på under 1,50 meter under daglig vande.

For at genskabe vandstandsforløbet langs kysten fra Københavns Havn til Køge under Bodil-stormen i modelberegningerne, er forcering af modellen udvidet med et vindfelt, der tager højde for de målte middelvindhastigheder og vindretninger under Bodil-stormen. Vindfeltet er defineret over modeldomænet geografisk konstant, hvorimod der er taget højde for den tidslige udvikling af vindhastigheden og vindretning, jf. Figur 7.19.

Under kalibrering af modellen til beregning af Bodil-stormen viste det sig dog, at de meget lave vandstande i Køge og Rødvig Havn ikke kunne opnås udelukkende ved en kraftig nordvestlig vindforcering. En udvidelse af modeldomænet i dets sydlige del ved at omfatte Faxe Bugt og vandområdet syd for Skanør-Falsterbo og Trelleborg i den svenske del af Øresundet gav ikke et nævneværdigt bidrag til at sænke vandstande i Køge og Rødvig Havn under daglig vande. Der blev derfor valgt i modelopsætningen at fastlægge et vandstandsforløb i udløbsgrænsen (grøn linje, Figur 7.3) ved hjælp af en forsimplet hydrograf. Vandstandshydrografen (Figur 7.20) tager udgangspunkt i vandstandsmålingerne i Rødvig Havn.

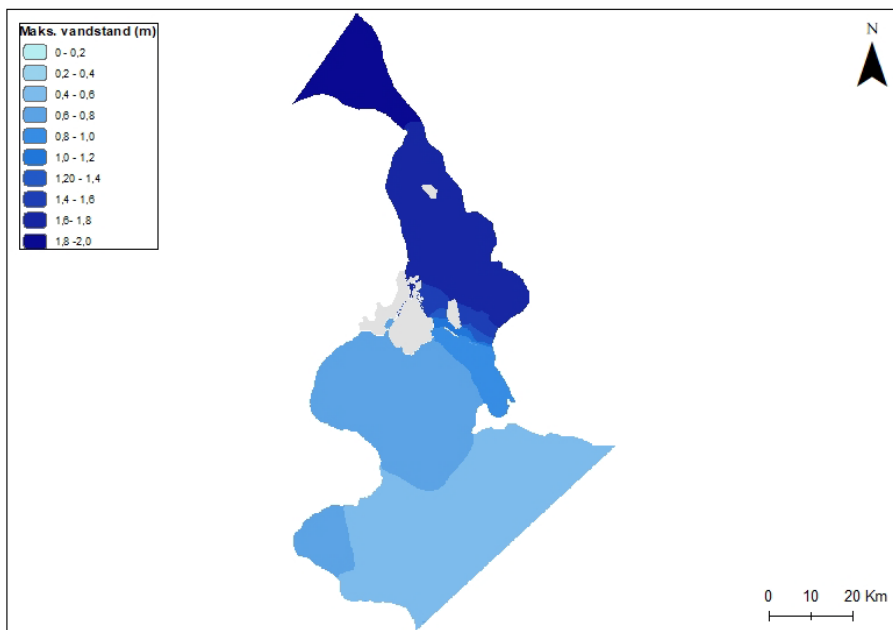


Figur 7.19. Middelvindhastighed og vindretning registreret ved Københavns Lufthavn fra 4.-9. december 2013.



Figur 7.20. Vandstandshydrograf for den sydlige udløbsgrænse i modelopsætning til kalibrering af modelberegningerne for Bodil-stormen.

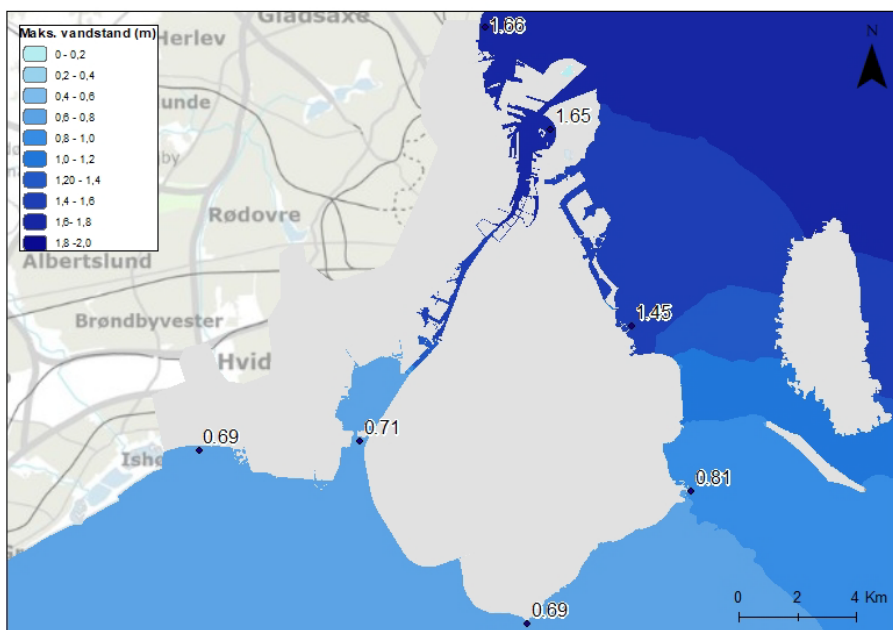
Resultater af modelleringen viser et varieret vandstandsforløb langs kysten fra København Havn til Køge. De modellerede vandstande viser også ved stormhændelser fra nord, at tærskelen ved Drogden har en tydelig effekt, der medfører en opstuvning af vand mod nord i området (Figur 7.21).



Figur 7.21. Maksimal vandstand under Bodil-stormen og vandstandsgradienten langs Øresundkysten.

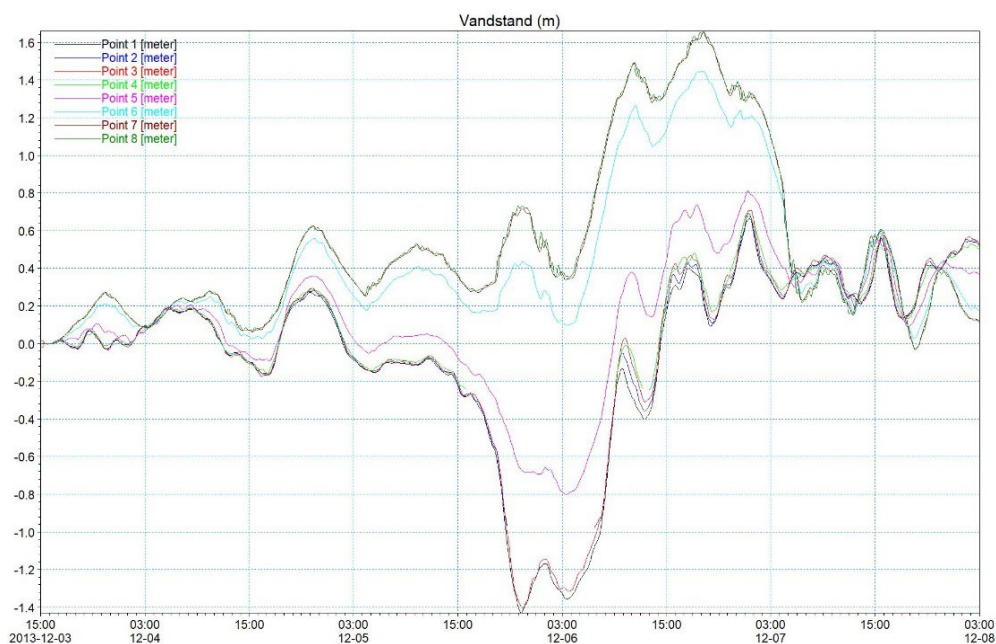
Figur 7.22 viser vandstandsvariationen langs hovedstadsområdet kystlinje og gradienten mellem Nordhavn og Avedøre Holme. Figuren viser endvidere at den maksimale vandstand målt i Københavns Havn på 1,72 cm DVR90 ikke til fulde reproduceres. Afvigelsen ligger dog under 10 cm og modelleringsresultaterne anses derfor som tilfredsstillende.

Resultaterne i de otte referencepunkter (Figur 7.16) viser en vandstandsgradient mellem Nordhavn og Avedøre Holme på omkring en 1 m. Vandstandsgradienten mellem Avedøre Holme og Dragør Havn beregnes til omkring 10 cm, hvorimod gradienten langs østkysten fra Dragør Havn til Nordhavn udgør 85 cm.



Figur 7.22. Vandstandsgradienten langs hovedstadskysten ved modelkørsel af Bodil-stormen. Tallene angiver maksimalvandstand i referencepunkterne.

Modelberegningernes vandstandsforløb i de otte referencepunkter er vist i Figur 7.23. Herigennem kan det beregnede vandstandsforløb sammenlignes med stormflodshydrografen, der anvendes på modellens nordlige grænse (Figur 7.18). De beregnede vandstandsforløb i referencepunkterne 6, 7 og 8 følger tydeligt stormflodshydrografens forløb. For referencepunkterne 5, 4, 3, 2 og 1 ses den markante sænkning af vandstanden og vandstandsniveauer under daglig vande. Modellen viser dog ikke et vandstandsniveau under 1,50 m under daglig vande ved Køge. Vandstandsniveauet i Køge Bugt overestimeres således i forhold til de målte vandstande under Bodil-stormen. Det vurderes dog, at denne afvigelse har en mindre effekt på vandstandsudviklingen nord for Drogdentræsklen som følge af den markante forskel i vandstandsforløbet mellem referencepunkt 5 og 6. Kurven af vandstandsforløbet i referencepunkt 2 (blå linje) og 4 (lysegrøn linje) er afbrudt i perioden med lavvande, da referencepunkterne "tørlægges" som følge af batymetrien og vanddybden ved de to lokaliteter.



Figur 7.23. Beregnet vandstandsforløb i de otte referencepunkter ved modelberegninger af Bodil-stormen i 2013.

Resultaterne af begge modelsimuleringer for ekstremhændelser fra syd og nord præsenteres yderligere i Kapitel 8.2.

7.3 Dobbelt beskyttelseslinje

Som følge af infrastrukturejernes meget høje sikringskrav for stormflodshændelser har arbejdsgruppen også undersøgt alternative muligheder for at opnå høje sikringsniveauer. Konceptet om dobbelt beskyttelseslinje vurderes til at være velegnet og beskrives derfor i det følgende.

Ved kystbeskyttelse bestående af flere elementer/komponenter opstår rumlige, tidsmæssige og funktionelle sammenhænge mellem sikringselementerne. Kystbeskyttelse bestående af flere elementer betegnes som kystsikringssystemer. Ved at kombinere to elementer til sikring af et område mod oversvømmelse, kan sikkerhedsniveauet forøges betydeligt. Da en række aktører i hovedstadsområdet har behov for et meget højt sikkerhedsniveau, beskrives principperne for konceptet om dobbelt sikringslinje i det følgende. Beskrivelsen bygger på det teoretiske grundlag udarbejdet af Führböter (1987).

Et kystsikringsssystem kan fx bestå af to efter hinanden følgende digelinjer ind i land (jf. Figur 7.24) eller en klitbarriere efterfulgt af en digelinje. For begge eksempler gælder, at den bagvedliggende sikringslinje først aktiveres, når den primære sikringslinje svigter. Et sådant system betegnes som et *parallelt system med én standby redundans*.



Figur 7.24. Principskitse for dobbelt beskyttelseslinje bestående af to diger.

Et system bestående af to digelinjer har et primært dige og et sekundært dige, og kan især findes langs Vadehavskysterne i forbundsstaten Slesvig-Holsten i Tyskland. Disse beskyttelsessystemer går tilbage i tiden og blev anvendt til at imødekomme ønsket om landvinding foran digerne, hvorved primærdiget blev til et sekundært dige, fordi et nyt dige blev bygget foran det oprindelige primære dige.

Det sekundære dige har følgende funktion:

1. Begrænsning af oversvømmelsesudbredelsen i tilfælde af, at det primære dige (havdiget) bryder som følge af en stormflod;
2. Forsinkelse af oversvømmelsesudbredelse i området bag det sekundære dige;
3. Flugtveje;
4. Instrument til at genetablere sikkerhedsniveauet for baglandet mod oversvømmelser efter brud på det primære og sekundære dige (en første lukning af det sekundære dige reducerer allerede det potentielt oversvømmelsestruede område betragteligt).

Det grundlæggende princip bygger på en inddeling/kompartimentalisering af det oversvømmelsestruede område i mindre geografiske enheder (områder). En kompartimentalisering af et oversvømmelsestruet område omfatter også undersøgelse af muligheden for at omdirigere oversvømmelsesvandet til andre geografiske områder ved hjælp af kanaler.

Forøgelsen af sikkerhedsniveauet ved hjælp af to digelinjer bygger på princippet om redundans, som inkluderer et teknisk system, der kræver eksistensen af absolut nødvendige komponenter i dobbelte eller multiple mængder. I tilfælde af en fejl, tager den anden eller følgende komponent over for at udføre den særlige funktion – som her konkret er sikring af hovedstadsområdet mod oversvømmelse.

Ved et system sammensat af to digelinjer repræsenterer $P(E1)$ og $P(E2)$ sandsynligheden for digebrud på henholdsvis den primære og den sekundære digelinje. Princippet om redundans forklares matematisk med multiplikationsreglen af sandsynlighedsteori. Antages det for eksempel at det primære og sekundære dige hver har det samme sikkerhedsniveau på $1/100$, er sandsynligheden for, at begge diger bryder, og baglandet bag det sekundære dige oversvømmes, $1/10.000$. Det er dog mest sandsynligt, at begge diger ikke udføres med samme sikkerhedsniveau på grund af forskellige påvirkninger som følge af vandstand og bølger og forskellig risikoprofil i områderne, der beskyttes.

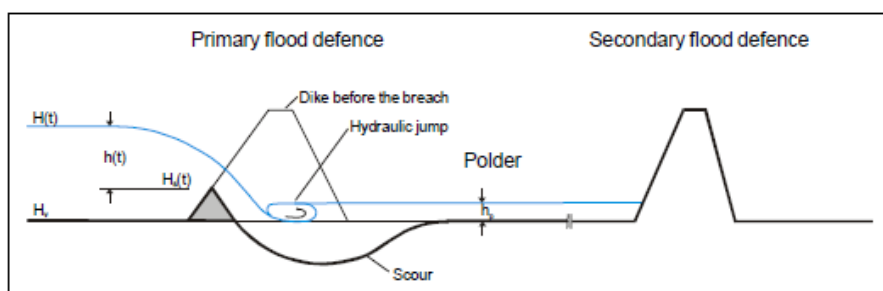
Sikkerhedsniveauet ved begge sikringslinjer ved en ekstremhændelse er afgørende for systemets pålidelighed. Vandstanden foran det sekundære dige vil afhænge af (i) kompartmentets størrelse, (ii) tidsafhængig udvikling af bruddet på primærdiget, (iii) topografien foran digebrud-

det, (iv) stormflodsforløbet og (v) tidspunktet for digebruddet under en stormflod. Bølgeforholdet foran sekundærdiget vil afhænge af (i) bølgediffraktionen af bølger, der løber gennem bruddet, (ii) niveauet på brudbasis, (iii) de lokale bølgeforhold genereret i kompartimentet gennem vindpåvirkning og (iv) vandstanden i kompartimentet. Belastningen af den anden forsvarskomponent er derfor underlagt en stærk rumlig afhængighed af størrelsen på kompartimentet mellem første og anden beskyttelseslinje, jf. Figur 7.25.



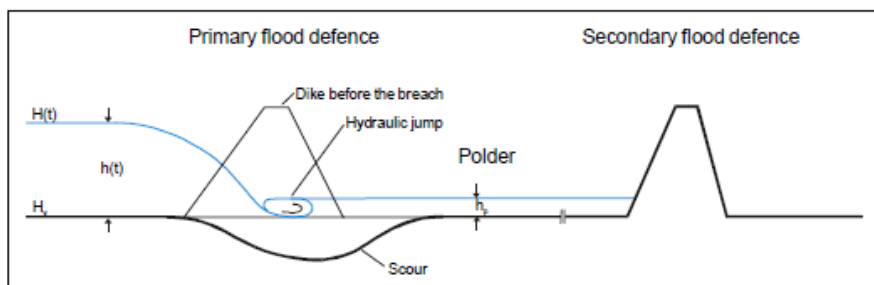
Figur 7.25. Skitse over beregningsparametre ved dobbelt digelinje.

Oversvømmelsen af kompartimentet starter med en konstant tilstrømning af vand ind i området som følge af et digebrud i primærdiget. Karakteristisk for brududviklingen er den tidsafhængige udvidelse og uddybning af bruddet på grund af erosion. Uddybningen af bruddet fortsætter, indtil digets basis er nået. En yderligere uddybning og fordybning af bruddet afhænger af modstanden fra undergrunden. Figur 7.26 viser et mellemstadium af et digebrud, inklusive en rest af den ydre digefod, der fungerer som hydraulisk tærskel.



Figur 7.26. Mellemstadium af et digebrud.

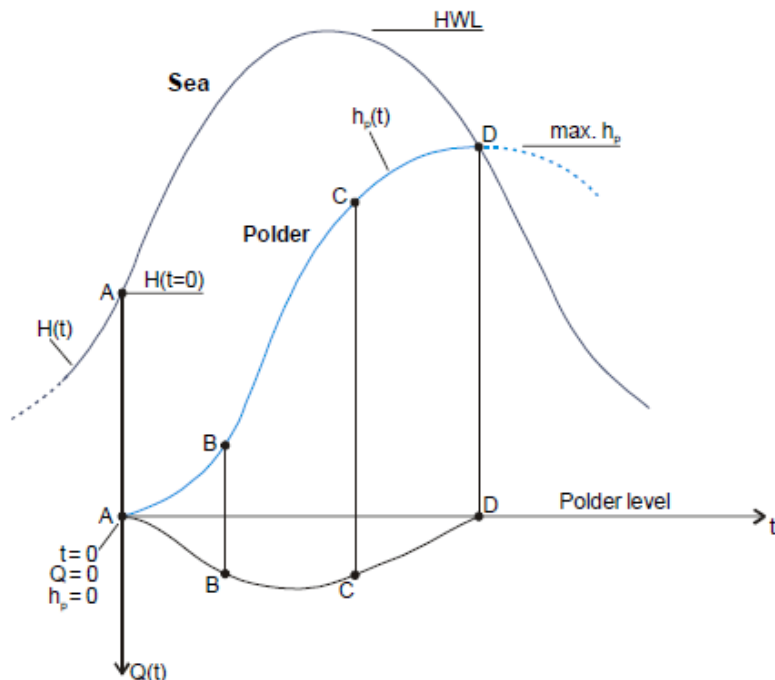
Tærsklen bliver mindre med den fortsatte erosion, indtil tærsklen er eroderet bort, som vist på Figur 7.27.



Figur 7.27. Fuldstændig udviklet digebrud.

Ud over den tidsafhængige udvikling af brudbredden og -dybden, ændres den ydre vandstand foran primærdiget over tid i forhold til stormflodens udvikling. Indstrømningsvolumen igennem

bruddet er således afhængig af den tidsafhængige udvikling af brudbredden og dybdeerosionen, som igen afhænger af stormflodens forløb og stormflodshydrografen, som vist i Figur 7.28.



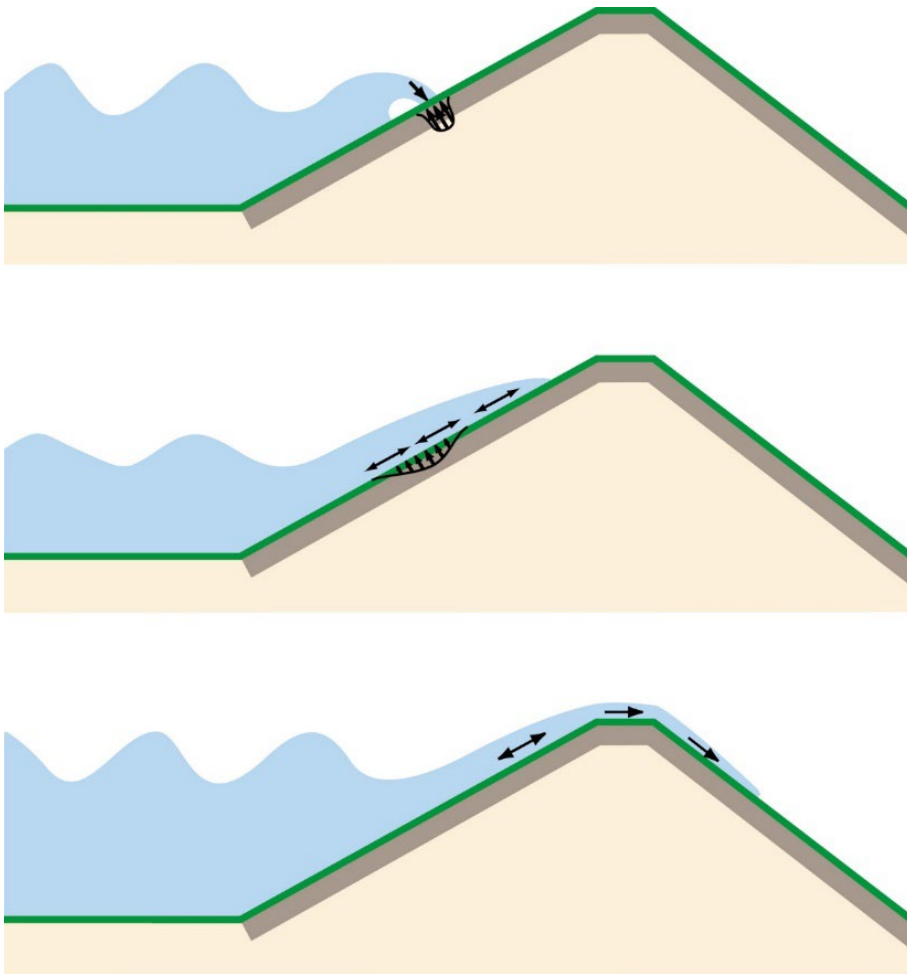
Figur 7.28. Forholdet mellem ydre stormflodshydrograf og fyldningskurve i et kompartiment som følge af brud i ydre digelinje.

I tidsrummet A-B udvides bruddet i diget fra initialisering til digets base, dvs. at overløbshøjden $h(t)$ foran diget bliver til $h(t) = H(t) - H_v$. Tidsrummet B-C er hovedsageligt karakteriseret ved en jævn udvidelse af digebrudsbredden $b = b(t)$. Desuden følger overløbshøjden $h(t)$ nu forløbet af stormfloden $H(t)$. Tidsrummet C-D er kendetegnet ved, at det hydrauliske spring, overgangen fra strygende til strømmende vandbevægelse, reduceres som følge af den stigende oversvømmelsesvandstand i baglandet. Det hydrauliske spring forsvinder til sidst som følge af den stigende vandstand i baglandet.

7.4 Bølgepåvirkning af sikringsanlæg

Digers oversvømmelsesbeskyttende funktion opnås ved deres højde og tværsnitsgeometri. Diger er skrånede konstruktioner, der består af en række komponenter såsom græslag, hældning af forskråning og digehøjde (dikekrone). Disse komponenter har specifikke funktioner til at opretholde digets styrke og modstandskraft under stormflod. Diget skal således være geoteknisk stabilt, så det kan modstå vandtrykket og påvirkning fra bølger. Bølgepåvirkningen opstår under højvandssituationer og omfatter tre typer af påvirkning, jf. Figur 7.29:

- Bølgeslag, som opstår som følge af bølgebrydning på forskråningen;
- Bølgeop- og tilbageløb, som opstår som følge af bølgernes op- og returløb på forskråningen;
- Bølgeoverløb, som sker ved et større bølgeopløb end digehøjden, hvorved bølgerne skubber vand over digekronen.



Figur 7.29. Tre typer af bølgepåvirkning: Bølgeslag, bølgeop- og nedløb, og bølgeoverløb.

Alle tre typer bølgepåvirkning kan føre til digebrud. Bølgeslag og bølgeopløb/returløb kan skabe strukturelle skader på forskråningen som følge af erosion, der medfører et totalt svigt af forskråningen, hvorefter digets krone eroderes bort. Bølgeoverløb skaber erosionsskader ved bagskråningens fod i overgangen til et mere horisontalt terræn bag diget. Her er hastigheden af det nedadløbende havvand størst, samtidig med at der sker en markant retningsændring af vandstrømningen. Historisk set er mange digebrud netop opstået som følge af bølgeoverløb og et digebrud, som startede på bagskråningen.

Forholdet mellem og styrken af de tre typer af bølgepåvirkning er afhængig af bølgeforholdene foran diget, dvs. bølgehøjde, bølgeperiode og bølgeretning, og digets geometriske udformning. Bølgeforholdene foran diget påvirkes i høj grad af højt terræn foran diget. Området foran diget kaldes forlandet og er en zone, hvor indkommende bølgeenergi svækkes, hvilket resulterer i et fald i bølgehøjden foran diget. Forlandet afbøder således bølgepåvirkningen og begrænser dermed erosion og slitage på diget i højvandssituationer. Det anbefales derfor, at havdiger placeres mest hensigtsmæssigt tilbagetrukket fra kystlinjen.

I forhold til digets geometriske udformning er, ud over digets højde, hældningen af for- og bagskråningen meget afgørende. Det anbefales, at havdiger opbygges med svagt hældende forskråning (fx mellem 1:5 og 1:10). Derved fordeles bølgeenergien over et større areal. Bølgerne taber kraften, mens de ruller hen over den flade forskråning, og derved mindskes bølgeopløb og evt. bølgeoverløb.

Bølgeopløbshøjden er defineret som den lodrette forskel mellem det højeste punkt for bølgeopløb og vandstands niveauet foran diget. Indkommende bølger foran diget er af stokastisk natur, hvor hver bølge giver forskelligt opløbsniveau. I en række Nordsølande (fx Holland og Tyskland) er digerne designet ved hjælp af en bølgeopløbshøjde, $R_{u2\%}$, der kun overskrides af 2 % af de indkommende bølger. Tanken bag er, at hvis kun 2 pct. af bølgerne når toppen af et dige og løber over ned ad bagskråningen, behøves ikke specifikke beskyttelsesforanstaltninger ud over opbygning i ler med græs (EurOtop, 2018). Det seneste årti er design eller sikkerhedsvurdering ændret til et overløbsvolumen (m^3/s), der kan accepteres uden at medføre skader på diget.

Ved vertikale konstruktioner er bølgebrydningen direkte foran konstruktionen eller på selve muren/væggen af central betydning. Højvandsmuren skal designes til at kunne modstå kraftig bølgepåvirkning og høj vandstand under en ekstrem situation. Som følge af den manglende bølgeenergivækkelse opstår der bølgeslag på en højvandsmur under en stormflod. Ved disse situationer kan der endvidere opstå bølgeoverskyl, som bl.a. er afhængig af konstruktionens højde. Også her skal der ses på hvor meget bølgeoverskyl, der kan accepteres (EurOtop, 2018).

8. Sikringsniveau og linjeføring for hovedstadsområdet

8.1 Fastlæggelse af designvandstand

Foreslåede designvandstande omkring hovedstadsområdet baseres på statistiske beregninger, analyser og vurderinger af ekstremvandstande henholdsvis nord og syd for København samt eksisterende videnskabeligt arbejde både fra danske forskere og eksperter samt fra især IPCC's vurderingsrapporter. Heri indgår vurdering af meteorologiske forhold i forbindelse med ekstreme stormfloder, fremskrivninger af det stigende havniveau og øvrige påvirkninger fra fremtidige klimaforandringer. I fremskrivningen er fratrukket bidrag for landhævning. Fremskrivningerne præsenteres for en mellemlang tidshorizont på 50 år (år 2075) og en lang tidshorizont på 100 år (år 2125).

Baseret på en midlet vandstand (typisk registrerer vandstandsmålere i dag en midlet vandstand hvert 10. minut) af et stillestående vandspejl under ekstremhændelser og relateret til højdesystem DVR90, fastlægges designvandstanden. Referenceår er 1990. Designvandstand tillægges et bidrag for bølgeeffekter for at opnå et sikringsniveau. Afhængigt af lokaliteten varierer bidraget til brug for fx anlæg af oversvømmelsessikring og afhænger af, hvor eksponeret kysten er, hvilken type beskyttelse, der ønskes etableret (fx højvandsmur/dige) og placeringen af anlægget, jf. Kapitel 8.2. I fastlæggelse af designvandstand indgår dog gradienten i ekstremvandstand som følge af udformning af kystlinjen og dybdeforhold.

De følgende afsnit gennemgår elementer i, og argumenter for, fastlæggelse af designvandstand.

8.1.1 Vandstandsgradient

Der tages højde for en generel gradient i ekstremvandstande langs kysten, der understøttes af tidligere videnskabeligt arbejde og udførte analyser og modelleringer. Ekstremvandstande fra syd vurderes at kunne blive større end ekstremvandstande fra nord. Selv under meget kraftige stormfloder fra syd er gradienten fra nord til syd så stor, at vandstanden i nord ikke overgår de mest ekstreme vandstande, der kan forventes under en stormflod fra nord. Tilsvarende vil en stormflod fra nord ikke medføre højere vandstande syd for hovedstaden end de, der kan opleves under stormfloder fra syd. I fastlæggelse af sikringsniveau vurderes, at det (inden for rammerne af dette arbejde) er tilstrækkeligt at udarbejde statistiske analyser nord henholdsvis syd for hovedstadsområdet og koble disse i en simpel graduering af sikringsniveau langs hovedstadskysten. Potentielt vil et højere middelhavniveau i fremtiden kunne ændre både ekstremvandstand og gradient. Eftersom der generelt vil være en højere vandstand over Drogden, vil dette kunne nedføre en større gennemstrømning. Dette kan, isoleret set, føre til lidt lavere ekstremvandstande langs de sydlige kyster under stormfloder fra syd, mens vandstandene kan blive lidt højere mod nord, eftersom gradienten i vandstand bliver mindre, hvilket kan gøres til genstand for yderligere modelbaserede undersøgelser.

8.1.2 Landbevægelse og stigning i middelhavniveau

Der pågår en stadig landhævning i Danmark som følge af isens afsmeltning efter sidste istid. Hævningsraten er langsomt aftagende, men kan over en 100-års periode regnes konstant. For hovedstadsområdet fastlægges et bidrag fra landhævning på 1,2 mm/år svarende til 0,12 m på 100 år, der fratrækkes den forventede globale/regionale havniveaustigning fremadrettet. Fra-

drag for landbevægelse er indregnet i de angivne scenariefremskrivninger af havniveau. Lokale sætninger er ikke inddraget i beregningerne. Stigningen i middelhavniveau i 1900-tallet er ca. på 1,5 mm/år (jf. DMI, 2021, p. 14-15), mens den absolutte, globale stigningsrate siden 1990 er på 3-4 mm/år (<https://sealevel.colorado.edu/>). Stigninger siden 1990 indregnes som en del af de angivne klimafremskrivninger for havniveau.

8.1.3 Ekstremhændelse fra syd

1872-stormfloden er central i opfattelsen af, hvor kraftig en stormflod kan blive i den vestlige Østersø og er i fokus i meget videnskabeligt og rådgivningsmæssigt arbejde i Danmark, Tyskland og Sverige. En traditionel statistisk metode er ikke mulig grundet et sparsomt datagrundlag syd for hovedstaden, hvor der kun eksisterer data for omkring 60 år, og hvor den højeste målte vandstand i Køge Havn på 1,57 m DVR90 indtraf under "Den Stille Stormflod" i januar 2017, hvilket er en anden type hændelse end den i 1872. Der er, udover 1872-hændelsen, indtruffet stormfloder med markant forhøjet vandstand syd for hovedstaden forud for måleseriens start i bl.a. 1904 og 1913 og længere tilbage i tid. Der findes ikke i litteraturen sikkerhed for, at der historisk set er indtruffet hændelser med vandstande, der overgår 1872-stormfloden.

Der er foretaget modelkørsler af vejr- og vandstandsforhold fra 1826 til i dag, og vandstandsmålinger fra Travemünde (siden 1825) og Gedser (fra 1890) er indgået i vurderingen af vandstande i Køge Bugt. Gennem modellering er historiske ekstremvandstande for perioden fra år 1826 til 1960 beregnet.

Statistiske beregninger baseret på modellerede og målte data er foretaget på baggrund af en antagelse om en GPD fordeling af ekstremene, jf. Kapitel 5. Resultatet af beregningerne tydeliggør udfordringerne ved at beregne meget ekstreme hændelser med traditionelle statistiske metoder, samtidig med at de systematisk målte data fra Køge Havn repræsenterer ekstremhændelser af en størrelsesorden som ligger langt under 1872. Helt konkret viser analysen for Køge, i det tilfælde hvor der kun medtages systematiske målinger en meget lille forskel på en 100-, 1.000- og en 10.000-årshændelse med middeltidsvandstande der ligger langt under vandstanden i 1872. Inddrages derimod historiske hændelser, fås langt større middeltidsvandstande og der er ikke nogen øvre grænse for middeltidsvandstanden ved lange returperioder. En følsomhedsanalyse og vurdering af afskæringsniveau for ekstremhændelser, giver en værdi på 2,88 m for en 1000-års hændelse; dog med en meget stor metodemæssig- og statistisk usikkerhed.

På baggrund af eksisterende videnskabeligt arbejde er meteorologiske og oceanografiske forhold vurderet; herunder fyldningsgrad af Østersøen og vindretninger og vindstyrker for hændelser, der kan føre til stormfloder fra syd. Med justeringer ift. for øget fyldningsgrad og vindstyrke (jf. Kapitel 5) på stormfloden i 1872, vurderes på foreliggende grundlag en øvre fysisk grænse for en ekstremhændelse fra syd på 3,79 m (1990-vandstand; 3,80 m DVR90 afrundet, jf. nedenfor) til fastlæggelse af designvandstand. Designvandstanden i 2023 som følge af allerede indtrufne stigning i havniveau i perioden 1990-2023 er 3,91 m (2023-niveau; 3,90 m DVR90 afrundet), som redegøres nærmere for i Afsnit 8.1.5.

8.1.4 Ekstremhændelse fra nord

Der er ikke i litteraturen veldokumenteret evidens for stormfloder fra nord tilbage i tid med havniveauer som overstiger stormen Bodil i december 2013 med en målt vandstand på 1,72 m DVR90 (1,68 m DVR90, trendfri 1990). Modelberegninger af den øvre grænse for stormflodsvandstand i Køge Bugt på 3,79 m (1990-niveau i modellen er der anvendt en vandstand på 3,80 m) resulterer dog i en vandstand på 2,31 m i Nordhavn og 2,30 m ved Svanemøllen (Afsnit 8.1.7, Figur 8.1). En øvre fysisk grænse for stormflodsvandstande nord for Drogdetærsklen skal derfor fastlægges ved hjælp af vandstandsgradienten ved ekstreme stormfloder fra syd.

Modelberegningen gennemført for 1872-stormen, som beskrevet i Afsnit 7.2.4, resulterer i en vandstandsgradient på 118 cm mellem Avedøre Holme og Svanemøllen. Disse beregninger af 1872-stormen er sammenlignet med andre tidligere gennemførte modelberegninger (Tabel 7.2 i Afsnit 7.2.4). Fælles for alle modelberegninger er, at vandstandsgradienten mellem Avedøre Holme og Svanemøllen som minimum er en meter.

DMI har også gennemført modelberegninger af 1872-stormfloden som yderligere understøtter dette argument om en gradient sideløbende med de gennemførte MIKE 21 modelleringer. Disse data ligger i spændet 0,9-1,0 m, ml. Avedøre og Københavns Nordhavn (se også Tabel 7.2 i Afsnit 7.2.4).

Som følge af det foreliggende vidensgrundlag for potentielle ekstreme stormfloder fra syd og de generelle usikkerheder, som er forbundet med anvendelse af computermødel, anbefales det på det foreliggende grundlag at fastlægge en foreløbig øvre grænse for ekstremvandstand nord for Drogden-tærsklen på 2,79 m DVR90. Dette estimat for øvre fysisk grænse tager udgangspunkt i den øvre fysiske grænse for stormflodsvandstand i Køge Bugt på 3,79 m med et konservativt estimat af en vandstandsgradient på minimum 1,0 m mellem Avedøre Holme og Svanemøllen. Yderligere undersøgelser kan gøre dette estimat mere robust.

Den foreløbig øvre grænse for ekstremvandstand nord for Drogden-tærsklen beregnes således som følgende:

$$SL_maxNORD = SL_maxSYD - Gradient_minSYD-NORD = 3,79 \text{ m} - 1,00 \text{ m} = 2,79 \text{ m DVR90.}$$

8.1.5 Fremtidige klimaforandringer

De menneskeskabte klimaforandringer medfører et stigende havniveau. Havniveauet vil stige i de kommende årtier og århundreder, uanset om det lykkes at begrænse udledningen af drivhusgasser. Det skyldes, at både havets varmeudvidelse og afsmeltningen fra de store iskapper vil fortsætte selv med den opvarmning, vi har oplevet frem til i dag. Den fremtidige udledning afgør dog stadig, hvor meget og hvor hurtigt havniveauet stiger.

Kravene til kystsikring kan derudover blive påvirket af fremtidige klimaforandringer gennem ændrede vindmønstre og særligt ekstremvinde. Der er dog ikke robust videnskabelig evidens for hyppigere eller kraftigere storme omkring Danmark, særligt fordi usikkerheden blandt det omfattende ensemble af klimamødel er stor. Der er samlet set en svagt stigende tendens i ekstremvindene over Østersøen, der dog ikke er tilnærmelsesvis statistisk signifikant. Derfor forventes ekstremvindene at være omtrent som i dag, hvor det dog samtidig skal nævnes, at der findes enkelte mødel som enten forudsiger mindre stigninger eller mindre fald i ekstremvindene fremover.

Givet manglen på en robust tendens i fremtidens vindændringer, er vurderingen af fremtidens stormfloder et samlet resultat af den gennemsnitlige havniveaustigning (fratrasket landhævning) og de ekstreme stormflodshøjder. Fremtidige studier kan yderligere detaljere sammenhænge og vurdere fx, hvorvidt og hvordan et generelt ændret havniveau påvirker stormflodsvandstande og vandgennemstrømning i Øresund, særligt under ekstremhændelser. Endelig kan fremtidige natur- eller menneskeskabte ændringer i morfologi, dybdeforhold og byudvikling påvirke stormflodshøjderne lokalt.

Selv hvis man betragter fremskrivningerne af havniveau alene, er der markante usikkerheder på fremtidens forventede middelhavniveau. Dette gælder ikke mindst på den anden side af 2100, hvor usikkerhederne vokser yderligere. Denne usikkerhed kommer oven i (1) usikkerheden på de historiske stormflodsmålinger, (2) usikkerheden på vurderingen af de mest ekstreme stormfloder i området omkring København, og (3) usikkerheden på klimaforandringernes indflydelse på særligt vinden omkring Danmark. Arbejdsgruppen har derfor vurderet, at

valget af udledningsscenarie og konfidensniveau skal forsøge at tage højde for de ekstra bidrag, som den samlede usikkerhed potentielt indebærer.

Vurderinger fra IPCC og UNEP viser, at verdens nuværende implementerede udledningspolitikker ligger over medianen i det mellemhøje udledningsscenarie SSP2-4.5. Givet alle de ovennævnte kilder til usikkerhed i analysen, samt den helt grundlæggende usikkerhed i verdenssamfundets udvikling og drivhusgasudledning, bør der derfor tages udgangspunkt i et højere scenarie, hvis der ønskes den høje grad af sikkerhed, som beskrevet i arbejdsgruppens opdrag. Derfor foreslås det høje udledningsscenarie (SSP3-7.0) som udgangspunkt. De adskillige bidrag til den markante samlede usikkerhed gør, at det derudover anbefales at benytte den øvre grænse for de sandsynlige klimaforandringer under det scenarie – her defineret, på linje med IPCC, som 83-percentilen.

Forskellen mellem havniveaustigningerne i udledningsscenarierne øges gradvist frem i tiden. I fastlæggelse af den samlede designvandstand indgår derfor en levetidsbetragtning, så det anbefalede sikringsniveau kan revurderes. De kommende årtiers havniveaustigning er stort set identiske for de forskellige niveauer af drivhusgasudledning, men for en længere tidshorizont på fx 70 år, gør den samlede verdens udledningsreduktioner (eller mangel på samme) en markant forskel for de ændringer, vi går i møde. Sammen med et forventeligt gradvist større data- og vidensgrundlag om havniveaustigninger og stormfloder, anbefaler arbejdsgruppen, at sikringsniveauerne revurderes med passende interval på fx 30 år. Levetidsbetragtningen kan også gøres gældende for anlægsinvesteringer, der rækker ud over år 2125.

Valget af et højt udledningsscenarie tillagt usikkerheder frem mod år 2125 bidrager til at gøre indstilling af designvandstand og sikringsniveau mere robust givet den samlede usikkerhed på vejrekstremer og fremtidig havniveaustigning. Som resultat af, at det globale havniveau, uanset hvad, vil fortsætte med at stige i de kommende århundreder, bliver sikringsniveauets gyldighed forlænget i tid, såfremt havniveaustigningerne bliver mindre end forudsat her.

På baggrund af DMI's input vedrørende valg af klimascenarie til dette aktuelle projekt, er det arbejdsgruppens anbefaling, at udledningsscenariet SSP3-7.0 lægges til grund for fremskrivning af designvandstandene. Derudover gør de relativt store usikkerheder i flere af analysens elementer, at det anbefales at benytte en øvre grænse for det sandsynlige interval i form af 83-percentilen. Stigningerne (jf. Tabel 3) er vurderet for hovedstadsområdet for to fremtidige tidshorisonter: 2075 og 2125.

Startperioden for fremskrivningen er gennemsnittet af havniveauet i perioden 1981-2010. Tages år 1995 som gennemsnit, vil dette inden for en margin på 1-2 cm, svare til middelhavniveau i 1990 med højdereferencen DVR90 (hvorved DVR90 og det centrale år i KlimaAtlas' referenceperiode er næsten ens og, til dette brug matcher hinanden). Det betyder altså, at den allerede indtrufne stigning i havniveau i perioden 1990-2023 er indeholdt i klimafremskrivningen, hvilket har praktisk betydning i forhold til angivelser af højdekoter og i forståelse af stormflodshøjderne og designvandstand.

Vandstande i 2023 målt i DVR90 indeholder således allerede et bidrag for de relative havniveaustigninger på omtrent 6 cm, der er indtruffet siden 1990/1995. Tilsvarende vil en stormflod (defineret i forhold til middelhavniveau) være 6 cm højere, end hvis den var indtruffet i 1990. Her ligger en fremskrivning af vandstanden ifølge SSP3-7.0 83-percentilen til 2023 på 12,4 cm, der anvendes i det følgende, således lidt over den aktuelle havstigning. Designvandstanden i 2023 som følge af bidrag fra stormflod fra syd og klima er da $3,79 + 0,124 \approx 3,90$ m DVR90 og øges over tid i takt med scenariet fremskrivningen.

Det foreslåede scenarie SSP3-7.0 har en medianværdi for stigningen i havniveau på 84,1 cm frem mod år 2125 og 123,4 cm for 83-percentilen. Et samlet overblik over fremskrivningerne

baseret på SSP3-7.0 og SSP5-8.5 fremgår af Tabel 8.1, som angiver både medianværdier (50%) og estimater for 83- og 90-percentiler i den øvre ende af usikkerhedsintervallet for de to udledningsscenarier.

Det skal bemærkes at udledningsniveauet i SSP3-7.0 er lavere end det tidligere anbefalede og anvendte RCP8.5 (med den nyere pendant SSP5-8.5). Anvendelsen af 83-percentilen frem for medianen gør dog, at den resulterende havniveaustigning, der indregnes, faktisk er højere på trods af skiftet til et lavere (men stadig højt) udledningsscenarie. Således er den forventede havniveaustigning i 2125, ved 83-percentilen under SSP3-7.0, på 123 cm, mens medianværdien for SSP5-8.5 i 2125 er 99 cm. Anbefalingen om at anvende 83-percentilen i stedet for fx 90 eller en endnu højere percentil, begrundes i, at det for nuværende vurderes at være et tilstrækkeligt usikkerhedsniveau at inkludere ift. den eksisterende viden om klimaudvikling og de lave sandsynligheder for endnu højere havniveaustigninger, samt at dette valg følger IPCC's definition af det sandsynlige interval.

Skiftet til et lavere udledningsniveau end RCP8.5/SSP5-8.5 skyldes til dels, at det nu er muligt. Tidligere, under RCP-scenarierne, har der ikke været et detaljeret datagrundlag for scenarier mellem RCP4.5 og RCP8.5. Således præsenterer IPCC særrapport om hav og is (2019) kun forventede havniveaustigninger for scenarierne RCP2.6, RCP4.5 og RCP8.5. Med samme antagelse som anvendt her, om at det relevante udledningsscenarie på længere sigt ift. særlig robust klimatilpasning bør ligge over det mellemhøje niveau (RCP4.5/SSP2-4.5), var der således kun RCP8.5 at benytte som højere scenarie tidligere. Udgivelsen af IPCC's sjette hovedrapport (2021; 2023) tilvejebragte således et nyt datagrundlag med et højt udledningsscenarie (SSP3-7.0) mellem det mellemhøje (SSP2-4.5) og det meget høje (SSP5-8.5). Givet de i mellemtiden annoncerede politikker og ambitioner om udledningsreduktioner på verdensplan, samt at videnskabelige studier vurderer RCP8.5 og lignende scenarier som usandsynlige udviklinger (jf. Kapitel 6), vurderes det her at SSP3-7.0 er det mest relevante udgangspunkt¹.

Tabel 8.1. Havniveaustigninger (cm) for hovedstadsområdet for år 2075 og år 2125 ved IPCC's klimascenarier SSP3-7.0 & SSP5-8.5. Jævnfør tekst for yderligere forklaring.

		50%	83%	90%
SSP3-7.0	2075	42.5	59.8	77.3
SSP5-8.5	2075	47.1	65.7	84.7
SSP3-7.0	2125	84.1	123.4	159
SSP5-8.5	2125	99.3	145.8	187.7

¹ En væsentlig bemærkning er, at dette kun gælder specifikt for havniveaufremskrivninger. Fremskrivninger af atmosfæriske parametre (temperatur, nedbør, mv.) kræver detaljerede, regionale klimamodelberegninger, og sådanne beregninger baseret på SSP-scenarierne eksisterer endnu ikke. Efter publicering af de globale klimamodelberegninger, er det internationale forskningssamfund nu i gang med at opdatere de regionale klimamodeller, men det er et omfattende og beregningstungt arbejde. Det betyder, at et opdateret datagrundlag, svarende til det nuværende bag de atmosfæriske parametre i DMI's Klimaatlas, først vil være klar om nogle år. Således er temperatur, nedbør og øvrige atmosfæriske parametre i Klimaatlas fortsat baseret på RCP-scenarierne: RCP-2.6, RCP4.5 og RCP8.5. For klimatilpasning målrettet til f.eks. håndtering af nedbør er det således endnu ikke muligt at benytte et udledningsscenarie tilsvarende SSP3-7.0.

8.1.6 Anvendte designvandstande

Designvandstande for stormfloder fra henholdsvis nord og syd for år 2075 og år 2125 er summen af ovennævnte: "øvre grænse for stormflod" + "stigning i havniveau justeret i fht. vertikal landbevægelse" (værdier afrundet), jf. Tabel 8.2. For den midterste del af hovedstadens kyststrækning, MIDT, anvendes middelværdien af NORD og SYD, jf. Afsnit 8.1.7.

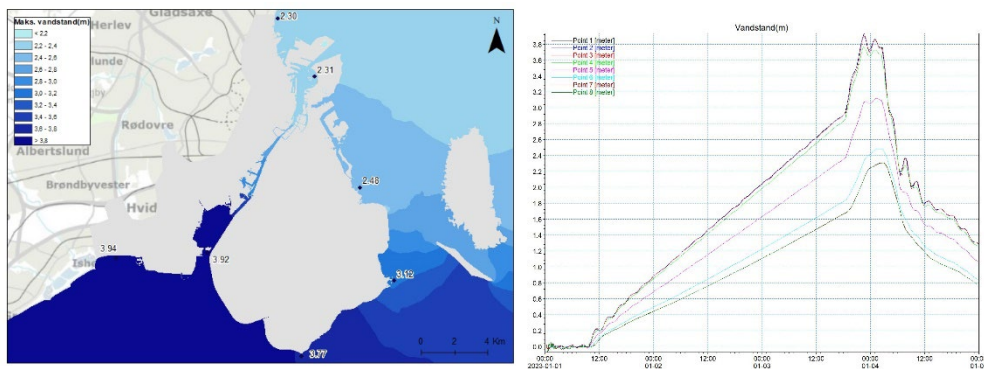
Tabel 8.2. Designvandstande (m) for 1990 (referenceår), 2023, 2075 og 2125 fra nord hhv. og syd som sum af maksimal stormflodsvandstand og havniveaustigning fremskrevet fra IPCC scenarie SSP3-7.0 83-percentil (værdier afrundet i decimeter og relateret til DVR90). Designvandstand for en mellemliggende del ("MIDT") af kyststrækningen er ligeledes angivet.

Lokalitet	År 1990	År 2023	År 2075	År 2125
Designvandstand NORD	2,79 m ≈ 2,8 m	2,79 m + 0,12 m ≈ 2,9 m	2,79 m + 0,60 m ≈ 3,4 m	2,79 m + 1,23 m ≈ 4,0 m
Designvandstand MIDT	3,3 m	3,4 m	3,9 m	4,5 m
Designvandstand SYD	3,79 m ≈ 3,8 m	3,79 m + 0,12 m ≈ 3,9 m	3,79 m + 0,60 m ≈ 4,4 m	3,79 m + 1,23 m ≈ 5,0 m

Designvandstand er, som tidligere nævnt, angivet som vandstand fratrukket bølgeeffekter, men inklusive havspejlsstigning under en ekstremhændelse. Der skal altså tillægges bidrag fra bølgeeffekter i design af anlæg til oversvømmelsessikring.

8.1.7 Bestemmelse af gradient mellem nord og syd

De fastlagte designvandstande angiver den maksimale vandstand syd for hovedstaden til 3,80 m DVR90 med reference i 1990 og tilsvarende angives den maksimale vandstand nord for hovedstaden til 2,80 m (referenceår 1990). Figur 8.1 viser vandstandsgradienten langs hovedstadskysten for en stormflod på 3,80 m fra syd.



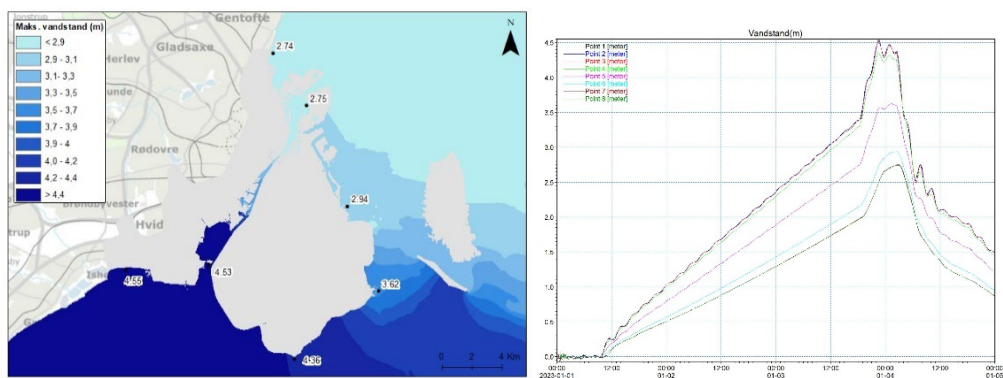
Figur 8.1. Maksimal vandstand i referencepunkterne langs hovedstadskysten (til venstre) for designvandstand 3,80 m fra syd (referenceår 1990), samt vandstandsforløbene i referencepunkterne (til højre).

Modelleringsresultaterne viser de højeste vandstande ved Avedøre Holme og Kalveboderne. Mod Kongelundsfortet falder vandstanden med omkring 15 cm. Ved Dragør Fort er vandstanden 82 cm lavere end i forhold til Avedøre Holme. Vandstandsgradienten over hele strækningen fra Avedøre Holme til Svanemølle udgør 164 cm.

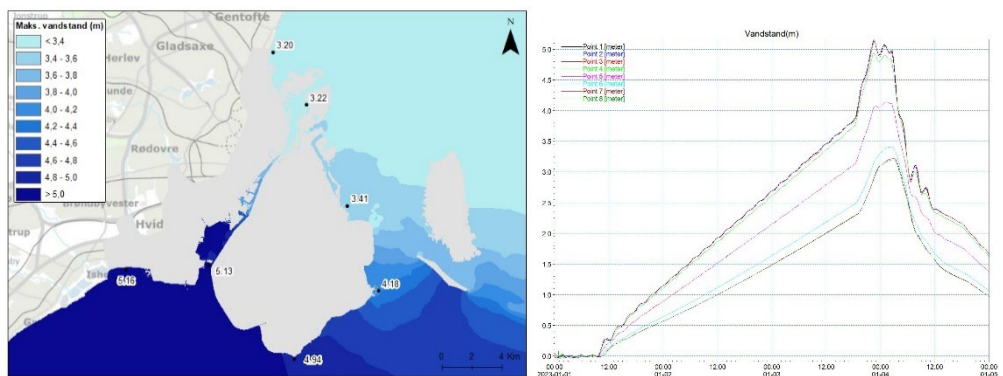
Sammenholdt med tidligere modelundersøgelser fra COWI (2018) ses en god overensstemmelse på modelresultaterne og vandstandsgradienten langs strækningen fra Avedøre Holme til Amager Øst. Vandstandsgradienten fra Avedøre Holme til Amager øst i COWI's modelberegninger for en hændelse fra syd med referencevandstand 3,77 m DVR90 beregnes til 137 cm, hvorimod foreliggende modelsimuleringer med en designvandstand 3,80 m DVR90 udgør vandstandsforskellen mellem begge lokaliteter 146 cm. Dette betyder, at forskellen i vandstandsgradienten mellem COWI modelberegninger fra 2018 og foreliggende beregninger udgør 9 cm. Det er dog tydeligt, at vandstandsudviklingen fra Amager Øst til Svanemøllen i COWI's modelberegninger, resulterer i et større fald end de foreliggende modelsimuleringer. Vandstandsgradienten fra Amager Øst til Svanemøllen udgør i COWI's model ca. 80 cm, hvorimod vandstandsgradienten i foreliggende model beregnes for samme strækning til kun ca. 20 cm. Forskellen i de to modellerede vandstandsgradienter på strækningen Amager Øst til Svanemøllen udgør således 60 cm.

Årsagen til denne afvigelse kan skyldes forskellige modelopsætninger samt flere og modeltekniske aspekter, som fx opløsning af dybdeforhold, registrering af eksisterende højvandsbeskyttelse (diger) langs kysten, anvendt ruhedskoefficient, opsætning af modeldomæne og stormflodshydrografen.

Foreliggende model er også anvendt til beregning af vandstandsudviklingen langs hovedstadskysten for designvandstandene i 2075 og 2125. Figur 8.2 og Figur 8.3 viser henholdsvis de maksimale vandstande og vandstandsforløbene i referencepunkterne for henholdsvis 2075 og 2125.



Figur 8.2. Maksimal vandstand i referencepunkterne langs hovedstadskysten (til venstre) for designvandstand 4,40 m fra syd, samt vandstandsforløbene i referencepunkterne (til højre).



Figur 8.3. Maksimal vandstand i referencepunkterne langs hovedstadskysten (til venstre) for designvandstand 5,00 m fra syd, samt vandstandsforløbene i referencepunkterne (til højre).

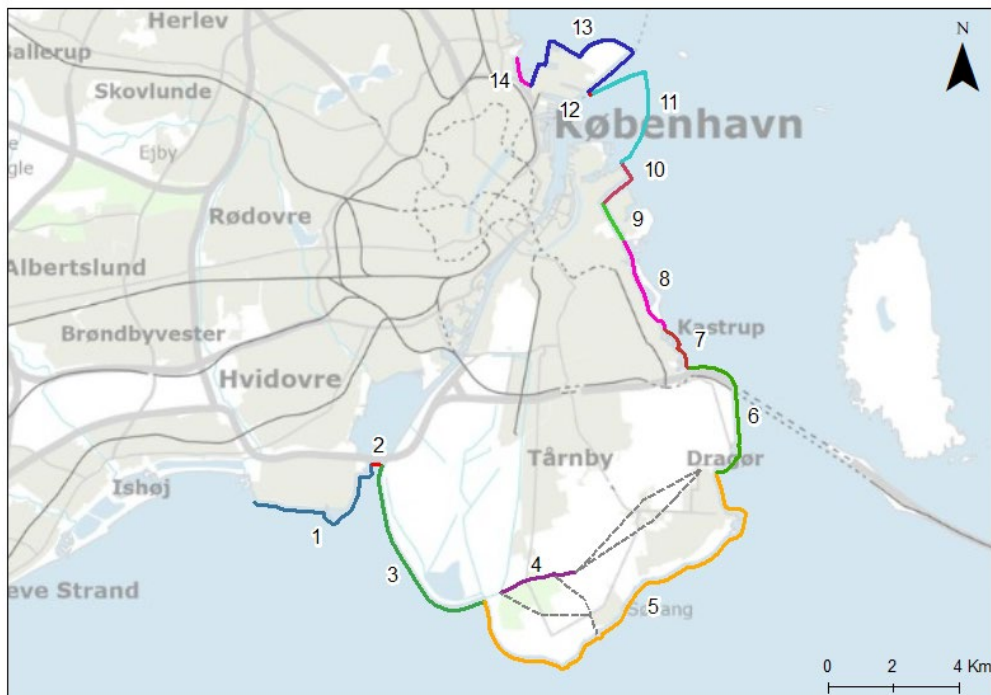
Modelleringsresultaterne viser en sammenlignelig udvikling af de maksimal vandstande i referencepunkterne, dog ændrer vandstandsgradienterne sig. Ved en designvandstand på 4,40 m beregnes en vandstandsgradient fra Avedøre Holme til Kongelundsfortet på 19 cm, hvorimod gradienten fra Avedøre Holme til Dragør Fort stiger til 93 cm. Ved designvandstanden på 5,00 m udgør vandstandsgradienten på samme strækning 98 cm (Figur 8.3).

Derimod forbliver vandstandsgradienten for strækningen fra Amager Øst til Svanemøllen omkring 20 cm ved begge designvandstande på henholdsvis 4,40 m og 5,00 m. Vandstandsgradienterne over hele strækningen (fra Avedøre Holme til Svanemøllen) beregnes til 178 cm for designvandstand 4,40 m og 193 cm for designvandstand 5,00 m.

For at underbygge den geografiske inddeling i tre områder SYD, MIDT og NORD, som foreslået i Afsnit 8.1.6 i forbindelse med fastlæggelse af designvandstandene, er vandstandsudviklingen langs enkelte kyststrækninger nærmere undersøgt. Hertil er der taget udgangspunkt i de 14 delstrækninger, som ligger til grund for hele forundersøgelsen af stormflodssikring af hovedstadsområdet (Figur 8.4), jf. kommissorier og addendum.

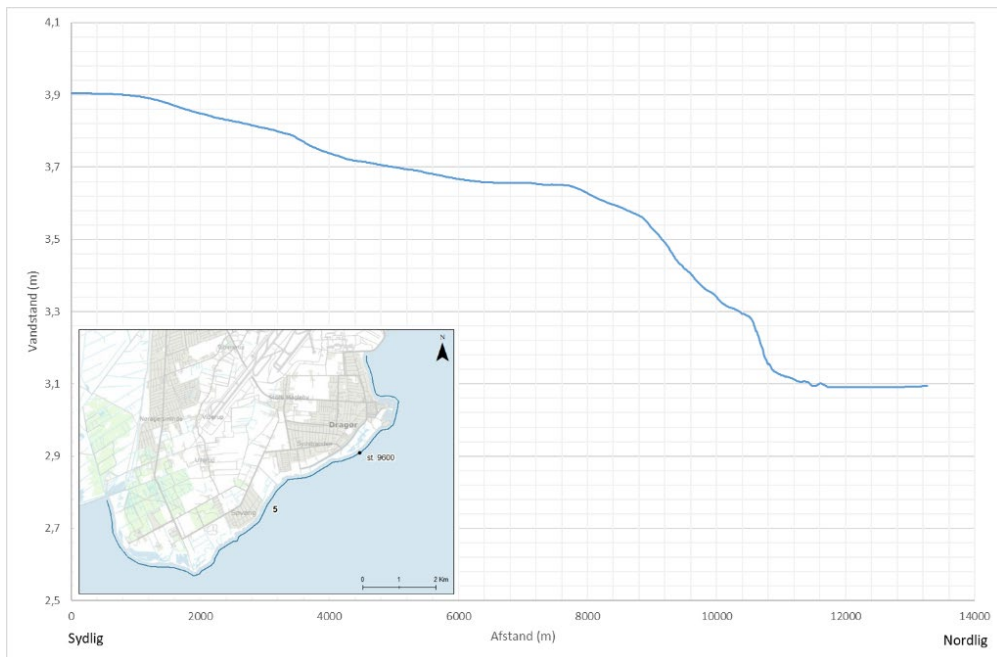
Der skal fremhæves, at linjeføring og delstrækningernes geografiske placering også omfatter forslag, hvor stormflodssikringen etableres som tilbagetrukket sikring eller i form af en dobbelt sikringslinje, jf. konceptet beskrevet i Afsnit 7.3. Figur 8.4 viser ved stiplede linjer en basislinjeføring, der består af Ullerupdiget (delstrækning 4) og forlængelsen fra Ullerup til Store Magleby. Tilsvarende illustreres forskellige løsninger med landdiger på det sydlige Amager, som i det videre forløb undersøges af Arbejdsgruppen Teknik, Miljø og Anlægsøkonomi.

For en nærmere undersøgelse af vandstandens udvikling langs kysten tages dog udgangspunkt i en ydre stormflodssikring og delstrækningernes placering langs kystlinjen.

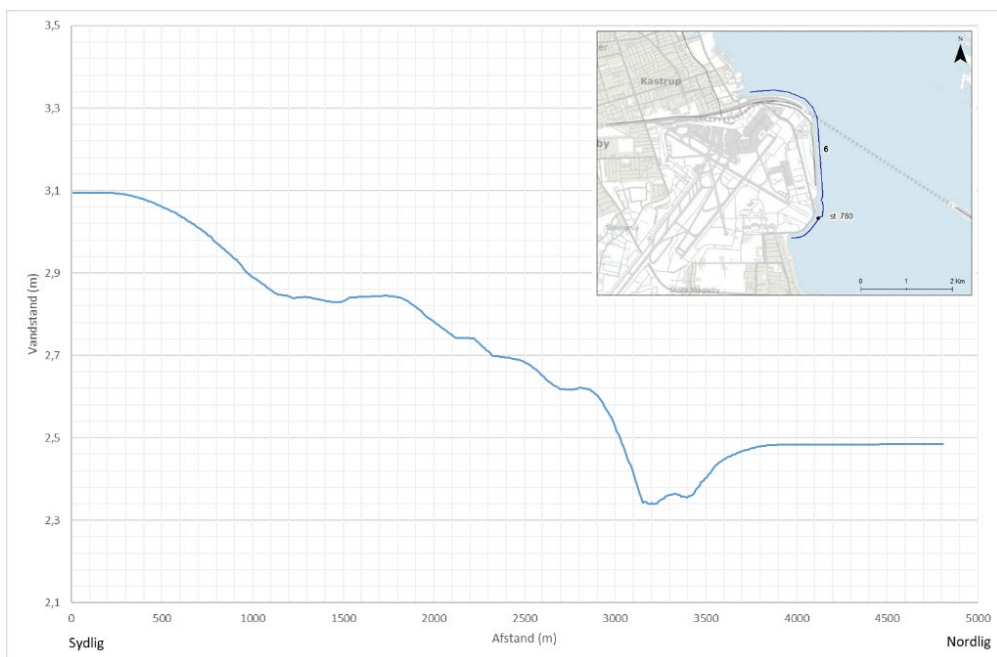


Figur 8.4. Oversigt over delstrækninger 1-14.

På baggrund af de forudgående analyser af vandstandsudviklingen i referencepunkterne, er ændringen af vandstanden langs kysten mest markant langs delstrækning 5 og 6. Figur 8.5 og 8.6 viser den beregnede maksimale vandstand for hver 10 m langs kystlinjen for modelberegningen af en designvandstand på 3,80 m (referenceår 1990).



Figur 8.5. Modelleret forløb af den maksimale vandstand for hver 10 m langs delstrækning 5 for designvandstand 3,80 m DVR90.

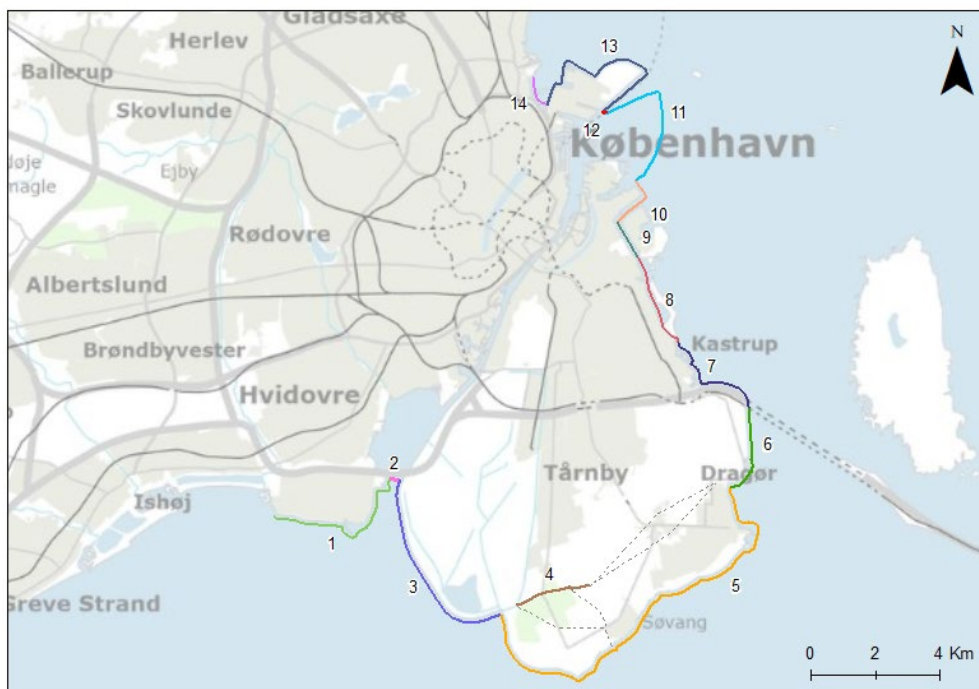


Figur 8.6. Modelleret forløb af den maksimale vandstand for hver 10 m langs delstrækning 6 for designvandstand 3,80 m DVR90.

Af Tabel 8.2 fremgår, at designvandstanden for MIDT foreslås 0,5 m, henholdsvis, højere og lavere (3,30 m DVR90, referenceår 1990) end designvandstanden for, henholdsvis, SYD og NORD. Herigennem defineres et område midt i mellem områderne syd og nord for Drogdetærsklen, som omfatter den del af strækningen, hvor vandstandsændringer langs kysten er størst. Der forbliver dog spørgsmålet, hvordan et område MIDT geografisk afgrænses.

Grænsen på område SYD til MIDT fastlægges på baggrund af forskellen af designvandstanden på 0,5 m. Med udgangspunkt i de beregnede maksimale vandstande langs delstrækning 5 beregnes en 0,5 m lavere maksimal vandstand omkring 1,5 km sydvest for Dragør Fort (markeret med st. 9600 i Figur 8.5). Som følge af de modelrelaterede usikkerheder foreslås at sætte grænsen mellem område SYD og MIDT ved Dragør Fort.

Grænsen på område NORD til MIDT fastsættes igen ved hjælp af en vandstandsgradient på 0,5 m. Som nævnt tidligere, udgør vandstandsgradienten fra Amager Øst til Svanemøllen omkring 0,2 m. Den beregnede vandstand i referencepunktet ved Amager Øst er 2,48 m. Grænsen på område NORD til MIDT skal derfor findes ved en maksimal vandstand på omkring 3,00 m i delstrækning 6. Denne vandstand beregnes i området omkring Copenhagen ARFFS Water Rescue (markeret med st. 780 i Figur 8.6). Det forslås dog, at grænsen mellem delstrækning 6 og 7 fastlægges ved DSB's klargøringscenter og Øresund Landanlæg til Øresundsforbindelsen (se Figur 8.7) for at tage højde for usikkerhederne i modelberegningerne og den centrale infrastruktur i form af lufthavnen, Øresundstunnelen og DSB's infrastruktur. Den nøjagtige placering af grænsen fra område MIDT og NORD og den anlægstekniske overgang fra et sikringsniveau til et andet sikringsniveau undersøges nærmere af Arbejdsgruppe Teknik, Miljø og Anlægsøkonomi.



Figur 8.7. Forslag til grænsen mellem område MIDT og NORD.

Ud fra foreliggende beregningsresultater for en højvandshændelse fra syd (se Figur 8.1, 8.2 og 8.3) og analyser om vandstandsgradienten underbygges forslaget om inddeling hele en i tre områder, henholdsvis SYD, MIDT og NORD.

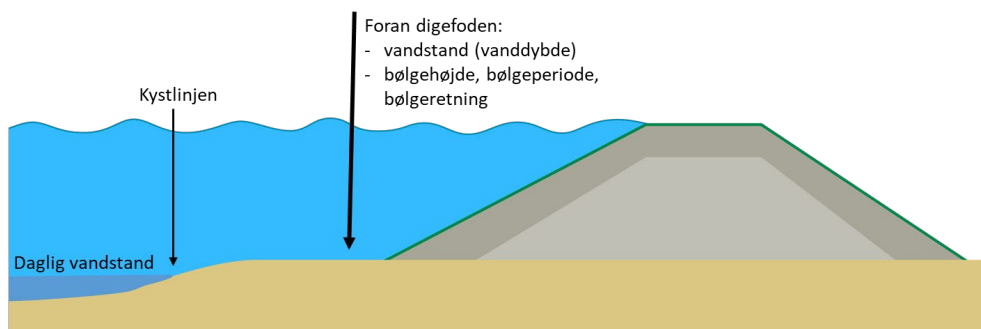
Område SYD går fra Avedøre Holme til Dragør Havn. Område MIDT foreslås gående fra Dragør Fort til Øresund Landanlæg, og område NORD afgrænses fra Øresund Landanlæg til Svanemøllen.

8.2 Bølgepåvirkning og sikringsniveauer

Sikringsniveauer for de 14 delstrækninger tager udgangspunkt i summen af designvandstanden og et bølgetillæg, som tidligere forklaret i Afsnit 2.4 (Figur 2.2). Beregning af bølgetillægget kræver detaljeret kendskab til anlæggets dimension (højde, hældning på for/bagskråning, kronebredden) og udformning, herunder anlæggets overflade (græs, asfalt, brudsten), afstand til kystlinjen samt terrænhøjden eller vanddybden foran diget (se Afsnit 7.4). Endvidere er det afgørende at have et detaljeret billede af bølgeklimate foran sikringsanlægget, som omfatter bølgehøjden, bølgeperioden og bølgenes indfaldsvinkel på anlægget, og det frie stræk som vinden blæser over. (se Figur 8.8).

Afhængigt af om sikringsanlægget under stormflod udsættes for større eller mindre grad af bølgepåvirkning, vil estimater for bølgetillæg variere betydeligt. Bølgetillægget er således meget afhængig af anlæggets typologi, bølgeforholdene foran sikringsanlægget og dets placering i forhold til kystlinjen. Ved skrånende anlæg (fx diger) kan bølgetillægget ligge mellem ca. 0,4 m og 0,9 m når sikringsanlægget er placeret i et beskyttet kystområde med lille bølgepåvirkning. Ved åbne kyster med moderat til høj bølgepåvirkning vil bølgetillægget være betydelig større og kan, afhængig af den konkrete kyststrækning, være omkring 2,5-3,0 m. Ved lodrette sikringsanlæg (fx stormflodsbarrierer og -porte) kan bølgetillægget være endnu højere som følge af bølgenes direkte energiudløsning og stor vanddybden foran sikringsanlægget.

Forskellen på fx 30 grader i bølgenes indfaldsvinkel på sikringsanlægget kan i sig selv medføre en forskel i det estimerede bølgetillæg på mellem 30-50 cm. Det samme gør sig gældende for tilbagetrukne placeringer af sikringsanlægget fra kystlinjen. En placering på 70-100 m fra kystlinjen muliggør en markant reduktion af bølgetillægget, som følge af den reducerede bølgepåvirkning, der følger af at bølgerne mister en del af deres energi på vejen fra kystlinjen hen over landskabet til forsiden af et tilbagetrukket sikringsanlæg. Estimater for bølgetillæg varierer således meget afhængigt af hvilke forudsætninger og betingelser, der lægges til grund.



Figur 8.8. Digeplacering tæt ved kystlinjen for estimaterne af bølgetillægget.

Arbejdsgruppen Teknik, Miljø og Anlægsøkonomi har bl.a. til opgave at undersøge mulige anlægstekniske løsninger for den samlede kyststrækning på grundlag af input fra kommuner, infrastrukturejere mv. I den forbindelse beregnes bølgetillægget og dermed kendes sikringsniveauet for de 14 delstrækninger, hvorefter Tabel 8.3 nedenfor kan opdateres.

Tabel 8.3. Designvandstand for hver af de 14 delstrækninger for stormflodssikring af hovedstadsområdet i henholdsvis 2075 og 2125.

Om- råde	Delstrækning	Nr.	Designvand- stand 2075	Designvand- stand 2125	Bølge- tillæg	Sikringsni- veau 2075
SYD	Avedøre Holme	1	4,4 m	5,0 m	Afgøres at typologi på sikringsanlæg, anlæggets placering samt havbundsforhold og bølgeforhold foran sikringsanlægget.	4,4 m + bølgetillæg
	Kalvebodløbet	2	4,4 m	5,0 m		4,4 m + bølgetillæg
	Vestamagerdiget	3	4,4 m	5,0 m		4,4 m + bølgetillæg
	Ullerupdiget	4	Diget løber fra Vestamager dige ind i landet til Ullerup. Diget kan forlænges med formål om at etablere en dobbelt sikringslinje.			
	Vestamagerdiget til Dragør Fort	5.1	4,4 m	5,0 m		4,4 m + bølgetillæg
MIDT	Dragør Fort til Kastrup Gammel Havn	5.2	3,9 m	4,5 m		3,9 m + bølgetillæg
	Kastrup Halvø	6	3,9 m	4,5 m		3,9 m + bølgetillæg
NORD	Amager Øst i Tårnby Kommune	7	3,4 m	4,0 m		3,4 m + bølgetillæg
	Amager Øst i Københavns Kommune	8	3,4 m	4,0 m		3,4 m + bølgetillæg
	Prøvestenen	9	3,4 m	4,0 m		3,4 m + bølgetillæg
	Kraftsværkshalvøen / Refshaleøen	10	3,4 m	4,0 m		3,4 m + bølgetillæg
	Lynetteholm	11	På Lynetteholm er der planlagt forskellige former for sikring, som vil medføre at koten på Lynetteholmen varierer. Koten på øen bliver + 4,0 m DVR90.			
	Kronløbet	12	3,4 m	4,0 m		3,4 m + bølgetillæg
	Nordhavn	13	3,4 m	4,0 m		3,4 m + bølgetillæg
	Svanemøllen	14	3,4 m	4,0 m	3,4 m + bølgetillæg	

Referencer

- 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>
- 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>
- Baensch, O. (1875). Die Sturmflut vom 12./13. November 1872 an den Ostseeküsten des Preussischen Staates. *Zeitschrift für Bauwesen*, 25, 156-220.
- Berg, P. and Poulsen, J. W. (2012). Implementation details for HBM, Tech. Rep. 12-11, Danish Meteorological Institute, <https://www.dmi.dk/fileadmin/Rapporter/TR/tr12-11.pdf>.
- BSH (2005): Storm Surges in the southern Baltic Sea. ISSN 0946-6010, Berichte des BSH 39.
- Bücher, A. and Zhou, C. (2018). A horse racing between the block maxima method and the peak-over-threshold approach.
- Christensen, O. B., Kjellström, E., Dieterich, C., Gröger, M., and Meier, H. E. M.: Atmospheric regional climate projections for the Baltic Sea region until 2100, *Earth Syst. Dynam.*, 13, 133–157, <https://doi.org/10.5194/esd-13-133-2022>, 2022.
- Clemmensen, L. B., Bendixen, M., Hede, M. U., Kroon, A., Nielsen, L., and Murray, A. S. (2014). Morphological records of storm floods exemplified by the impact of the 1872 Baltic storm on a sandy spit system in south-eastern Denmark. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(4):499–508.
- Colding, A. (1881). Stormen over Nord- og Mellem-Europa af 12te-14te November 1872 og over den derved fremkaldte Vandflod i Østersøen. *Vidensk.Selsk.Skr.*, 6. rk., Naturvidenskabelig og Matematisk Afd. I. 4.
- Coles, S. (2001). *An Introduction to Statistical Modelling of Extreme Values*, Springer London (November 2001), ISBN 978-1-84996-874-4, <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>.
- COWI (1997). Ørestadsselskabet I/S, Minimetro Phase 1, Civil Works of the Minimetro II.
- COWI (2015). Copenhagen Storm Surge 10th January 1825. Technical Report. Udarbejdet af COWI for Metroselskabet I/S.
- COWI (2016). Designgrundlag for beskyttelse mod oversvømmelse af København. Teknisk udredning for Københavns Kommune" (June 2016).
- COWI (2017). Opdateret overslag for sikring af København mod oversvømmelse. Rapport, april 2017. Københavns Kommune.
- COWI (2018). Stormflod og havvandsstigninger. Regnvandsforum.
- DHI (2006). Vandstandsstatistik for Køge Havn. Udarbejdet af Dansk Hydraulisk Institut for Køge Kommune, december 2006.

DMI (2017). Kommentering af rapporten "Designgrundlag for beskyttelse mod oversvømmelse af København" samt alternativ beregning af ekstremstatistik for stormfloder i Køge Bugt. Kundenrapport (Upubl.).

DMI (2021). Historical extreme high water levels along the coastline of Denmark. DMI Report 21-28.

DMI (2024). Supplement i forbindelse med "Arbejdsgruppe om undersøgelse af sikringsniveauer omkring København". Januar 2024.

Ekman, M (2003): The World's Longest Sea Level Series and a Winter Oscillation Index for Northern Europe 1774-2000. S. Inst. For Hist. Geophys. 12, Åland Islands.

EurOtop (2018). Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., www.overtopping-manual.com.

Führböter, A. (1987): Über den Sicherheitszuwachs im Küstenschutz durch eine zweite Deichlinie. Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, Die Küste, Vol. 45, pp. 181-208.

Gaume, E. and Gaal, L. and Viglione, A. and Szolgay, J. and Kohnova, S. and Blöschl, G. (2010). Bayesian MCMC approach to regional flood frequency analyses involving extraordinary flood events at ungauged sites, <https://hal.science/hal-00586917>, Journal of Hydrology, 394, 1-2, pp. 101-117, Nov. 2010.

Gram-Jensen, I., (1991). Stormfloder. Danish Meteorological Institute Scientific Report 91-1. Copenhagen. DMI.

IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–35. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.001>.

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, [doi:10.1017/9781009157896.001](https://doi.org/10.1017/9781009157896.001).

IPCC, 2023: Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, [doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647](https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647)

Jensen, J. & Töppe, A. (1986). Zusammenstellung und Auswertung von Originalaufzeichnungen des Pegels Travemünde/Ostsee ab 1826 [Compilation and evaluation of original recordings of the Travemünde/Baltic Sea gauges since 1826]. In: Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 30, 99–107.

Jensen, J. & Töppe, A. (1990). Untersuchungen über Sturmfluten an der Ostsee unter spezieller Berücksichtigung des Pegels Travemünde [Investigations of storm surges in the Baltic Sea with special consideration of the Travemünde gauges]. In: Deutsche Gewässerkundliche Mitt. DGM 1990, 34, 29–37.

Jensen, J., Habib, M. & Beckmann, S. (2022). Best estimates for historical storm surge water level and MSL development at the Travemünde/Baltic Sea gauge over the last 1,000 years. *Die Küste*, 92, 2022. <https://doi.org/10.18171/1.092102>

Jensen, J. & Müller-Navarra, S.H. (2008): Storm Surges on the German Coast. In: *Die Küste* 74.

Kiøbenhavnske danske post-tidender, 1760. Avisartikel, den 24. Oktober 1760, No. 85. Tilgængelig fra: <https://www2.statsbiblioteket.dk/mediestream/avis/search/berlingske/date/1760-10-24%2C1760-10-24>

Knudsen, P., Khan, S.A., Engsager, K.S., and Sorensen, C. (2016). An uplift model for Denmark – and work ahead. *Frontiers in Marine Science*, 3, [69; Supplementary Material].

Krüger, G. (1910). Über Sturmfluten an den deutschen Küsten der westlichen Ostsee mit besonderer Berücksichtigung der Sturmflut von 30./31. Jahresbericht der Geogr. Gesellschaft zu Greifswald 1909/1910/1911.

Kystdirektoratet (2011). Forslag til udpegning af risikoområder på baggrund af en foreløbig vurdering af oversvømmelsesrisikoen fra havet, fjorde eller andre dele af søterritoriet. Teknisk baggrundsrapport + bilag. Kystdirektoratet, Lemvig.

Kystdirektoratet (2018). Højvandstatistikker 2017. Rapport + Bilag. Kystdirektoratet, Lemvig.

Kystdirektoratet (2018b). Manual for marine vandstandsmålere. Udarbejdet af Kystdirektoratet, Danmarks Meteorologiske Institut, SDFE, Miljøstyrelsen og SDFE. ISBN: 978-87-93593-70-1

Kystdirektoratet, 2020. Metode til kortlægning af fare og risiko for oversvømmelse. Oversvømmelsesdirektivet, Anden planperiode.

MacPherson, L.R., Arns, A., Fischer, S., Méndez, F.J. & Jensen, J. (2023). Bayesian extreme value analysis of extreme sea levels along the German Baltic coast using historical information, *EGUsphere* [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1122>.

Madsen, K. S., Høyer, J. L., Suursaar, Ü., She, J., & Knudsen, P. (2019). Sea Level Trends and Variability of the Baltic Sea From 2D Statistical Reconstruction and Altimetry, *Front. Earth Sci.*, 7, 67, doi:10.3389/feart.2019.00243, 2019a.

Madsen, K.S., Sørensen, C.S., Schmith, T., Nielsen, J.W., & Knudsen, P. (2017). Determining Storm Surge Return Periods: The Use of Evidence of Historic Events. Poster session presented at International WCRP/IOC Conference 2017: Regional Sea Level Changes and Coastal Impacts, New York, United States.

Mudersbach, C. & Jensen, J. (2009a). Statistische Extremwertanalyse von Wasserständen an der Deutschen Ostseeküste, Abschlussbericht 1.4 zum KFKI-Verbundprojekt Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK), Universität Siegen.

Mudersbach, C. & Jensen, J. (2009b). Extremwertstatistische Analyse von historischen, beobachteten und modellierten Wasserständen an der deutschen Ostseeküste. *Die Küste*, 75 MUSTOK (2009), 131-161.

O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., and Sanderson, B. M.: The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, *Geosci. Model Dev.*, 9, 3461–3482, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>, 2016.

Petersen, T. (1924). Stormfloden 1872. *Geografisk Tidsskrift*, 27, 16-24.

Petersen, M. & Rohde, H. (1979) Sturmflut: Die grossen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und in der Elbe. 2., verb. Aufl. Neumünster: Wachholtz, 1979.

Pugh, D. & Woodworth, P. (2014). *Sea Level Science*, Cambridge Univ. Press 2014.

Rambøll (2020). Stormflodssikring af Kalveboderne. Oversvømmelser og skadesomkostninger. Bilag 4. Københavns Kommune og Hvidovre Kommune.

Vejdirektoratet (2021). Stormflodssikring omkring København. Overblik – ydre løsning. Udkast 8. juni 2021.

Stendel, M., Francis, J., White, R., Williams, P. D., and Woollings, T. (2021). Chapter 15 - the jet stream and climate change. *Climate Change*, pp 327–357.

Su, J. et al (in prep.). Integrating historical storm surge events into the flood risk security in a major coastal city Copenhagen.

United Nations Environment Programme (2022). Emissions Gap Report 2022: The Closing Window — Climate crisis calls for rapid transformation of societies. Nairobi.
<https://www.unep.org/emissions-gap-report-2022>

Bilag A: Delkommissorium for undersøgelse af sikringsniveauer omkring København

Prognoser for klimaforandringer viser, at der i fremtiden vil indtræffe flere og højere stormfloder, bl.a. på baggrund af et stigende havniveau. Dette gælder også i hovedstadsområdet, som vil blive ramt oftere og af kraftigere stormflodshændelser end hidtil.

Forundersøgelsen af stormflodssikring af den centrale del af hovedstadsområdet indeholder en række delundersøgelser, herunder en analyse af, hvilke sikringsniveauer der kan fastsættes omkring København. Analysen af sikringsniveauer skal danne grundlag for de øvrige analyser vedrørende finansiering, tekniske løsninger mv.

Analysen af sikringsniveauerne skal bygge på en risikobetragtning, hvor faren tager udgangspunkt i stormflodshændelser, og sårbarheden belyses i form af skadespotentialer, som dog sættes i relation til de forskellige gruppers risikoprofil, jf. nedenfor.

Stormflodshændelser opgøres typisk med statistiske sandsynligheder i forhold til en såkaldt returperiode. En 100-års hændelse betyder fx, at man har en vandstand, der er så høj, at den statistisk kun forventes at forekomme én gang hvert 100. år.

Store infrastrukturejere som Metroselskabet, Sund & Bælt m.fl. arbejder med returperioder for stormflodshændelser på mellem 2.000 og 10.000 år. I praksis betyder det, at selskaberne stiller krav til en meget høj beskyttelse (tilnærmelsesvis en nultolerance) mod oversvømmelser af stationer, baneanlæg, tunneler mv.

Der gennemføres en analyse af nødvendige sikringsniveauer omkring København, der tilgodeser infrastrukturejernes meget høje sikringskrav (nultolerance) for stormflodshændelser. Målet er at definere tilstrækkelige sikringsniveauer omkring København, der dækker alle interessenters behov.

Kommunale interesser arbejder typisk med lavere returperioder på mellem 100 og 500 år. Private ejendommejerers risikovillighed er typisk endnu større, da konsekvenserne opleves som mere begrænsede. Her er der typisk tale om returperioder på mellem 50 og 200 år.

Der er store planmæssige og økonomiske potentialer i at vurdere en samlet ydre stormflodssikring af den centrale del af hovedstaden, der er tænkt sammen med en fremtidig byudvikling, og hvor en evt. faseopdelt eller adaptiv udbygning af stormflodssikringen er mulig.

Formål og afgrænsning

Formålet med delundersøgelsen er at gennemføre en analyse af behovet for oversvømmelsesbeskyttelse fra hav. Med udgangspunkt i infrastrukturejernes meget høje sikringskrav for stormflodshændelser (nultolerance) skal det undersøges, til hvilken statistisk hændelse forskellige områder og anlæg skal beskyttes. På baggrund af behovsanalysen analyseres de nødvendige sikringsniveauer/sikringskoter for sikringsanlæg omkring København. Analysen af

sikringsniveauer danner grundlag for de efterfølgende delundersøgelser af teknik, miljø og anlægsøkonomi mv. I analysen inddrages opdateret højvandsstatistik samt seneste data fra FN's Klimapanel (IPCC).

I arbejdet skal der tages højde for de topografiske forhold med hensyn til at kunne opnå en effektiv beskyttelse af et samlet område. Målet med denne delanalyse er at skabe et grundlag for de øvrige delanalyser vedrørende tekniske løsninger mv. En ydre højvandsbeskyttelse vil dække området fra Avedøre i syd, via Amager til Københavns Kommunegrænse i nord. På det sydlige Amager undersøges en sandsynlig basisløsning, hvor Ullerupdiget forhøjes og forlænges, så det forbindes med en ny sikring af Kastrup Halvø. Dette udelukker ikke, at der kan ses på en løsning, som omfatter Dragør.

Analysen af sikringsniveauer indeholder følgende elementer:

- Afklaring og forståelse af nultolerance, acceptabel restrisiko, tidsperspektiv for design- og sikringsniveauer omkring København. Indledningsvis skabes en fælles forståelse for de teknisk/faglige begreber, og de involverede parterers behov for beskyttelse mod oversvømmelse afdækkes. Parterne vil skulle redegøre for deres acceptable restrisiko, og der skal træffes beslutning om sikringsniveaernes tidsperspektiv.
- Kortlægning og beskrivelse af historiske stormfloder, højvandsstatistikker, viden og data fra FN's klimapanel, landbevægelse samt evt. lokale sætninger med udgangspunkt i analysens geografiske område. Det statistiske grundlag for arbejdet vil være KDI's højvandsstatistikker, og undersøgelsen kan komme med anbefalinger ift. anvendelse af den nutidige højvandsstatistik til analysens formål og mulige forbedringer af denne. Eksisterende data og viden om historiske stormfloder samles, og der udarbejdes en beskrivelse af de oversvømmelser, der har fundet sted tidligere og har forårsaget omfattende skader, og som sandsynligvis vil kunne gentage sig i fremtiden, herunder en beskrivelse af oversvømmelsernes omfang, strømningsveje mv. Hændelserne inddeles i tre kategorier af stormfloder med ringe sandsynlighed, middelstor sandsynlighed og stor sandsynlighed. Hændelsernes sandsynlighed bygger på KDI's højvandsstatistik samt eventuelle statistiske beregninger.
- Vurdering af fremtidens udvikling af havniveau samt vind- og bølgeklimate i området set i lyset af klimaforandringer. Analysen bygge særligt på DMI's højtopløste data fra bl.a. Klimaatlas, bølgedata og stormflodsanalyser, der tager udgangspunkt i de nyeste fremskrivninger for den globale havniveauanstigning fra IPCC. Dette vil omfatte data og viden om bl.a. fremtidig udvikling af havspejlet samt vind- og bølgeforhold. Der skal desuden tages stilling til behov for evt. belysning af flere IPCC-scenarier. Beskrivelsen skal også omfatte en analyse af, hvilke skader fremtidige oversvømmelser vil kunne forårsage i hovedstadsområdet under hensyntagen af klimaændringers effekter. Endelig skal beskrivelsen indeholde oplysninger om landbevægelse og evt. lokale sætninger i området.
- Analyse af beskyttelsesbehovet mod oversvømmelse fra hav på grundlag af statistiske hændelser og baglandets sårbarhed. På baggrund af parternes redegørelse for deres acceptable restrisiko og beskrivelsen af historiske og fremtidige stormfloder, samt de potentielle skader i København (punkter 1-3), udarbejder og fastlægger arbejdsgruppen beskyttelsesbehovet for oversvømmelse fra hav.
- Vurdering af nødvendige sikringsniveauer/sikringskoter omkring København under inddragelse af tillæg for effekten af klimaforandringer, tillæg for lokal vind- og bølgeopstuvning, tillæg for bølgeop- og overløb på beskyttelsesanlæg og evt. tillæg for landbevægelse og lokale sætninger. Efter fastlæggelsen af sikringshøvet beregnes de tillæg for lokal vind- og bølgeopstuvning samt tillæg for landbevægelse og lokale sætninger. Der kan opstå behov for datamodellering i forhold til beregning af tillæg for vind- og bølgeopstuvning. Sikringsbehovet sammen med tillæggene udgør endeligt sikringsniveauer/sikringskoter omkring København.

- Sammenstilling og afrapportering af analysens resultater og konklusioner udformet som en indstilling.

I analysen vil arbejdsgruppen endvidere vurdere foreliggende kortlægning og beskrivelse af mulig teknisk løsningsrum for opnåelse af sikringsniveauerne i området, herunder principielle koncepter som ydre sikringslinje, tilbagetrukket sikringslinje og dobbelt sikringslinje. Sidstnævnte koordineres med Arbejdsgruppe Teknik, Miljø og Anlægsøkonomi.

Organisering

Delundersøgelsen organiseres i form af en arbejdsgruppe bestående af følgende parter:

- Miljøministeriet/Kystdirektoratet
- Transportministeriet
- DMI
- De fire kommuner Hvidovre, Dragør, Tårnby og København
- Infrastruktorejere: Metroselskabet, Sund & Bælt, Københavns Lufthavne, Banedanmark, DSB samt evt. ad hoc deltagere (fx forsyningsselskaber)

Formandskabet af arbejdsgruppen varetages af Miljøministeriet/Kystdirektoratet, som ligeledes varetager sekretariatsfunktionen. Miljøministeriet/Kystdirektoratet referer til styregruppen for forundersøgelsen af stormflodssikring af den centrale del af hovedstadsområdet.

Tidsplan

Delundersøgelsen forventes gennemført i perioden 3. kv. 2022 til 2. kv. 2023. Processen kan inddeles i følgende overordnede trin:

- 3. kv. 2022: Parterne inviteres til opstartsmøde og forventningsafstemning
- 4. kv. 2022: Sammenstilling af faktuelle oplysninger, såsom højvandsstatistik, betydning af nultolerance, relevant data fra IPCC, foreliggende undersøgelser på fremtidige sikringskoter
- 1. kv. 2023: Vurdering af nødvendige sikringsniveauer omkring København og forelæggelse af delkonklusioner for styregruppen
- 2. kv. 2023: Afrapportering af delundersøgelsens konklusioner



Kystdirektoratet
Højbovej 1
7620 Lemvig

www.kyst.dk