

Risiko management ifm stigende havvandstand

DTUs bidrag til Realdania baseline i spor 1 i projektet "Byerne og det stigende havvandspejl"

Karsten Arnbjerg-Nielsen og Roland Löwe

September 2019



Risiko management i forbindelse med stigende havvandstand

DTUs bidrag til Realdania baseline i spor 1 i projektet "Byerne og det stigende havvandspejl"

Report
2019

By
Karsten Arnbjerg-Nielsen og Roland Löwe

Copyright: Reproduction of this publication in whole or in part must include the customary bibliographic citation, including author attribution, report title, etc.

Published by: DTU, Department of Environmental Engineering, Bygningstorvet, Building 115,
2800 Kgs. Lyngby Denmark
www.env.dtu.dk

Forsidefoto Karsten Arnbjerg-Nielsen

Preface

Denne rapport er udarbejdet som led i Realdanias projekt "Byerne og det stigende havvand" hvor DTU deltager i styregruppen på Spor 1 om forskning, data og erfaringsopsamling. Dette notat fokuserer på risikomanagement af byer i forbindelse med stigende havvandstand med fokus på stormfloder. Sammen med 5 andre notater om hhv. landskabsbaseret planlægning, arkitektur, jura, økonomi og antropologi udgør det basis for et samlet notat om den aktuelle baseline for forskning og viden om, hvordan stigende havvandstand håndteres i Danmark.

Lyngby, September 2019

Forfatterne

Indhold

1.	Indledning.....	5
2.	Risiko.....	6
3.	Fareidentifikation	12
4.	Eksponering	18
5.	Sårbarhed.....	21
6.	Modellering af den samlede risiko nu og i fremtiden.....	23
7.	Konklusion.....	26
8.	Referencer.....	28

1. Indledning

Vandstanden i havet er aldrig konstant, den ændrer sig som summen af en lang række påvirkninger på en lang række frekvenser. Få sekunder kalder vi bølger, 12 timer kalder vi tidevand. Det har vi indrettet vores samfund på ved at give vandet plads til disse variationer i og omkring vores byer og lade vandet indgå i byens form og udtryk. Der er åbenlyse fordele ved at være tæt ved vandet, dels fordi vi skal bruge det til praktiske formål, f.eks. havnedrift, og dels fordi det giver stor værdi blot at være i nærheden af havet. Det giver dog skader hvis vi kommer for tæt på. Dynamikken i vandstanden gør det vanskeligt at finde den rette balance, især fordi meget sjældne hændelser kan have meget store konsekvenser og fordi det kan være svært at opgøre skaderne. De kan dog være voldsomme: Tsunamien i Japan i 2011 og stormfloden i Holland i 1953 er begge eksempler på hændelser, der på afgørende måder har haft indflydelse på de to landes samfund og selvforståelse. Den seneste store stormflod i Danmark var i 1872 og den har sat sit tydelige aftryk i det sydlige Danmark i form af høje diger omkring bl.a. Falster, ligesom stormfloder i et historisk perspektiv har præget bosætning og erhverv i Danmark (Poulsen, 2019). Så mens det kan være vanskeligt at opgøre skaderne er det absolut nødvendigt at prøve på det for at finde den rette balance.

Omkostninger fra stormfloder vil stige voldsomt i løbet af få årtier som en indirekte effekt af klimaforandringer. Det skyldes primært at den gennemsnitlige havvandstand stiger globalt, mens effekten af stigende storme vil være af mindre betydning (IPCC, 2014). Såfremt man ikke gradvist tilpasser sig stigningen vil skader således opstå med større og større hyppighed. For skybrud er den dominerende skade de moderate oversvømmelser, mens de største skader nok skaber store overskrifter, men bidrager ret lidt til den samlede omkostning. I den nuværende situation i Danmark er det de store storme, der bidrager mest til den samlede skade. Den stigende havvandsstand vil medføre et skifte, så den samlede skade primært vil bestå af relativt små stormfloder. I dette notat vil der stadig tages udgangspunkt i, at skader i byer som følge af havvand vil ske i form af enkeltstående hændelser. Dermed belyses skaderne bedst ved at anvende risikoanalyser.

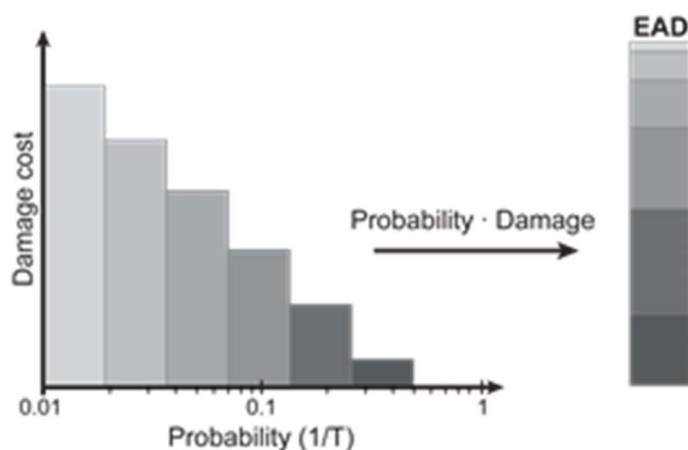
Det er generelt valgt at anvende de figurer som forefindes i litteraturen, på trods af, at disse ofte er på engelsk. Indholdet af figurerne er enten oversat i figurteksten eller i teksten, der refererer til figuren.

I kapitel 2 gennemgås begrebet risiko teoretisk med udgangspunkt i især IPCCs forståelsesramme. I de efterfølgende tre kapitler gennemgås de tre komponenter af risiko, fareidentifikation, eksponering og sårbarhed. I kapitel 6 diskuteres metoder til at modellere fremtidig risiko på byniveau med fokus på det nuværende stade af dansk og international forskning. I kapitel 7 opsummeres erfaringerne efter en skabelon, der er ens på tværs af de seks delnotater.

2. Risiko

2.1 Beregning af risiko

Tekniske risikovurderinger benyttes i mange sammenhænge til at lave opgørelser over skader. Der er standardiserede metoder til at opgøre skaderne, som ofte opgøres i gennemsnitlig skade/kroner per år (Olsen et al., 2015; Zhou et al., 2012). I figur 2.1 er en typisk skadesfunktion for et ubeskyttet opland (altså uden diger mv.) angivet, ligesom det er illustreret, at de sjældne hændelser, omend de virker meget voldsomme, ikke giver et stort input til den beregnede gennemsnitlige skade, fordi hændelserne sker meget sjældent. Det er den forskel, som i ingeniørsammenhænge gør, at man skelner mellem "dimensionsgivende" og "bevillingsgivende" hændelser.



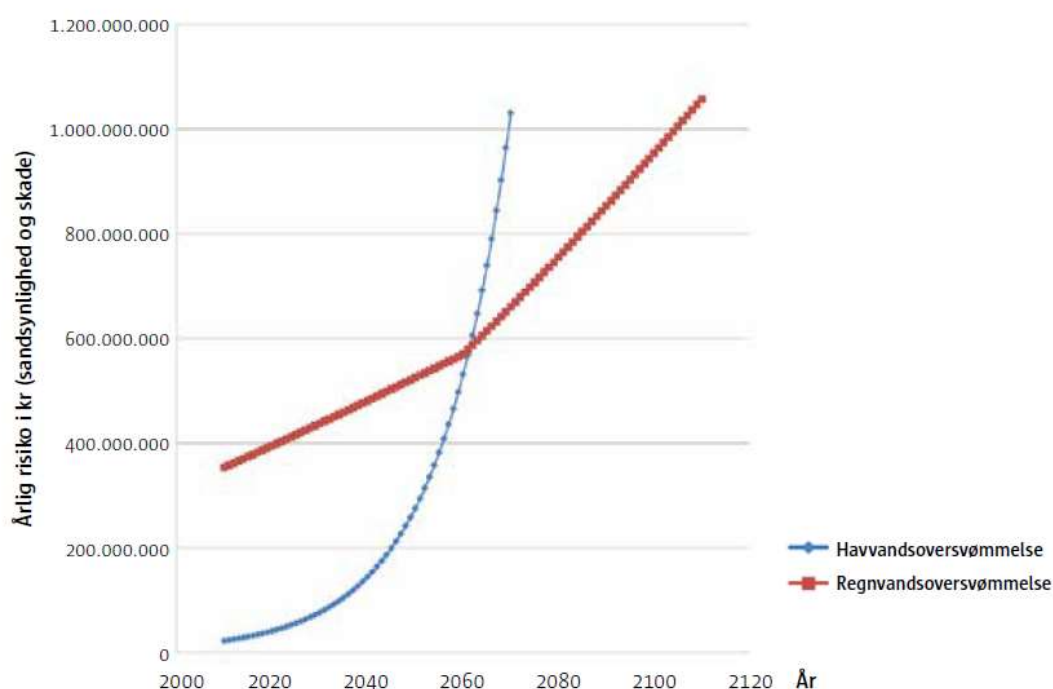
Figur 2.1. Typisk fordeling af skaderne som funktion af sandsynligheden for skader (den inverse af gentagelsesperioden - en sandsynlighed på 0.01 står for en hændelse der sker en gang per 100 år). Selv om skaderne stiger efterhånden som hændelsen bliver større (højere gentagelsesperiode/lavere sandsynlighed) bliver bidraget til den gennemsnitlige årlige skade (EAD – expected annual damage) mindre. Fra Davidsen et al. (Davidsen et al., 2017).

I figur 2.2 er vist et eksempel på en beregning af gennemsnitlige skader og deres forventede udvikling ifølge klimaændringer for Københavns Kommune. (COWI, 2017) har lavet den tilsvarende analyse for hele landet og viser, at samlet udgør risikoen for stigende havvand en meget stor udfordring for Danmark. Også i international sammenhæng er Danmark særdeles udsat, fordi vi har lav befolkningstæthed generelt men alle byer ligger kystnært og store rigdomme og kyststrækninger ligger lavt.

Formålet med dette afsnit er at pege på, hvordan analyser baseret på sådanne risikovurderinger kan føde ind i beslutninger om klimatilpasning til stigende havvand. Rapporten

er inspireret af en doktor-afhandling, der pt er under evaluering. Mens doktorafhandlingen i sagens natur er bagudskuende, dvs. peger på hvilken viden der er opbygget i de senere år, vil dette notat i højere grad pege frem mod de områder, hvor mere viden vil medføre bedre mulighed for beslutninger.

Der er især to FN organisationer, der arbejder med mindskelse af risiko fra stigende havvandstand.. Den ene organisation er UNDRR (UN Office for Disaster Risk Reduction), der bl.a. står bag udviklingen af SENDAI, en analyseramme, der på baggrund af 7 mål arbejder med at forbedre landes politikker til at håndtere bl.a. oversvømmelser fra havvand. Den anden er IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), hvis analyserammer kort gennemgås nedenfor



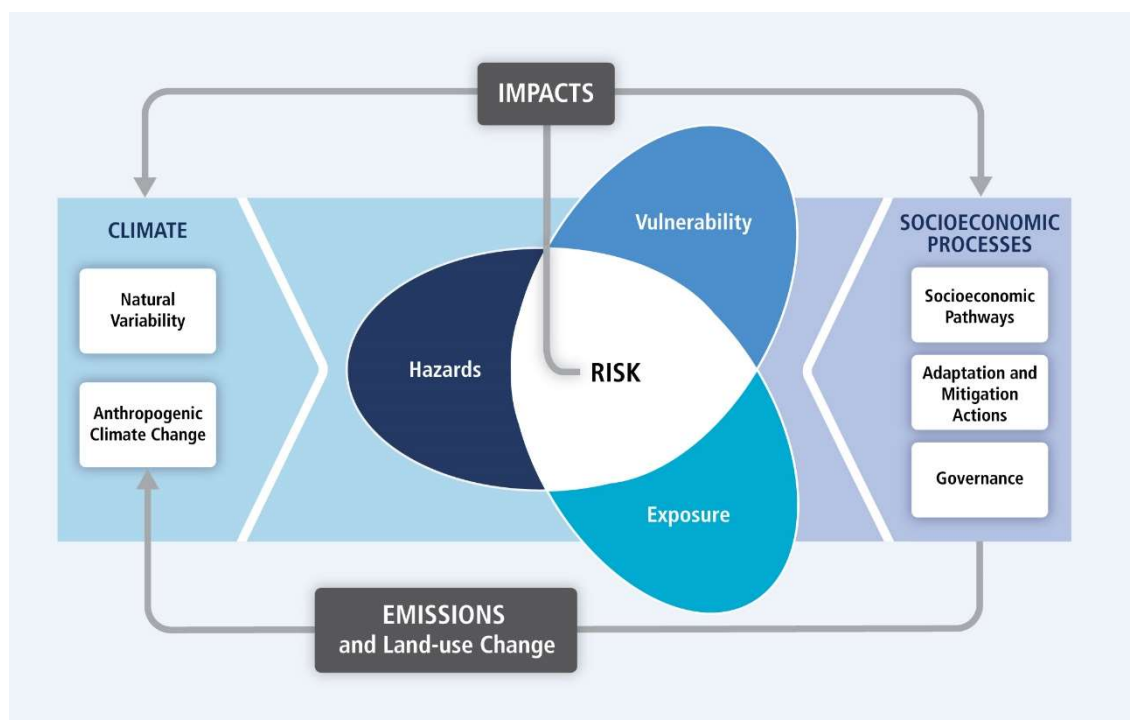
Figur 2.2. Fremskrivning af den årlige risiko for oversvømmelser for hhv. regn og havvand for Københavns Kommune under antagelse af forventede klimaforandringer og en uændret by (Københavns Kommune, 2011).

2.2 IPCC fremgangsmåde

Der er tre figurer, som repræsenterer hver sin fremgangsmåde, hhv. den fysiske, den organisatoriske, og den aktionsorienterede. Hver af disse fremgangsmåder er beskrevet kort nedenfor.

Figur 2.3 fremhæver IPCC selv som den grundlæggende figur til forståelse af klimatilpasning. Risiko for klimarelaterede effekter opstår og øges (hhv. mindskes) som et samlet pres fra to

sider, hvoraf den ene er det fysiske klimasystem og den anden er de socioøkonomiske tiltag som samfundet foretager. Rapporten gennemgår sådanne risici for en lang række effekter og påviser for hver effekt hvor stor ændringen i risiko vil være såfremt der kun sker ændringer i klimaet, samt i hvor høj grad man som samfund kan mindske denne påvirkning ved at imødegå ændringerne ved socioøkonomiske tiltag. Stigende havvandsstand er omtalt som en af de absolut vigtigste risici og er især karakteriseret ved høj eksponering af værdier, manglende institutionel kapacitet og social sårbarhed.

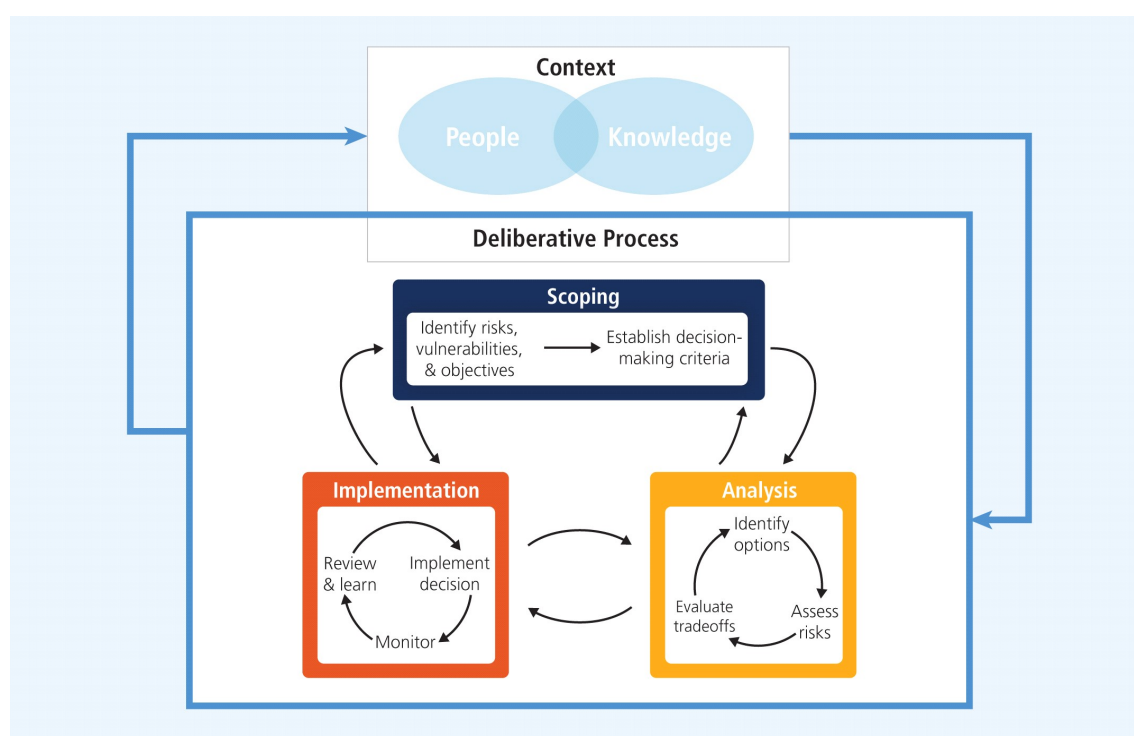


Figur 2.3. Risiko for klimarelaterede effekter er et resultat af interaktionen mellem klimarelaterede farer (f.eks. stormflod) og den konsekvens som denne fare kan medføre i form af at blive eksponeret overfor faren og de skader, der kan opstå som følge af denne eksponering. Disse to komponenter påvirkes af henholdvist klimaet (herunder stigende havvandstand og ændringer i storme) og de socioøkonomiske processer i samfundet, der enten kan forstærke eller mindske ændringen i risiko som følge af det ændrede klima. Fra IPCC (2014).

På grund af problemets kompleksitet anfører IPCC, at det er vigtigt at tilgangen til klimatilpasning er en iterativ proces, som illustreret i Figur 2.4. Selve risikoanalysen ses at ligge i den gule kasse (Assess risks), men med kraftige tilbagekoblinger til læringen undervejs i implementeringen (som f.eks. er den fase Københavns Kommunes Skybrudsplan aktuelt er inde i). Det er en genovervejelse af, hvilken ramme for klimatilpasningen, der er mest relevant, herunder at genoverveje, hvilke synergier det er relevante at høste i en given sammenhæng. Igen med henvisning til Skybrudsplanen har man lagt vægt på landskabsmæssige kvaliteter i byrummene som en væsentlig del af formålet, mens det afgørende formål for klimatilpasningen har været at opbygge en næsten total sikring mod oversvømmelse fra skybrud, defineret som

noget, der i løbet af ca 20 år skal udbygges til at kunne modstå en hændelse, der optræder med 1% sandsynlighed om året i år 2100. Det svarer til noget, der optræder med en sandsynlighed på ca. 0.4% sandsynlighed hvert år i det aktuelle klima. Der er behov for en tilsvarende framing af klimatilpasning på havvand, hvor kvantitative mål for risikoen for stormfloder kombineres med evt. stedspecifikke rammesætninger for sikring af f.eks. borgerinddragelse, landskabsmæssige værdier eller andre tiltag.

Opstillingen af succeskriterier for risikovurderingen er en overset, men ofte kritisk fase. I mange situationer anvendes en fast tilladelig hyppighed, formuleret i form af en gentagelsesperiode for fejl. Det kan f.eks. være en gang hvert 20. år, hvilket svarer til 5% sandsynlighed for at hændelsen optræder pr. år. Det er, især blandt ingeniører og tilsvarende tekniske standarder, en hyppigt anvendt metode, fordi den er enkel og gennemsigtig. Den har dog også en væsentlig ulempe i form af, at en sådan frekvens ofte anvendes også hvor den ikke er rimelig. En hyppighed på 5% om året anses ofte for at være rimelig for f.eks. staldbygninger og havnearealer, men vil derimod være helt uacceptabel ved vurdering af kritisk infrastruktur (f.eks. hospitaler og trafikknudepunkter) og monumenter af kulturhistorisk betydning (f.eks. visse museer). Der er derfor i praksis en tendens til, at sådanne faste regler anvendes langt udenfor de rammer som oprindeligt var baggrunden for fastlæggelsen af reglen.



Figur 2.4. Figuren illustrerer hvordan klimatilpasning er en iterativ proces hvor selve risikoanalysens rammesætning, der starter med at afgrænse problemstillingen og opstille klare mål for succes (f.eks. en acceptabel hyppighed af oversvømmelser eller et bestemt afkast af investeringen i klimatilpasning). Herefter udføres den konkrete risikovurdering ved at undersøge forskellige strategiers positive og negative påvirkning af risikoen over tid. Efter analysen implementeres de(t) bedste strategier samtidigt med at det hele tiden overvåges at strategierne

har den ønskede effekt. Denne læring har en tilbagekobling til såvel rammesætningen af analysen som den konkrete risikovurdering. Fra (IPCC, 2014).

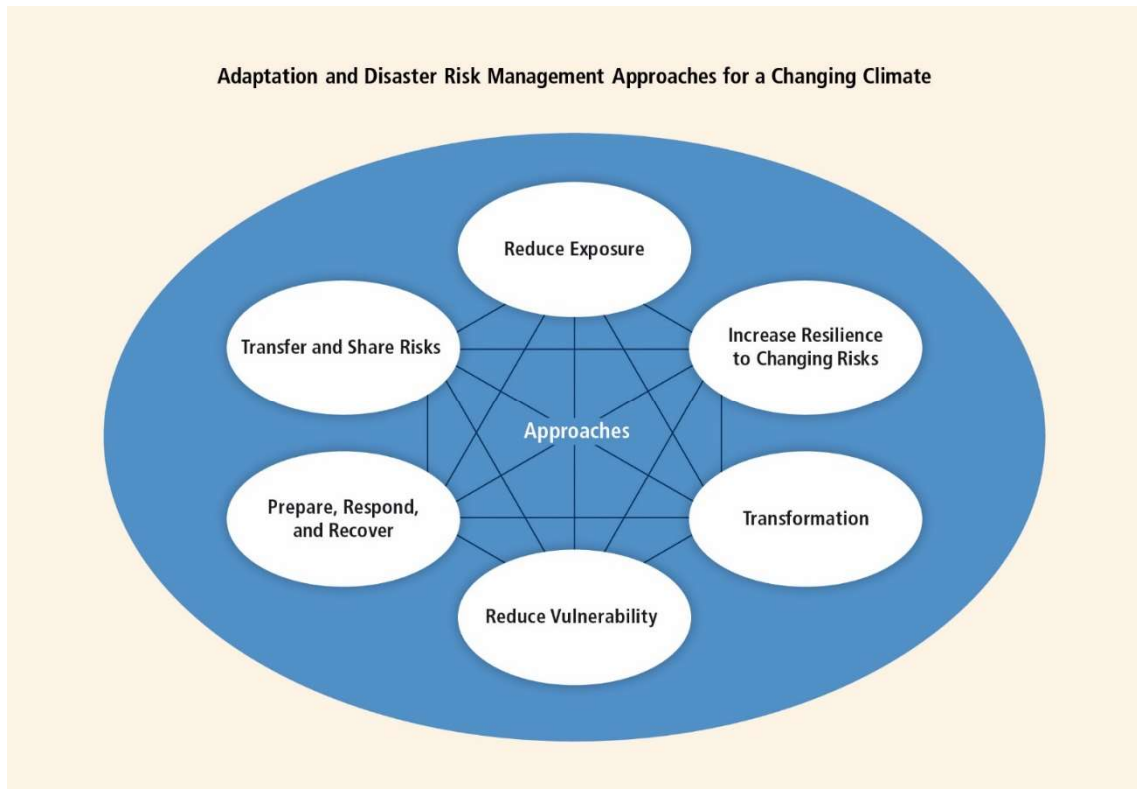
I sådanne tilfælde kan man enten skønne andre tilladelige frekvenser, eller anvende mere avancerede formuleringer af succeskriterier. Der findes hydrologiske metoder til at skønne niveauer, som "aldrig" kan forekomme, som anvendes til f.eks. dimensionering af dæmninger ved floder. I en dansk kontekst vil det virke mere naturligt at formulere kravet i form af et økonomisk kriterium, f.eks. ved en maksimal tilladelig gennemsnitlig skade, en maksimal skade fra en enkelt hændelse, eller et krav om økonomisk effektivitet i forbindelse med klimatilpasningen.

I figur 2.5 er angivet et oversigt over de hovedgreb, som klimatilpasning benytter sig af uafhængigt af hvilken fare, der skal mindskes. Skybrudsplanen for København benytter sig næsten udelukkende af at reducere eksponering. En tilsvarende tilgang ved stigende havvand vil være at bygge diger som f.eks. ved Falster og Avedøre Holme. Begge typer af tiltag er primært rettet mod at sænke risikoen til et niveau, der samlet set for samfundet er acceptabelt. Det ses dog, at der er andre muligheder, samlet under fire overskrifter, der er rettet mere mod at fordele risikoen bedre end at reducere den:

- *Forberede, reagere og retablere:* At opbygge beredskabssystemer til at advare i realtid og udføre nødprocedurer såsom evakuering og midlertidige beskyttelsesforanstaltninger samt planer for genopbygning.
- *Overføre og dele risiko:* Især økonomiske risici kan overføres ved hjælp af nødfonde, forsikringer og gen-forsikringer. Oprettelsen af stormrådet er et eksempel på et sådant tiltag. Andre tilsvarende tiltag vil være at lade bygherre og entreprenører af nybyggeri dele tab fra oversvømmelser også efter at have solgt ejendommen i et tidsrum efter byggetidspunktet.
- *Øge resiliensen:* At styrke samfundets sociale, økonomiske og miljømæssige systemer så de lettere og hurtigere kan retablere deres basale funktion og struktur efter kraftige stormfloder.
- *Transformation:* Langsigtet ændring af de basale egenskaber af naturlige og menneskeskabte systemer.
- *Reducere sårbarheden:* Tiltag, der er rettet mod at sikre at oversvømmede områder ikke tager skade af oversvømmelsen, f.eks. ved at huse er sikret med vandtætte membraner.

2.3 Farer ved anvendelse af traditionel risikoanalyse i forbindelse med stigende havvandstand

En af de store udfordringer ved analyser af havvandstand er den betydelige usikkerhed, der uvægerligt er når man skal opgøre effekterne af noget man aldrig (eller kun meget sjældent) har målt. Antagelserne er betydelige, som det vil fremgå under hvert element, der skal skønnes for at kunne beregne en risiko.



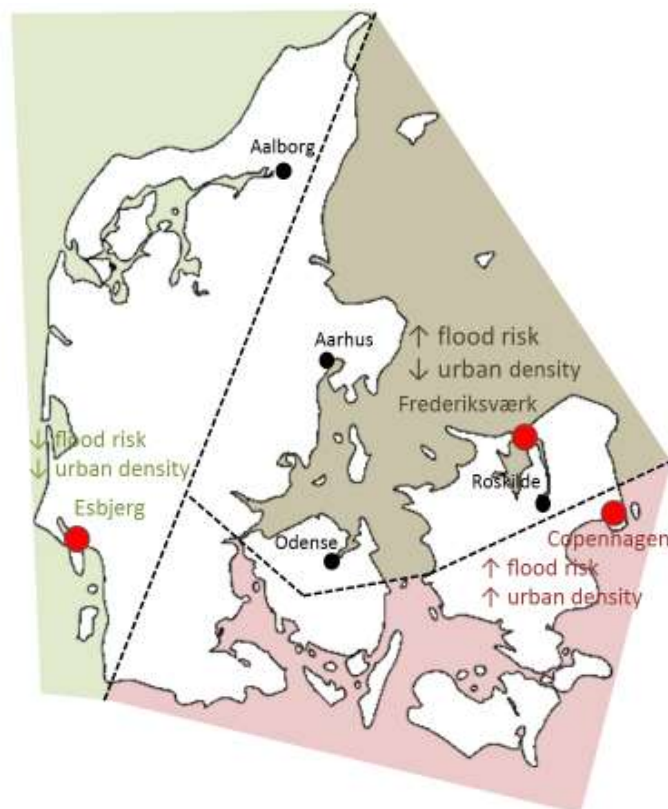
Figur 2.5. Oversigt over de vigtigste tilgange til klimatilpasning og risikostyring i forbindelse med ekstreme hændelser. Fra (IPCC, 2012).

Mere grundlæggende er det problematisk, at man kun kan lave en risikoanalyse for en problemstilling, man kan overskue. Det står i stigende grad klart, at konsekvenserne af en oversvømmelse er svære at forudsige, fordi de når langt udenfor selve det oversvømmede område. Et kendt eksempel er oversvømmelserne i Thailand i 2011, der påvirkede hele IT-industrien i længere tid, fordi der var en global mangel på harddiske (Haraguchi and Lall, 2015). En anden problemstilling er, at i risikoanalyse sidestilles alle typer af risiko, omend det er velkendt, at mennesker har vidt forskellig tilgang til forskellige risici. En af de mest simple og intuitive måder at skelne mellem forskellige risici er hvorvidt man frivilligt udsætter sig for en kendt risiko eller uforvarende udsættes for den. Disse processer betyder samlet set, at der er nogen, der ud fra sociale, etiske og økonomiske argumenter mener, at meget sjældne hændelser skal gives en større vægt end i almindelige risikovurderinger, hvor disse meget voldsomme hændelser næsten ikke indgår med nogen vægt. Argumenterne støttes også af, at det ofte er i forbindelse med sådanne hændelser, at der virkeligt sker voldsomme tilpasningstiltag, såsom handlingsplanen for diger i Holland efter oversvømmelsen i 1953. Et eksempel på en konkret anvendelse ses i Kellermann et al. (Kellermann et al., 2016).

3. Fareidentifikation

3.1 Danske højvandsstatistikker

Siden omkring 1880 er der udført systematiske målinger af havvandstanden ved Danmarks kyster. Disse data indsamles og bearbejdes ca. hvert 5 år med henblik på at udarbejde statistikker på stormfloder af Kystdirektoratet, den seneste i 2017 (<https://kyst.dk/publikationer/oversvoemmelse/hoejvandsstatistikker/>). Da stormfloder er drevet af storme (sic!) vil det være store kystområder, der påvirkes ad gangen. Figur 3.1 viser, hvilke områder, der påvirkes samtidigt. Saddelpunkter begrænser vandgennemstrømningen til de indre farvande fra både Østersøen og Nordsøen, hvilket medfører, at der ofte vil være lavvande i Svendborg, hvis der er højvande i Odense. Når stormen mister i styrke vil vandet søge tilbage til den typiske fordeling, og dermed i større eller mindre omfang skabe oversvømmelser i "naboområdet".

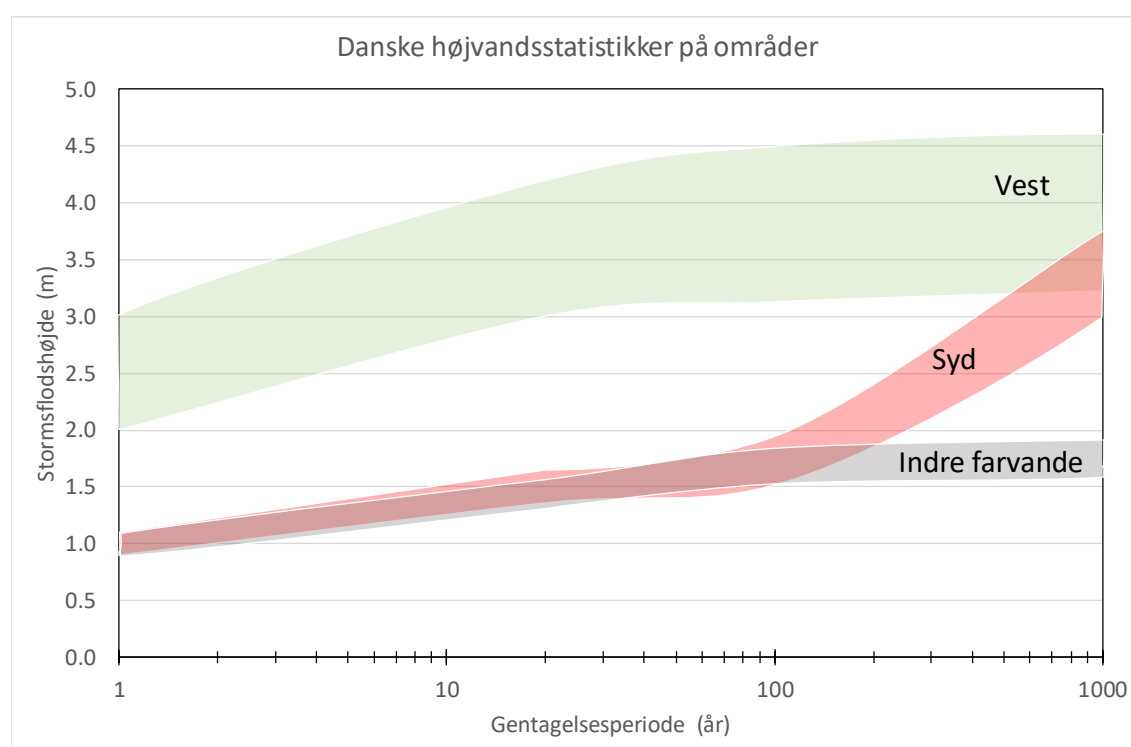


Figur 3.1. Illustration af de tre vigtigste regioner i Danmark med hensyn til stormfloder. Det er storme, der driver stormfloder og dermed er det store sammenhængende kystområder, der påvirkes samtidigt. Illustration fra Hennequin et al (Hennequin et al., 2018).

Kystdirektoratets statistikker viser, at der er en meget stor regional variation. Især i det sydvestlige Jylland er stormfloderne meget mere voldsomme end i resten af landet. Det indgår naturligvis i byplanlægningen. Mens store dele af det centrale København vil blive oversvømmet

ved vandstande 4 m over daglig vande er der i Esbjerg ikke mange skure, der ikke ligger højere.

I Kystdirektoratets statistikker indgår kun data fra de officielle måleserier, der som nævnt starter omkring 1880. I forbindelse med dimensionering af Storebæltsforbindelsen blev der dog lavet et stort arbejde med at gennemgå historiske kilder for at verificere statistikkerne for mere sjældne hændelser. Disse statistikker er flere gange blevet opdateret, senest i forbindelse med klimatilpasning af Metroen. De historiske kilder viser, at Kystdirektoratets statistikker undervurderer stormfloder fra Østersøen væsentligt. På figur 3.2 er angivet et skøn over variationen over ekstremstatistikken for hvert af områderne i figur 3.1. Statistikken omkring Østersøen er unik i international sammenhæng og giver særlige udfordringer med optimering, fordi der er så stor forskel mellem hvad der typisk vil ske i en generation og et worst case scenarium.



Figur 3.2. Omtrentlige stormflodsniveauer fordelt på region (samme farver og områdeopdeling som i figur 3.1). Det ses, at kystområder, der eksponeres fra Østersøen, i typiske stormfloder vil have en statistik som de indre farvande, mens de meget sjældne hændelser er meget voldsommere og nærmer sig hændelser fra Nordsøen i voldsomhed. Bearbejdningen er baseret på Kystdirektoratet (2012, 2017) og analyse af stormfloder fra Øst (COWI, DTU og Kystdirektoratet, 2017). Det bemærkes, at i Vesterhavsregionen er stormfloderne mindre nord for Limfjorden end angivet på figuren.

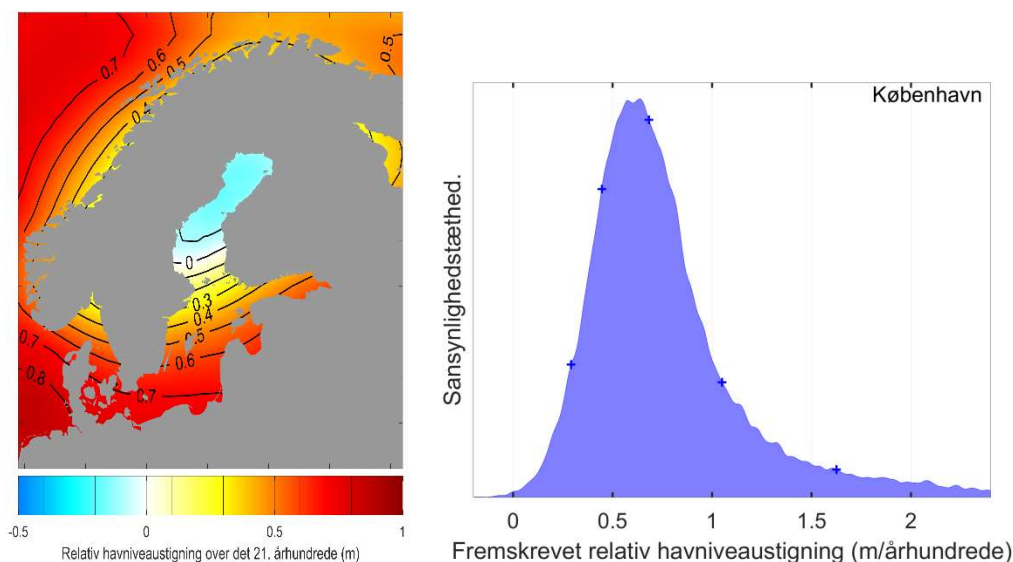
Som det fremgår af ovenstående er der et godt datamateriale til at skønne ekstremstatistikkerne ud fra og der er anvendt state-of-the-art metoder til at udtrække denne viden til brug for risikoanalyserne. Der er dog mindre huller i viden; dels mangler der en bedre model og forståelse for, hvordan lokale forhold får indflydelse på de mere regionale statistikker, altså at

mindske den usikkerhed, der er ved at ekstrapolere fra nærmeste måler til det punkt, der skal beregnes en sandsynlighed for.

3.2 Stigende ekstremer forårsaget af klimaændringer

Klimaændringer forventes at påvirke stormfloder på to måder; dels ved at middelvandstanden i havet øges og dels ved at antal og kraftighed af storme øges. Flere undersøgelser tyder på, at antallet og kraftigheden af storme har en betydning for Danmark, omend den er lille (Åström et al., 2016; Pedersen et al., 2012). På globalt plan har IPCC også angivet, at det er ændringen i middelvandstanden, der forventes at have største betydning. Som angivet i figur 3.3 er der en ganske betydelig usikkerhed på fremskrivningerne af den ændrede havvandstand frem mod år 2100, en usikkerhed, der er væsentligt større end det bidrag, der forventes at komme fra større storme. Derfor ignoreres dette bidrag ofte. Til gengæld er der dele af Danmark, der stadig oplever landhævning efter sidste istid. Dette påvirker nettostigningen af havvandstanden som vist på figur 3.3. Det bemærkes, at der er en meget stor træghed i stigningen, der vil fortsætte i flere århundreder allerede med de nuværende udledninger.

Der er stor enighed omkring fremskrivningerne der er præsenteret i figur 3.3. Der foregår stadig stor forskningsaktivitet på området, men der er tale om samarbejder mellem en række institutioner i globale netværk. Status er, at fremskrivningen i den sidste del af århundredet i høj grad afhænger af de fremtidige udledninger af drivhusgasser samt dynamikken i afsmeltningen fra bl.a. Grønland. Bemærk at en stigning på 0,6m indebærer at en stormflod der i øjeblikket forekommer i Østersøen en gang per 100 år i år 2100 vil forekomme hvert femte år.



Figur 3.3. Middelværdien af den forventede stigning i havvandstanden frem til år 2100 i forhold til nuværende niveau (til venstre) samt usikkerheden på denne middelværdi for København (til højre). Fra Hesselbjerg et al (2014).

3.3 Samtidige hændelser

Der er generelt en tendens til at flere vandekstremer optræder på samme tid. Maksimal vandføringer i vandløb og forhøjet grundvandsstand sker generelt og over længere tid om vinteren, hvor også stormfloderne forekommer. Således må man generelt antage, at især vandføringerne i vandløb er højere end gennemsnittet under stormfloder og at der i lavtliggende områder er høj risiko for oversvømmelse fra grundvand. Der er endvidere en forhøjet sandsynlighed for, at det regner kraftigt samtidig med at det er stormflod (Åström et al., 2016). I det nuværende klima er det dog for koldt om vinteren til at fremkalde virkeligt kraftige skybud, ligesom der om sommeren ikke forekommer de meget kraftige lavtryk, der driver de store stormfloder. Som beskrevet i Arnbjerg-Nielsen et al (2015) er det en antagelse, der næppe holder i et fremtidigt klima.

De samtidige hændelser vil ofte give skader, der er væsentligt større end hvis hændelserne optræder hver for sig. Nogle typer af tiltag, såsom diger, er sårbare, fordi de bygget under antagelse af, at der kun er for meget vand på den ene side af dem. I andre tilfælde skyldes de ekstra skader, at f.eks. kritiske adgangsveje er blokerede eller at kommunikationen er vanskeliggjort af strømodfald eller lignende, hvorved skader opstår som ikke optræder hvis der kun optræder en fare ad gangen. Det er altid svært at sikre sig at en risikovurdering indeholder alle væsentlige aspekter, men det er i særlig grad vanskeligt at lave vurderingen for samtidige hændelser. Det skyldes bl.a. at en samtidig hændelse med en samlet frekvens på omkring 1% om året kan bestå af mange kombinationer af hver af de to farer. Således kan f.eks. en stormflod med en frekvens på 10% om året pludselig have en effekt, som ellers kun optræder uhyre sjældent. Der er forskere der advokerer for, at skader ved meget store hændelser altid – og især ved samtidige hændelser – vil være væsentligt større end man kan forestille sig ved teoretiske risikoanalyser.

Området er generelt dårligt belyst; der er få undersøgelser og generelt er der kun få målinger, der specifikt er indsamlet til dette formål. Der er for eksempel ikke lavet nogen undersøgelser af forskellen mellem sammenhængen i de forskellige regioner hvori stormfloder optræder. Mange af de teknologier som pt. undersøges og anvendes i Danmark, antager, at stormfloder optræder uden at de andre vandrelaterede ekstremer tages i regning. I forhold til, hvordan klimaet forventes at udvikle sig, er det en antagelse, der ikke er rimelig. Der er et behov for at analysere denne påvirkning mere grundlæggende i forhold til fremskrivning af de fremtidige sandsynligheder for hver fare isoleret set samt hvornår og hvor meget man kan risikere, at de vil fremtræde samtidigt.

3.4 Svingende infrastruktur

Den danske infrastruktur er stadig lille og relativt simpel i international sammenhæng. Specielt i Holland er vandinfrastrukturen meget kompleks og vandets kredsløb styret i udpræget grad. Der er også meget store udfordringer: hovedparten (og de mest produktive dele) af landet ligger under havets overflade, der er en lang kystlinie og to af Europas største floder passerer igennem landet. Den maksimale vandføring i Rhinen er således ufattelige 16.000 m³/s og løber igennem tæt befolkede områder.



Figur 3.4 Eksempler på den udbredte anvendelse af lokale diger mv til at styre arealanvendelsen i hhv. nyudvundet land (øverst) og omkring de store åer, hvor landsænkning ofte gør, at vandspejlet er højere end det omgivende landområde (nederst). Billeder downloaded fra er fra <https://www.sfgate.com/travel/article/Exploring-Holland-s-charming-Polder-Country-5613997.php#photo-6559430> og <https://landscapeiskingston.files.wordpress.com/2014/01/r4r11.jpg>

Vandinfrastrukturen benyttes til at beskytte alle områder, men også til at sikre en hård prioritering af alle områder i landet. På figur 3.4 er vist eksempler på, hvordan denne prioritering sker i praksis ved at vælge hvilke områder der skal være oversvømmet. Det giver også Holland

et unikt datamateriale til at observere og modellere nødvendig vedligeholdelse og sandsynligheder for digebrud osv. Det er ikke data, som Danmark pt. har megen gavn af, men de vil kunne bruges til at skønne omkostninger og fordele ved at anvende diger som primær beskyttelse mod stigende havvandstand.

Det skal bemærkes, at Holland i sidste halvdel af det 20. århundrede systematisk forfulgte en strategi om hård beskyttelse. I det sidste årti har man i stigende grad skiftet strategi over mod mere bløde løsninger, især udmyntet i projektet "Room-for-the-river", der går ud på at etablere områder, der i nødsituationer kan oversvømmes for at sikre andre områder. De oversvømmede områder ryddes permanent for boliger og kritisk infrastruktur ryddes eller sikres, se figur 3.5.



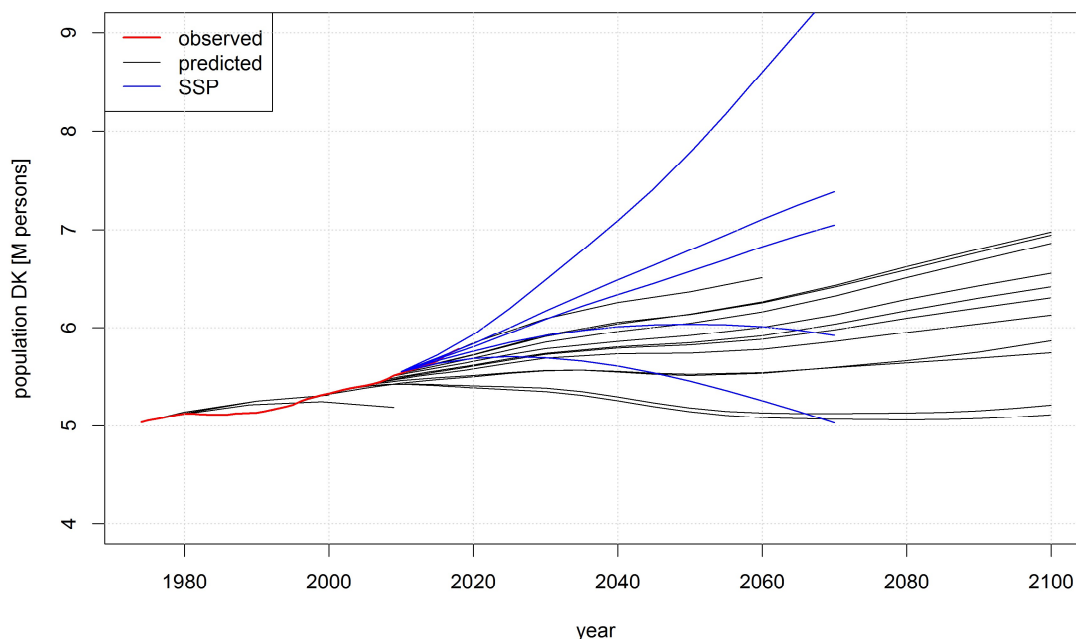
Figur 3.5. Eksempel på område, der er planlagt oversvømmet som led i Room for the river programmet i Holland ved store vandføringer i Rhinen. I baggrunden ses et bygværk på ca 2 km længde, der bruges til at styre, om det næste område også skal oversvømmes. Foto: Karsten Arnbjerg-Nielsen.

4. Eksponering

Eksponering kvantificerer hvor mange personer og værdier potentielt er udsat for risiko for oversvømmelse. Eksisterende risikoanalyser for Danmark er baseret på en analyse af de eksisterende bebyggelser (Kystdirektoratet, 2018). Eksponeringen er dog ikke en konstant størrelse men ændrer sig i forbindelse med udviklingen af nye byområder og strukturel beskyttelse i form af f.eks. diger, der forhindrer eksponering.

I hvilken grad byområder er eksponeret afhænger bl.a. af hvor mange områder der bliver udviklet, dvs. befolkningstilvækst, og hvor udviklingen foregår henne, dvs. i hvilken grad der anvendes regulering i form af f.eks. landsplandirektiver. Udvikling af nye, eksponerede byområder skaber politiske og økonomiske incitamenter til at investere i oversvømmelsessikring, mens en regulering af udvikling i oversvømmelsestruede områder kan betragtes som potentielt tab af livskvalitet.

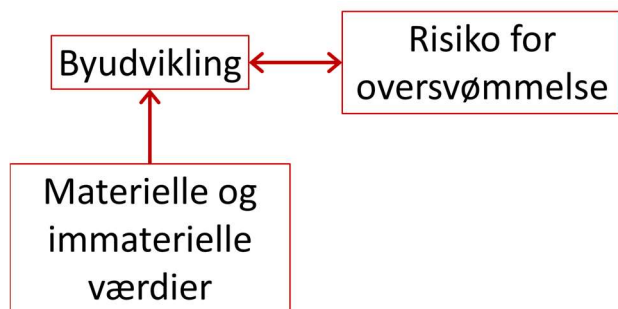
Sikring mod oversvømmelse fra havet vil typisk medføre en implementering af store anlæg med lange levetider. En vurdering af den miljømæssige og økonomiske bæredygtighed af disse anlæg kræver estimerer for den fremtidige oversvømmelsesrisiko over tidshorisonter af 50 år og længere, og derved også af de eksponerede værdier. Ligesom det fremtidige klima er usikkert, er der også betydelige usikkerheder i hvor stor befolkningen vil være i fremtiden. På landsplan er der stor usikkerhed om befolkningsprognoserne, se Figur 4.1, og disse usikkerheder forstørres naturligvis jo finere skala man betragter. For et konkret byområde er usikkerheden dermed meget stor over de minimum 50 år, som hård infrastruktur skal afskrives over. Usikkerheden i befolkningstilvækst falder sammen med usikkerhed over hvorvidt og hvordan den aktuelle urbanisering fortsætter, og hvor nye udviklinger placeres i byerne. En vurdering af fremtidig risiko for oversvømmelse fra hav må derfor udover forskellige klimascenarier også bygge på scenarier for forskellige mulige udviklinger af eksponeringen der tager højde for både forskellige befolkningsudviklinger og for forskellige byformer.



Figur 4.1. Befolkningsudvikling i Danmark 1974-2017 (rød), befolkningsprognoser genereret af Danmarks statistik i 1974, 1977 og 1980 og DREAM gruppen i årene 2001-2017 (sort) og befolkningsprognoser udviklet til brug af IPCC (blå) (Danmarks Statistik, 2017, 1981, 1978, 1974; DREAM, 2017; KC and Lutz, 2017).

Byudvikling i kystområder indgår i en kompleks interaktion med oversvømmelsesrisikoen, se Figur 4.2. Der er fordele ved at bosætte sig ved vandet (se, f.eks., (Kystdirektoratet, 2015)) såsom rekreativ værdi for borgere eller nem adgang til transport for virksomheder. Den opfattede oversvømmelsesrisiko indebærer en grænse for hvor tæt man bygger til havet, og specielt efter oversvømmelseshændelser reduceres risikoen ofte (Aerts et al., 2018). Effekten kan dog ofte kun observeres i en begrænset periode efter en oversvømmelse (Atreya et al., 2013; Pryce et al., 2011). Derudover kan fordelene ved at bosætte sig ved vandet være så store at borgere vælger det selvom risikoen er velkendt (Walls et al., 2018), hvilket i nogle områder betyder, at kystnære områder får karakter af "informal settlements", mens det i andre områder er ressourcestærke beboere, der dominerer lokalområdet.

Kystbeskyttelse kan ændre balancen mellem værdi og risiko og øge incitamentet til byggeaktiviteter i ellers oversvømmelsestruede områder. Dette medfører en stigning i eksponeringen, den såkaldte "**Levee-effekt**" (Domeneghetti et al., 2015; Tobin, 1995), og en risiko for katastrofale oversvømmelser hvis infrastrukturen fejler (Di Baldassarre et al., 2015).



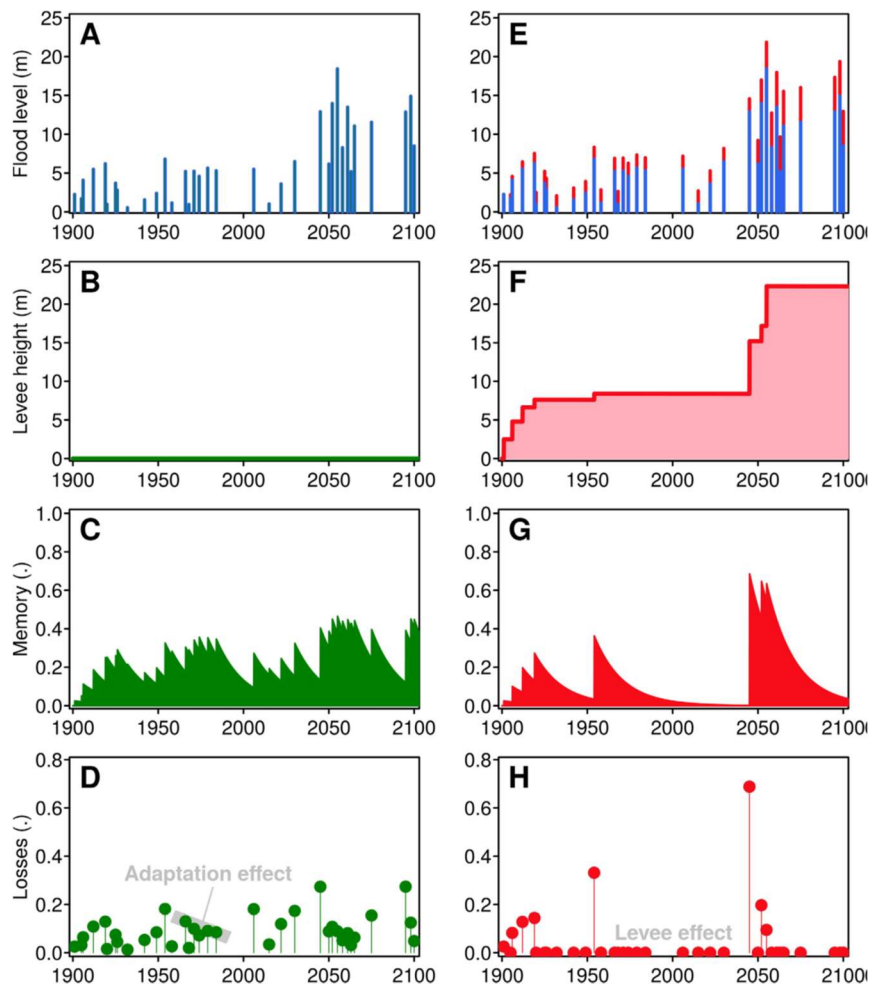
Figur 4.2. Interaktion mellem byudvikling, fare for oversvømmelse og materielle og immaterielle værdier af bosætningen ved kysten.

Økonomisk vækst medfører at de eksponerede værdier bliver større og dermed at sårbarheden stiger. Samtidigt får samfundet dog også flere ressourcer til at kompensere for eventuelle skader (Hallegatte et al., 2011). Undersøgelse på globalt plan indikerer, at den samlede risiko i de sidste 100 år har været konstant over tid når der kompenseres for udviklingen i BNP, f.eks. (Weinkle et al., 2018). Alligevel kan den stigende sårbarhed retfærdiggøre tiltag for at reducere risikoen, dvs. at implementere beskyttelse eller en gradvis flytning af byer ud af risikoområder, ikke mindst fordi havvandstanden er begyndt at stige, så der er to komponenter af risikoen der stiger i stedet for blot eksponeringen.

5. Sårbarhed

Sårbarhed beskriver i hvilken grad mennesker og værdier der er eksponeret til en oversvømmelse faktisk bliver skadet, og hvor stor skaden så bliver. Analyserne bygger typisk på "skadesfunktioner" som oversætter oversvømmelsesdybde til skade (se gennemgang i (Olesen et al., 2017)) eller bruger ikke-monetære indices for risikoen (Kystdirektoratet, 2018). Sidstnævnte metode er svær at sætte i relation til investeringsudgifter. Førstnævnte metode er til gengæld forbundet med stor usikkerhed og undervurderer ofte den samlede økonomiske påvirkning af samfundet, fordi det er svært at værdisætte mange skader. Hallegatte et al (Hallegatte et al., 2011) anbefaler således, at man i en analyse øger de samlede direkte skader med 40% som følge af skader på infrastruktur. Hertil kommer så en lang række effekter, som ikke prissættes, herunder sundhedsrisici, tidsforbrug hos private til oprydning, trafikforstyrrelser. Endvidere er sårbarheden også afhængigt af en række andre variable som ofte ikke indarbejdes i skadesfunktionerne, herunder længden af oversvømmelsen, folks evne til at reagere på varsling af stormfloden mv.

Ligesom eksponeringen bliver sårbarheden påvirket af hvor vidt et område har erfaringer med at blive oversvømmet. I områder hvor oversvømmelser er forekommet for nyligt vil der typisk være truffet simple sikringsforanstaltninger såsom flytning af generatorer og computere ud af hospitalskældere, installation af pumpestationer der sikrer at byområder ved højvande ikke oversvømmes af spildevand, bygning af vandfaste veje, installation af varselssystemer og gennemførsel af borgerinformationskampagner, mv. Disse tiltag bliver nedprioriteret jo længere tid der går mellem oversvømmelser, hvilket kan være en uønsket effekt af beskyttelsesløsninger (Di Baldassarre et al., 2015). Undersøgelsen i Kreibich et al (2017) tyder dog på, at effekten er ret langvarig, dvs. strækker sig over flere årtier. Der er dog ingen tvivl om, at forskellige strategier for beskyttelse mod oversvømmelser vil give meget forskellige kystområder og medføre væsentlige forskelle i resourceforbrug og omkostninger. Et centralt punkt er hvordan læring indbygges i både samfundet og den konkrete udformning af kystbeskyttelsen. I figur 5.1 illustreres to hovedkoncepter, et baseret på et miks af infrastruktur og arealmæssig planlægning og et baseret udelukkende på hård beskyttelse i form af f.eks. diger.



Figur 5.1. Konceptuel model af samfundets sårbarhed i scenarier med grøn tilpasning til oversvømmelser ("Room for the river" - venstre) og teknisk beskyttelse model oversvømmelse (højre). Figureerne viser vandstanden i floden (A, E – diger langs floderne medfører højere vandstande i Figur E), højden af digerene (B, F), samfundets erindring om oversvømmelsesrisikoen (C,G) og oversvømmelsesskaderne (D,H). Fra (Di Baldassarre et al., 2015).

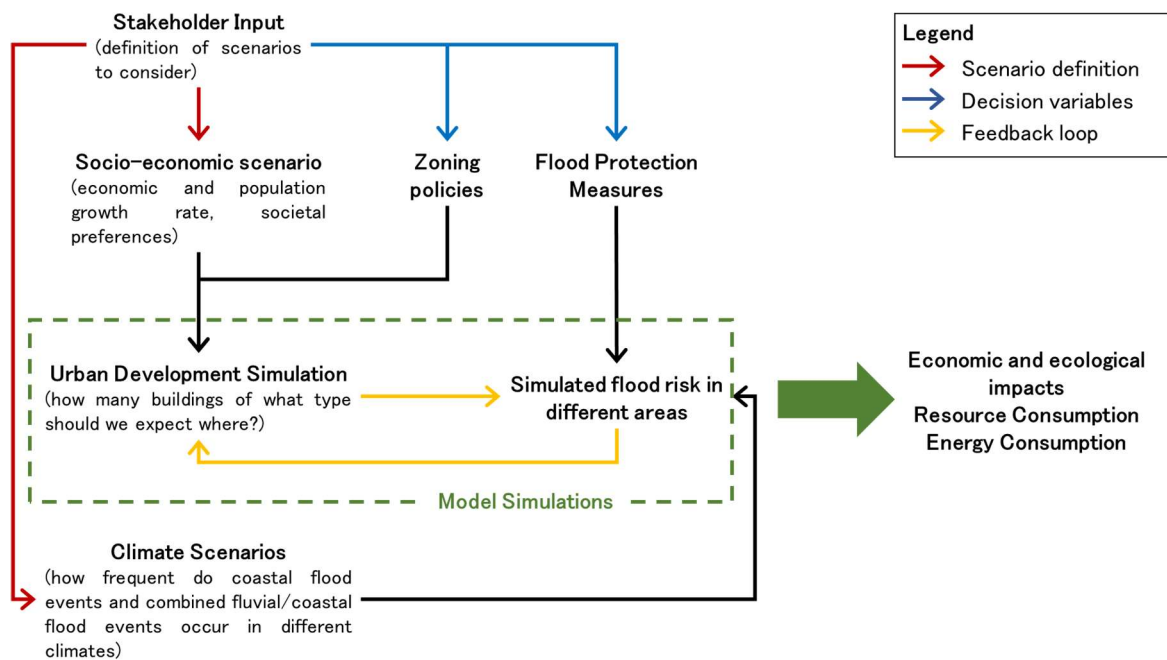
Modellering af sårbarhed er vanskeligt og afgørende for at fastsætte værdien af at lave tiltag mod oversvømmelsesrisikoen. Det er et robust resultat, at færre mennesker dør som følge af oversvømmelser i samfundet end tidligere, men også, at de økonomiske omkostninger er stigende. I en situation, hvor Danmark går fra faldende til stigende havvandstand og hvor der ikke har været alvorlige stormfloder i mands minde er det særligt svært at skabe opmærksomhed om behovet for at mindske sårbarheden, fordi der ikke er almen opmærksomhed på problemets omfang.

6. Vidensbehov

Dette afsnit giver først et overblik over et workflow som adresserer de væsentlige usikkerheder i risikovurderingen. Derefter udpeges fagområder hvor der er behov for nyt viden, så risikovurderingen og den efterfølgende beslutningstagning kan bygge på et rationelt grundlag.

6.1 Modellering af den samlede risiko nu og i fremtiden

Som det fremgår af de tidligere afsnit kan den samlede risiko for et konkret byområde ikke fremskrives præcist. Som beskrevet i de forrige afsnit er det usikkert hvordan både eksponeringen, sårbarheden og oversvømmelsesfaren udvikler sig i fremtiden. Vurderingen må derfor bygge på en scenarie-baseret tilgang, hvor de i planlægningsprocessen involverede aktører vurderer hvilke klimamæssige, sociale og økonomiske udviklinger anses for mulige og realistiske. Derefter skal scenarierne udmøntes i modelsimuleringer af byudvikling og oversvømmelsesrisiko. Forskellige tiltag til reduktion af risikoen kan så afprøves i hvert scenarie. Den samlede fremskrivning af risikoen vil dermed følge et workflow som illustreret i Figur 6.1.



Figur 6.1. Analyse workflow til vurdering af oversvømmelsesrisiko og bæredygtighed af planlægningsløsninger og beskyttelsestiltag i forskellige socioøkonomiske og klimascenarier.

Baseret på modelresultaterne og aktørernes præferencer vælges løsninger der set over flere mulige fremtidsscenarier har en tilfredsstillende beskyttelse. Som kriterium for hvad der er "tilfredsstillende" kan man f.eks. vurdere, om løsningen sikrer minimumsbeskyttelse i alle scenarier, minimerer fortrydelse i gennemsnit over alle scenarier (Casal-Campos et al., 2015),

eller sikrer højst muligt fleksibilitet så løsningen kan tilpasses i fremtiden. Sidstnævnte strategi bliver især promoveret i og fra Holland, altså hvor der allerede er sket omfattende investeringer i hård beskyttelse (Hermans et al., 2017; Kwakkel et al., 2015). Denne tilgang kræver en løbende overvågning af oversvømmelsesrisikoen og institutioner der sikrer at nødvendige investeringer bliver gennemført når beskyttelsesniveauet bliver utilstrækkeligt, men før katastrofen hænder.

6.2 Fareidentifikation

I den nuværende situation med relativt lav beskyttelse af de fleste områder i Danmark er fareidentifikationen et input, der kan foretages relativt uafhængigt af de øvrige faktorer. Der er i tidligere afsnit i rapporten argumenteret for, at der er behov for en bedre kortlægning af risikoen i områder, der hydraulisk ikke er tæt forbundet med netværket af målere, at der er behov for at undersøge graden af samtidighed af forskellige farer i nutidens og (især) fremtidens klima, samt en analyse af risiko for nedbrud af infrastruktur, såfremt der i fremtiden sættes i høj grad på hård sikring mod havvand.

6.3 Simulering af fremtidige byudviklinger og interaktion med oversvømmelsesrisiko

Der er brug for modelværktøjer der på en enkel måde kan afspejle interaktionen mellem byudvikling og risiko for oversvømmelse. Værktøjerne kan så bruges i "what-if" analyser som input. Værktøjerne skal fortrinsvis

- kunne opsættes let og være baseret på standard data der er tilgængelige fra offentlige registre,
- være hurtige og kunne bruges til overslagsberegninger på byniveau eller regionalt niveau, og
- kunne afspejle effekten af planlægningstiltag såsom zonerings der udelukker udvikling i visse områder eller opbygning af nye bykerner der trækker byudviklinger til højt liggende områder.

Flere grupper har demonstreret anvendelse af byudviklingsmodeller i forbindelse med byhydrologi (Bach et al., 2018; Mikovits et al., 2017; Sathish Kumar et al., 2013) og vurdering af oversvømmelsesrisiko (Löwe et al., 2017; Mustafa et al., 2018). De eksisterende modeller kan enten simulere byudvikling i høj detaljegrade men er forholdsvis langsomme og teknisk krævende (Löwe et al., 2017; Mikovits et al., 2017; Urich and Rauch, 2014), eller bruger konceptuelle beskrivelser hvor det er uafklaret hvordan planlægningstiltag såsom zoneregulering eller nyudviklinger i forbindelse med en flytning af bykernen kan simuleres (Mustafa et al., 2018). Disse modeller er primært udviklet med fokus på oversvømmelser fra skybrud. Der er derfor brug for en videreudvikling af de eksisterende værktøjer, så de kan bruges til screening af oversvømmelsesrisiko fra hav, bl.a. i form af forsimpning, der vil give hurtigere beregningstider.

Som beskrevet i afsnit 4 og 5, bliver byudviklingen påvirket af oversvømmelsesrisiko og omvendt. I litteraturen er der dokumenteret første modelbeskrivelser af disse feedback mekanismer (Di Baldassarre et al., 2015; Magliocca and Walls, 2018), som dog er rent

konceptuelle. De giver et godt indblik i værdien af at analysere forskellige scenarier, men er svære at anvende i forbindelse med konkrete beslutninger i konkrete byområder. Til det formål kræves udvikling af algoritmer, der forbinder de konkrete forhold til de mere generiske typer af strategier. Hermed opnås et estimat for, hvor mange bygninger og personer er udsat for en oversvømmelsesfare i forskellige delområder af byerne samt betydningen af forskellige strategier for at håndtere denne risiko.

6.4 Risikovurdering på forskellige skalaer

Oversvømmelsesrisiko kan vurderes på forskellige spatiale og tidsmæssige skalaer. Ofte vil der opstå situationer hvor risikoen er stor set fra perspektivet af af de udsatte borgere samt den lokale kommune, mens de samme skader i et nationalt perspektiv forekommer små og uvæsentlige og kan håndteres med f.eks. en forsikringsordning. Omvendt vil en sådan forsikringsordning modvirke lokal tilpasning til det faktiske risikobillede, bl.a. fordi boligejeren ved havet har en væsentlig nytteværdi ud af beliggenheden som ikke er til gavn for resten af samfundet.

Sådanne modsætninger leder til et overordnet spørgsmål om, hvornår oversvømmelsessikring er et lokalt ansvar og hvornår det er et fælles ansvar. (Hallegatte et al., 2011) dokumenterer en økonomisk analyse for en enkelthændelse som kan være en del af løsningen men som må underbygges med en etisk og fordelingsmæssigt dialog i landet. Samtidigt er det oplagt, at såfremt ansvaret pålægges de lokale borgere vil mere overordnede hensyn til national planlægning af natur og andre hensyn ikke blive inddraget i overvejelserne.

6.5 Bæredygtighed

Reduktion af oversvømmelsesrisici bliver typisk betragtet under det perspektiv at beskytte menneskeliv og at minimere økonomisk tab. Både konstruktion af beskyttelsestiltag og reparation af skadede bygninger og infrastruktur kræver dog også en indsats af energi og materialer som typisk vil medføre negative miljøeffekter. (Hennequin et al., 2018) gennemfører en sammenligning af miljøeffekter mellem reparation af bygninger og konstruktion af diger for tre byer i Danmark, København, Esbjerg, og Frederikssund. Analysen viser, at det ikke i alle tilfælde kan betale sig at anvende diger til beskyttelsen ud fra et miljømæssigt perspektiv, men også at analysen er sårbar overfor byplanlægning. Planlagte tiltag i f.eks. Frederikssund vil således ændre konklusionen, såfremt analysen gentages efter at disse tiltag er udført.

Livscyklusanalyse er indtil videre kun anvendt i forbindelse med case studier og der er behov for flere analyser på flere områder før resultaterne er robuste. Derudover er der kun gennemført en sammenligning af hvilken option medfører relativt mindre miljøskader, mens der mangler analyser af såvel tiltags relevans i forhold til planetens fysiske grænser for bæredygtighed (Steffen et al., 2015) ligesom bæredygtighed som formuleret i f.eks. FNs Sustainable Development Goals. Det er uafklaret hvor mange ressourcer Danmark kan tillade sig at bruge på reparationer og sikring mod oversvømmelser og hvor stor en reduktion af den økonomiske risiko for oversvømmelse retfærdiggør hvor stort et ressourceforbrug.

7. Konklusion

Status:

Der er i løbet af de sidste ca. 50 år opbygget gode kompetencer både i Danmark og internationalt til vurdering af risiko fra stormfloder. Der er standardiserede metoder til at beregne hver af komponenterne, dvs. farer, eksponering og sårbarheder. Udvikling af metoder til at håndtere processer, der ændrer sig over tid, nærmer sig også et højt fagligt niveau hvad angår farehåndteringen.

Der er dog stadig væsentlige usikkerheder. For fareidentifikationen er det især beregningen af frekvensen af de meget kraftige hændelser fra syd, der volder problemer, men der er også problemer med at beregne stuvningskoter i visse områder med kompleks hydraulik, f.eks. visse fjorde. Endvidere vurderes sårbarheden især ud fra forsikringsdata, hvilket giver en systematisk undervurdering af skadernes størrelse, fordi kun direkte markedsomsatte (og forsikrede) skader indgår i beregningerne. Tab af kulturelle og ikke-forsikrede værdier (f.eks. offentligt ejede bygninger, museer mv) værdisættes ikke.

Opmærksomhedspunkter:

Der er en usædvanligt stor forskel imellem risikoen for "små" og "store" stormfloder ved oversvømmelser fra syd, også i en international kontekst. Med andre ord, ved Vesterhavet kan der forekomme meget store stormfloder, men der er også hyppigt stormfloder, der er næsten lige så store. Ved Østersøen er de rigtig store hændelser næsten lige så store som ved Vesterhavet, men indenfor en generation vil man sjældent se en stor stormflod. Det giver en særlig udfordring, fordi der ingen tvivl er om, at de største økonomiske tab fra enkelthændelser vil komme på disse kyststrækninger, samtidigt med, at store sikringsanlæg mod disse oversvømmelser risikerer at ramme uforholdsmæssigt voldsomt i de kystnære områder, både i form af at sikringsanlæggene er sjældent i brug (og derfor vil savne folkelig opbakning) og i form af, at sikringsanlæggene måske ikke virker når der endelig er brug for dem. De udviklede metoder i risikoanalyse tager ikke i tilstrækkeligt omfang højde for denne særlige udfordring i at hele generationer kan komme til at lide rekreative og æstetiske afsavn uden at have fordel af beskyttelsen.

I tekniske systemer såsom flytransport og industrielle produktionsanlæg anvendes risikovurdering og -styring med stor succes. Det har vist sig vanskeligt at anskueliggøre risikovurderinger af naturlige farer for mange borgere og derfor er der modstand mod at opbygge beslutningsstøttesystemer, der indarbejder læring fra tidligere hændelser i fremtidige beslutninger. Den store tidsmæssige variation på en given lokalitet er i den forbindelse en yderligere komplikation.

Vidensbehov:

Der er både brug for viden om, hvordan man kan bedre kan beskrive den aktuelle risiko og hvordan man kan fremskrive risiko over tid. Dette er udfoldet i kapitel 6, hvor især fire aspekter er fremhævet: *Fareidentifikation, Simulering af fremtidige byudviklinger og interaktion med oversvømmelsesrisiko, Risikovurdering på forskellige skalaer, og Sammenhængen mellem*

bæredygtighed og risiko. I det følgende er især punkt 2 og 3 udfoldet på baggrund af aspekter af de øvrige baggrundsnotater.

Flere af de elementer som beskrives i de andre notater beskrives kvalitativt, grænsende til en narrativ fortælling. Mange af disse elementer har væsentlig indflydelse på den beregnede risiko og dermed hvilke tiltag, der vil være effektive til at nedbringe risikoen (eller gøre den mere acceptabel). Her kan i særlig grad fremhæves:

- *Opfattet risiko*. Forskellige mennesker har en generel attitude i forhold til risiko og opfattes dermed som risikovillige eller risikoaverse. Der er påvist en generel tendens til at risikovilligheden afhængigt af egne erfaringer. Der er behov for en matematisk beskrivelse af denne risikovillighed med fokus på hvordan den påvirker beslutningsprocesser og strategier.
- *Effektiviteten af forskellige typer af tiltag*. Der er eksempler på forskning i teknisk resiliens, altså et systems evne til at komme tilbage til udgangspunktet efter en hændelse. Vi har ikke fundet tilsvarende eksempler på anvendelse af systemisk eller evolutionær resiliens i den videnskabelige litteratur fordi der mangler en kvalificering og kvantificering af effekterne på systemisk risiko, især interaktionen mellem samfund og oversvømmelsesbeskyttelse. Det fører formentligt til, at store enkelte tiltag favoriseres (f.eks. diger) fordi deres bidrag til risikoreduktion er nemmere at kvantificere. Der er tydelige tegn på, at forskellige lande har forskellige tilgange til risikominimering, med f.eks. Holland repræsenterende en hård tilgang uden væsentlig anvendelse af beredskab mens f.eks. USA og Japan i udpræget grad anvender beredskab som en integreret del af håndteringen af risiko.
- *Opgørelse af skader og co-benefits*. Opgørelsen af skader er den største usikkerhed ved beregning af oversvømmelsesrisikoen. Ligeledes vil der ved mange tiltag være afledte effekter for samfundet. I både dansk og international sammenhæng arbejdes der målrettet på at høste sideordnede effekter i form af multifunktionelle arealanvendelser, rekreative muligheder og bedre byrum. Også i denne sammenhæng er fokus på hvordan forskellige framinger af problemstillingen og de kvantitative effekter kan påvirke strategiske beslutninger. Ved sådanne opgørelser af skader og co-benefits er det et væsentligt aspekt, at der blandt de forskellige aktører er uenighed om opgørelsen af hvad der er fordele og ulemper – og dermed naturligvis også om den økonomiske prissætning af elementerne i tiltagene.

Forslag til følgeforskning:

Følgeforskningen vil være særdeles interessant for DTU såfremt den tager udgangspunkt i de konkrete forhold ved et eller flere af områderne og derudover udfolder mindst et af de fire temaer for forskning i risiko, som er nævnt i kapitel 6 og ovenfor. Samspillet med de to andre forskningsinstitutioner vil blive vægtet højt, hvorfor der i særlig grad er fremhævet tre punkter ovenfor, som kan danne udgangspunkt for diskussioner om fælles forskning.

8. Referencer

- Aerts, J.C.J.H., Botzen, W.J., Clarke, K.C., Cutter, S.L., Hall, J.W., Merz, B., Michel-Kerjan, E., Mysiak, J., Surminski, S., Kunreuther, H., 2018. Integrating human behaviour dynamics into flood disaster risk assessment. *Nat. Clim. Chang.* 8, 193–199. doi:10.1038/s41558-018-0085-1
- Arnbjerg-Nielsen, K., Leonardsen, L., Madsen, H., 2015. Evaluating adaptation options for urban flooding based on new high-end emission scenario regional climate model simulations. *Clim. Res.* 64, 73–84. doi:10.3354/cr01299
- Åström, H.L.A., Sunyer, M., Madsen, H., Rosbjerg, D., Arnbjerg-Nielsen, K., 2016. Explanatory analysis of the relationship between atmospheric circulation and occurrence of flood-generating events in a coastal city. *Hydrol. Process.* 30. doi:10.1002/hyp.10767
- Atreya, A., Ferreira, S., Kriesel, W., 2013. Forgetting the Flood? An Analysis of the Flood Risk Discount over Time. *Land Econ.* 89, 577–596. doi:10.1353/ld.2013.0040
- Bach, P.M., Deletic, A., Urich, C., McCarthy, D.T., 2018. Modelling characteristics of the urban form to support water systems planning. *Environ. Model. Softw.* 104, 249–269. doi:10.1016/j.envsoft.2018.02.012
- Casal-Campos, A., Fu, G., Butler, D., Moore, A., 2015. An Integrated Environmental Assessment of Green and Gray Infrastructure Strategies for Robust Decision Making. *Environ. Sci. Technol.* 49, 8307–8314. doi:10.1021/es506144f
- COWI, 2017. Byernes udfordringer med havvandsstigning og stormflod. Kgs. Lyngby, Denmark.
- Danmarks Statistik, 2017. Befolkningsfremskrivning 2017 for hele landet efter herkomst, køn og alder [WWW Document]. URL <http://statistikbanken.dk/frdk117>
- Danmarks Statistik, 1981. Landsprognoser 1980-2010 og Regionale Fremskrivninger 1980-2000. Copenhagen, Denmark.
- Danmarks Statistik, 1978. Befolkningsprognoser 1977-2000. Copenhagen, Denmark.
- Danmarks Statistik, 1974. Befolkningsprognoser 1974-1990. Copenhagen, Denmark.
- Davidson, S., Löwe, R., Thrysøe, C., Arnbjerg-Nielsen, K., 2017. Simplification of one-dimensional hydraulic networks by automated processes evaluated on 1D/2D deterministic flood models. *J. Hydroinformatics* 19, 686–699. doi:10.2166/hydro.2017.152
- Di Baldassarre, G., Viglione, A., Carr, G., Kuil, L., Yan, K., Brandimarte, L., Blöschl, G., 2015. Debates - Perspectives on socio-hydrology: Capturing feedbacks between physical and social processes. *Water Resour. Res.* 51, 4770–4781. doi:10.1002/2014WR016416
- Domeneghetti, A., Carisi, F., Castellarin, A., Brath, A., 2015. Evolution of flood risk over large areas: Quantitative assessment for the Po river. *J. Hydrol.* 527, 809–823. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.05.043
- DREAM, 2017. DREAMs disaggregerede befolkningsfremskrivning [WWW Document]. URL <http://www.dreammodel.dk/> (accessed 10.4.17).
- Hallegatte, S., Ranger, N., Mestre, O., Dumas, P., Corfee-Morlot, J., Herweijer, C., Wood, R.M., 2011. Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: A case study on Copenhagen. *Clim. Change* 104, 113–137. doi:10.1007/s10584-010-9978-3
- Haraguchi, M., Lall, U., 2015. Flood risks and impacts: A case study of Thailand's floods in 2011 and research questions for supply chain decision making. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 14, 256–272. doi:10.1016/j.ijdr.2014.09.005
- Hennequin, T., Sørup, H.J.D., Dong, Y., Arnbjerg-Nielsen, K., 2018. A framework for performing comparative LCA between repairing flooded houses and construction of dikes in non-stationary climate with changing risk of flooding. *Sci. Total Environ.* 642, 473–484. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.05.404

- Hermans, L.M., Haasnoot, M., ter Maat, J., Kwakkel, J.H., 2017. Designing monitoring arrangements for collaborative learning about adaptation pathways. *Environ. Sci. Policy* 69, 29–38. doi:10.1016/j.envsci.2016.12.005
- IPCC, 2014. Technical Summary, in: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- IPCC, 2012. Summary for Policy Makers, in: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- KC, S., Lutz, W., 2017. The human core of the shared socioeconomic pathways: Population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100. *Glob. Environ. Chang.* 42, 181–192. doi:10.1016/j.gloenvcha.2014.06.004
- Kellermann, P., Schönberger, C., Thieken, A.H., 2016. Large-scale application of the flood damage model RAILway Infrastructure Loss (RAIL). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16, 2357–2371. doi:10.5194/nhess-16-2357-2016
- Københavns Kommune, 2011. *Københavns Klimatilpasningsplan.* København, Danmark.
- Kreibich, H., Baldassarre, G. Di, Vorogushyn, S., Aerts, J.C.J.H., Apel, H., Aronica, G.T., Arnbjerg-Nielsen, K., Bouwer, L.M., Bubeck, P., Caloiero, T., Chinh, D.T., Cortès, M., Gain, A.K., Giampá, V., Kuhlicke, C., Kundzewicz, Z.W., Llasat, M.C., Mård, J., Matczak, P., Mazzoleni, M., Molinari, D., Dung, N. V., Petrucci, O., Schröter, K., Slager, K., Thieken, A.H., Ward, P.J., Merz, B., 2017. Adaptation to flood risk : Results of international paired flood event studies. *Earth's Futur.* 5, 953–965. doi:10.1002/2017EF000606
- Kwakkel, J.H., Haasnoot, M., Walker, W.E., 2015. Developing dynamic adaptive policy pathways: a computer-assisted approach for developing adaptive strategies for a deeply uncertain world. *Clim. Change* 132, 373–386. doi:10.1007/s10584-014-1210-4
- Kystdirektoratet, 2018. *Metode til national risikovurdering af oversvømmelse fra hav og vandløb samt ajourføring af risikoområder.* Lemvig, Denmark.
- Kystdirektoratet, 2015. *Immaterielle værdier i forbindelse med kystbeskyttelse.* Lemvig, Denmark.
- Löwe, R., Urich, C., Sto. Domingo, N., Mark, O., Deletic, A., Arnbjerg-Nielsen, K., 2017. Assessment of Urban Pluvial Flood Risk and Efficiency of Adaptation Options Through Simulations – A New Generation of Urban Planning Tools. *J. Hydrol.* 550, 355–367. doi:10.1016/j.jhydrol.2017.05.009
- Magliocca, N.R., Walls, M., 2018. The role of subjective risk perceptions in shaping coastal development dynamics. *Comput. Environ. Urban Syst.* 0–1. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2018.03.009
- Mikovits, C., Rauch, W., Kleidorfer, M., 2017. Importance of scenario analysis in urban development for urban water infrastructure planning and management. *Comput. Environ. Urban Syst.* 0–1. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2017.09.006
- Mustafa, A., Bruwier, M., Archambeau, P., Erpicum, S., Piroton, M., Dewals, B., Teller, J., 2018. Effects of spatial planning on future flood risks in urban environments. *J. Environ. Manage.* 225, 193–204. doi:10.1016/j.jenvman.2018.07.090
- Olesen, L., Löwe, R., Arnbjerg-Nielsen, K., 2017. *Flood Damage Assessment - Literature review and recommended procedure.* Melbourne, Australia.
- Olsen, A.S., Zhou, Q., Linde, J.J., Arnbjerg-Nielsen, K., 2015. Comparing methods of calculating expected annual damage in urban pluvial flood risk assessments. *Water* 7, 255–270. doi:10.3390/w7010255
- Pedersen, A.N., Mikkelsen, P.S., Arnbjerg-Nielsen, K., 2012. Climate change-induced impacts on urban flood risk influenced by concurrent hazards. *J. Flood Risk Manag.* 5, 203–214. doi:10.1111/j.1753-318X.2012.01139.x
- Poulsen, B., 2019. I dag er den enorme stormflod i 1825 nærmest glemt: Men den rummer vigtige erfaringer, der kan bruges i vores egen klimakamp. *Politiken.*
- Pryce, G., Chen, Y., Galster, G., 2011. The impact of floods on house prices: an imperfect information approach with myopia and amnesia. *Hous. Stud.* 26, 259–279. doi:10.1080/02673037.2011.542086

- Sathish Kumar, D., Arya, D.S., Vojinovic, Z., 2013. Modeling of urban growth dynamics and its impact on surface runoff characteristics. *Comput. Environ. Urban Syst.* 41, 124–135. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2013.05.004
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S., Fetzer, I., Bennett, E., Biggs, R., Carpenter, S., 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* (80-.). 347, 1259855. doi:10.1126/science.1259855
- Tobin, G.A., 1995. The Levee Love Affair: a Stormy Relationship? *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* 31, 359–367. doi:10.1111/j.1752-1688.1995.tb04025.x
- Urich, C., Rauch, W., 2014. Exploring critical pathways for urban water management to identify robust strategies under deep uncertainties. *Water Res.* 66C, 374–389. doi:10.1016/j.watres.2014.08.020
- Walls, M., Magliocca, N., McConnell, V., 2018. Modeling coastal land and housing markets: Understanding the competing influences of amenities and storm risks. *Ocean Coast. Manag.* 157, 95–110. doi:10.1016/j.ocecoaman.2018.01.021
- Weinkle, J., Landsea, C., Collins, D., Musulin, R., Crompton, R.P., Klotzbach, P.J., Pielke, R., 2018. Normalized hurricane damage in the continental United States 1900–2017. *Nat. Sustain.* 1, 808–813. doi:10.1038/s41893-018-0165-2
- Zhou, Q., Mikkelsen, P.S., Halsnæs, K., Arnbjerg-Nielsen, K., 2012. Framework for economic pluvial flood risk assessment considering climate change effects and adaptation benefits. *J. Hydrol.* 414–415, 539–549. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.11.031