

Baggrundsnotat: Beregning af de forventede årlige skader fra stormflod

Notatet gennemgår den metodiske tilgang og datagrundlaget bag beregningerne af de forventede årlige skader fra stormflod til kapitlet *Klimatilpasning i kystzonen* til M23.

Indhold

1	Introduktion til beregningen af de forventede årlige skader	2
2	Simulering af oversvømmelser på land	3
3	Opgørelse af skadesomkostninger	4
3.1	Private ejendomme	5
3.1.1	Bygninger	5
3.1.2	Indbo	5
3.2	Virksomheder	6
3.3	Infrastruktur	6
3.3.1	Oprydning af infrastruktur	6
3.3.2	Forlænget rejsetid	7
3.4	Landbrug	7
3.4.1	Afgrøder	7
3.4.2	Husdyr	8
4	Beregning af de forventede årlige skader	8
5	Geografiske fordeling af de forventede årlige skader	9
6	Litteratur	14

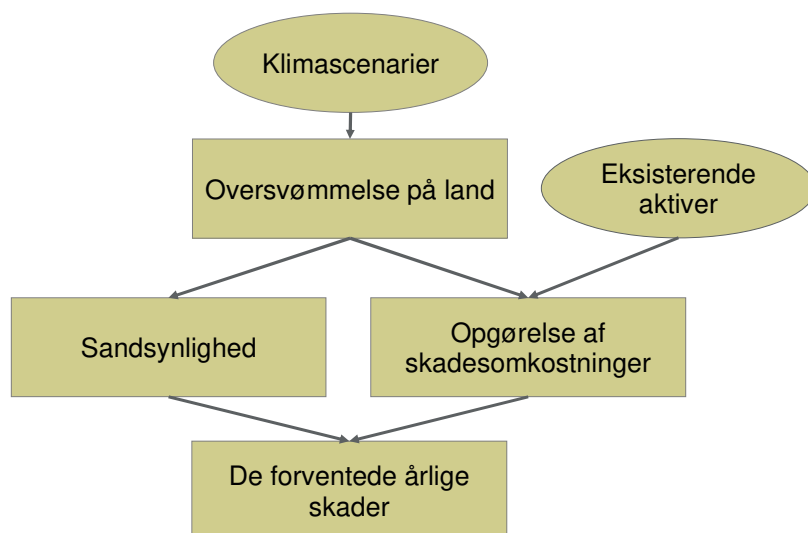
1 Introduktion til beregningen af de forventede årlige skader

Til kapitlet *Klimatilpasning i kystzonen til M23* præsenteres landsdækkende beregninger af de forventede årlige skader fra oversvømmelser for 2023 og under fremskrivning af klimaet frem til hhv. 2073 og 2123 givet tre forskellige klimascenarier. Beregningerne er fortaget i samarbejde med Kystdirektoratet med udgangspunkt i samme fremgangsmåde, som er benyttet til at udføre Kystdirektoratets forpligtelser i forbindelse med Oversvømmelsesloven. Der henvises derfor til Kystdirektoratet og deres dokumentation af beregningerne, hvis yderlige uddybning ønskes.

I beregningerne tages der ikke højde for økonomisk vækst og aktiverne og bosætningen i området fremskrives derved ikke. Samtidig tages der ikke højde for fremtidig klimatilpasning. Derved er der ikke tale om en fremskrivning af de forventede årlige skader, men snarere et tankeeksperiment, hvor fremtidens klima fremrykkes til i dag, og de økonomiske konsekvenser på nuværende aktiver opgøres.

De forventede årlige skader er i oversvømmelses- og naturkatastrofelitteraturen kendt som *oversvømmelsesrisikoen*, men i kapitlet og i dette dokumentationsnotat er valgt at bruge betegnelsen *forventede årlige skader*. De forventede årlige skader er en kombination af sandsynligheden for oversvømmelse af forskellige størrelser samt skadesomkostningerne heraf. Sandsynligheden og udbredelsen af oversvømmelser af forskellige størrelser samt vanddybden i de oversvømmede områder kan simuleres med en oversvømmelsesmodel. Herefter kan skadesomkostninger for de enkelte områder i Danmark opgøres med udgangspunkt i oversvømmelsesmodellens simulering af vanddybden i områderne samt de eksisterende aktiver i området, jf. figur 1.

Figur 1 Illustration af beregningerne



Kilde: Egen illustration

I beregningen indgår oversvømmelser som følger af 9 forskellige t -årshændelser ($t=10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 5000, 10.000$).

2 Simulering af oversvømmelser på land

Til beregningerne af de forventede årlige skader simuleres udbredelsen og vanddybden for ni hændelser i hhv. 2023, 2073 og 2123. Hændelserne i 2073 og 2123 simuleres under de tre klimascenarier SSP1-2.6, SSP2-4.5 og SSP5-8.5 som indebærer hhv. 1,5, 2,7 og 4,5 graders temperaturstigning i 2100, jf. tabel 1.

Tabel 1 IPCC klimascenarier		
	Niveau for drivhusgasudledninger	Forventet temperaturstigning i 2100
SSP1-2.6	Lav	1,8°
SSP2-4.5	Medium	2,7°
SSP5-8.5	Høj	4,4°

Kilde: Lee mfl. (2021), Colgan mfl. (2022) og O'Neill (2016).

Klimascenarierne benyttes til at fremskrive middelvandstandene langs den danske kyst og derved vandstanden for den enkelte hændelse.

Til beregningen opdeles Danmark i 10 x 10 meter celler. For hver celle simuleres vanddybden ud fra data om vandstanden i havet for den enkelte hændelser samt den danske højdemodel, jf. Kysdirektoratet (2020) og (2023). Til de efterfølgende beregninger af skaderne ganges cellerne op til 50 x 50 meter celler. For hver hændelse og celle simulerer modellen således vanddybden:

$$f_t^k = f(h^k, v_t)$$

hvor f_t^k er vanddybden i celle k for hændelse t , h^k er terrænhøjden i område k og v_t er højvandstanden for hændelse t .

Der simuleres kun oversvømmelser, som følger af stormfloder. Der medtages således ikke, at nogle områder permanent oversvømmes, og derved tabes, når middelvandstanden stiger.

Den anvendte oversvømmelsesmodel er en statisk model. I en statisk oversvømmelsesmodel antages, at oversvømmelser har en uendelig varighed, således at vandet kan brede sig så langt ind i landet som muligt. I praksis har stormfloder dog en begrænset varighed, hvorfor beregningerne af vanddybden og udbredelsen er et overkantsskøn jf. Ramirez (2016), Larsen mfl. (2020) og Halsnæs (2022).

En mere præcis simulering kan opnås, hvis der antages en begrænset varighed. En model med begrænset varighed kaldes en dynamisk oversvømmelsesmodel. Dynamiske modeller benyttes i øjeblikket til simulering af lokale områder i Danmark, men

ikke på nationalt plan, jf. Halsnæs (2022). En national model er dog under udvikling i Kystdirektoratet.

3 Opgørelse af skadesomkostninger

Skadesomkostningerne bestemmes med udgangspunkt i en række skadesfunktioner, som relaterer vanddybden i et område til skadesomkostningen for forskellige skadeskategorier. Hver skadeskategori, der medtages i beregningen, har sin egen skadesfunktion. Skadesomkostningerne opgøres på 50 x 50 celler.

Den samlede skadesomkostning for en hændelse t opgøres for den enkelte celle k på tværs af skadeskategorier som:

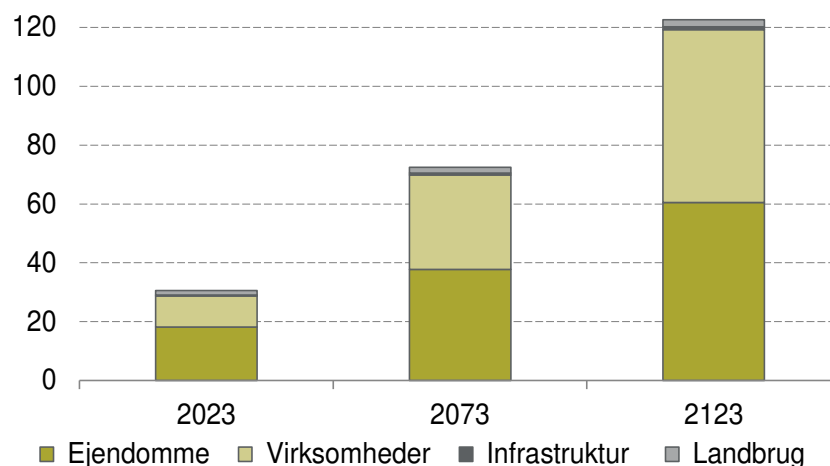
$$D_t^k = \sum_{n=1}^N D_n(f_t^k, a^k)$$

hvor D_t^k er den samlede skade ved hændelse t i celle k , K er antal celler, der summeres over, N er antal skadeskategorier, der medtages skader på, D_n er skadesfunktionen for skadeskategori n , f_t^k er vanddybden i området og a^k er aktiver eller aktionsvariable, som driver skaderne.

Skadesomkostningerne opgøres på fire overordnede skadeskategorier 1) private ejendomme, 2) virksomheder, 3) infrastruktur og 4) landbrug. Kategorierne består af en række underkategorier og skadesomkostningerne opgøres for hver underkategori ved hjælp af en skadesfunktion. Særligt skaderne på private ejendomme og virksomheder udgør en stor andel af skadesomkostningerne ved oversvømmelse, jf. figur 2.

Figur 2 Skader ved en 100-årshændelse

Mia. kr.



Kilde: Egne beregninger på data fra Kystdirektoratet

Der vil højst sandsynligt også forekomme andre typer af skader og tab, bl.a. tab af turisme og kulturarv samt skader på naturen. Isoleret set indebærer det en undervurdering af de samlede skadesomkostninger, jf. Arnbjerg-Nielsen mfl. (2020) og Kystdirektoratet (2020).

3.1 Private ejendomme

Skadesomkostningerne på private ejendomme dækker over skader på bygninger og tab af indbo. Disse bestemmes med skadesfunktioner, som er kalibreret på baggrund af data indsamlet i forbindelse med oversvømmelser i Danmark i 1973 og 2006 i Sønderjylland, Løgstør og på Nordfyn. Skadesfunktionerne er lineære funktioner af vanddybden og bygningsværdien, jf. Kystdirektoratet (2020). Skadesomkostningerne beregnes med udgangspunkt i data fra Bygnings- og boligregistret (BBR) samt Vurderingsstyrelsens ejendomsvurderinger fra 2022.

3.1.1 Bygninger

Skadesomkostningerne for bygninger beregnes som en lineær funktion af bygningsværdien, dvs. ejendomsværdien fratrukket grundværdien, samt vanddybden i cellen:

$$D_{bygning} = \text{Bygningsværdi} * \frac{(13,3 * \text{vanddybde}) + 22}{100}$$

Der antages at vanddybden skal være mindst 0,2 meter, før der sker skader. Bygningen anses som totalskadet ved en vanddybde på 5,9 meter. Derudover antages der, at oversvømmelser ikke direkte berøre etager over stueplan.

Der medtages skader på helårsboliger (både eget og lejet), landbrugsejendomme, sommerhuse og offentlige institutioner.

3.1.2 Indbo

Skadesomkostningerne for indbo bestemmes ligeledes som en lineær funktion af vanddybden og en andel af bygningens værdi:

$$D_{indbo} = \sum_m^M (\text{Pct. af bygningsværdi}_m) * \frac{(4,5 * \text{vanddybde}) + 67,75}{100}$$

hvor M er antal bygningstyper. Andelen af bygningsværdien medtaget varierer således på tværs af bygningstyper. Der medtages skader for bygningstyperne: helårsboliger (50 pct. af bygningsværdien), landbrugsejendomme (15 pct. af bygningsværdien), sommerhuse (20 pct. af bygningsværdien) og offentlige institutioner (30 pct. af bygningsværdien). Der antages, at vanddybden skal være mindst 0,2 meter, før der sker skader. Alt indbo anses for tabt ved en vanddybde på 7 meter.

3.2 Virksomheder

I beregningerne medtages direkte skader på bygningerne, tab af inventar og lagerbeholdning samt tab grundet driftsforstyrrelser. Skadesomkostningerne bestemmes med en skadesfunktion.

Der medtages skader på 101 private forretningssektorer. Hver sektor inddeles i en af tre virksomhedstyper: industri, butik og kontor. Til hver virksomhedstype defineres en sårbarhedsfunktioner, der bestemmer hvor stor en andel af en virksomheds værdier, der går tabt ved oversvømmelse. Sårbarhedsfunktionen er en funktion af vanddybden. Skaderne for sektor i i celle k bestemmes således af en skadesfunktion af følgende form:

$$D_i^k = \alpha_j(f^k) * n_{ik} * D_i^{maks.}$$

hvor:

$\alpha_j(f^k)$ er sårbarhedsfunktionen for den virksomhedstype j , som sektor i tilhører. Denne afhænger af vanddybden i cellen f^k og er mellem 0 og 1.

$D_i^{maks.}$ er den maksimale skade pr. fuldtidsansat for sektor i .

n_{ik} er antal ansatte i celle k for sektor i .

Den maksimale skader pr. fuldtidsansat, D_i , bestemmes på baggrund af data på sektorniveau fra Statistikbanken, hvor der medtages skader på bygninger, tab af inventar og lagerbeholdning samt driftsforstyrrelser. Omkostninger i forbindelse med driftsforstyrrelser beregnes som:

$$\alpha_j(f^k) * net\ value\ added + (1 - \alpha_j(f^k)) * gross\ value\ added$$

De totale skader på virksomheder beregnes således på tværs af sektorer og celler som:

$$D_{virk} = \sum_{ik} D_i^k$$

CVR-registret benyttes til at beregne skader for de enkelte virksomheder baseret på det registrerede antal årsværk samt tilhørende sektor og sårbarhedsfunktion. Der benyttes data fra 2022.

3.3 Infrastruktur

I skadesomkostningerne på infrastruktur medtages kun omkostninger til oprydning af infrastruktur samt omkostninger i forbindelse med forlænget rejsetid. Der tages således ikke højde for, at der kan ske skade på infrastrukturen.

3.3.1 Oprydning af infrastruktur

Omkostningerne ved oprydning af infrastruktur beregnes som et beløb pr. kvadratmeter oversvømmet jernbane, vej, lufthavn eller færgehavn:

$$D_{oprydning} = 3 \text{ kr.} * m^2 \text{ oversvømmet areal af infrastruktur}$$

Da den præcise størrelse af de forskellige typer af infrastruktur ikke er kendt, antages en bredde for hver type. Der antages desuden, at der først er behov for oprydning ved en vanddybde på mindst 0,1 m.

De 3 kr. pr. m² er bestemt ud fra, hvad det koster at rydde op i forbindelse med Aalborg Karneval.

Data på den geografiske placering af infrastrukturen kommer fra GeoDanmark og er fra 2022. Den eneste undtagelse er lufthavne, hvor data kommer fra en manuel indtegning fra 2017 foretaget af Kystdirektoratet selv.

3.3.2 Forlænget rejsetid

Omkostningerne ved forlænget rejsetid bestemmes med formlen:

$$D_{rejsetid} = 301 \text{ kr.} * \text{pr. bil pr. time forsinket}$$

hvor de 301 kr. er den transportøkonomiske enhedspris for rejsetid fastsat af Transportministeriet i samarbejde med DTU.

Betingelsen for, at der er tale om forlænget rejsetid, er at mindst fem oversvømmede celler rører vejen og at vandstanden er over 0,2 meter. For motorveje antages en forsinkelse på 30 minutter pr. bil, for andre veje antages forsinkelsen at være 20 minutter.

Data angående trafik stammer fra Vejdirektoratets trafiktælling fra 2022.

3.4 Landbrug

Skader på landbrug inkluderer tab af afgrøder og husdyr.

3.4.1 Afgrøder

Skadesfunktionen for afgrøder er udviklet af Landbrugsrådgivning Syd og medtager omkostninger i form af tab af udsåede afgrøder og reduceret udbytte det efterfølgende år grundet indtrængning af saltvand i jorden. Skadsfunktionen er en funktion af vanddybden og bygger på antagelser om varigheden af oversvømmelsen og hvilke tid på året det er, jf. Kystdirektoratet (2004) og (2023).

Der medtages flere forskellige typer afgrøder, som er inddelt i tre afgrødetyper: vinterafgrøder, vårafgrøder og hovedsageligt græs.

Der er indlagt en minimum vandstand på 0,1 meter, på trods af at vanddybden kan være underordnet, da saltvand kan nedtrænge på markerne og forringe vækstbetingelserne og betyde reduceret høstudbytte

Skadens økonomiske omfang fastsættes ud fra aftalen om markskadeserstatninger, da årets høst forventes tabt. Der benyttes markdata med afgrødetyper fra Landbrugsstyrelsen fra 2022.

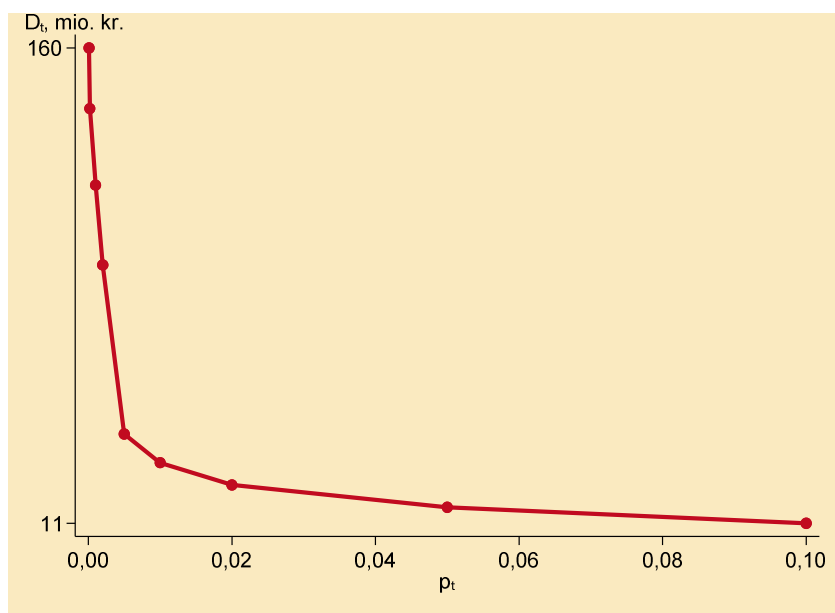
3.4.2 Husdyr

Der medtages tab af kvæg og svin. Skadesfunktionen er udviklet af Landbrugsrådgivning Syd og er en funktion af vanddybden, typen af husdyr, prisen på anskaffelse af nye husdyr samt tab af produktion, jf. Kystdirektoratet (2004). I modellen anses en bestand i en celle for tabt ved en vanddybde på hhv. 0,1 meter for svin og 0,8 meter for kvæg, jf. Kystdirektoratet (2023). Husdyrene er prissat ud fra "Vurderingspriser og opgørelsesmetoder - Regnskabsåret 2022" fra Danmarks Statistik samt data fra farmtalonline.dk. Data på besætning hentes fra det Centrale Husdyrregister (CHR), hvor der er foretaget et udtræk fra 2022.

4 Beregning af de forventede årlige skader

For den enkelte t -års hændelse kendes sandsynligheden, $p_t = 1/t$, for at vandstand er *lig eller overstiger* vandstand v_t . Endvidere kendes skaden D_t^k knyttet til en vandstand på *netop* v_t . Sandsynligheden for at opleve en vandstand mellem v_{t-1} og v_t er således $p_{t-1} - p_t$ og den (lineært approksimerede) gennemsnitlige skade ved en vandstand mellem v_{t-1} og v_t er $(D_{t-1}^k + D_t^k)/2$. I figur 1 angives p_t ud af x-aksen og skaden D_t^k op ad y-aksen for hver af de 9 hændelser, der indgår i beregningen.

Figur 3: Skades-sandsynlighedskurven, Danmark



Kilde: Egen beregning på data fra Kystdirektoratet.

De forventede årlige skader svarer således principielt til arealet under skades-sandsynlighedskurven, som angiver sammenhængen mellem skadesomkostninger ved hændelser og sandsynligheden for at den enkelte hændelse overgås af en større hændelse, jf. figur 1 og Aerts (2013).

Idet D_t kun er kendt i de angivne 9 punkter, må arealet approksimeres. I kapitlet benyttes en stykvis lineær approksimation over de ni udvalgte oversvømmelseshændelser, jf. Olsen (2015). De forventede årlige skader for område k beregnes således som:

$$D_f^k = \sum_{t=2}^9 \left[(p_{t-1} - p_t) * \frac{(D_{t-1}^k + D_t^k)}{2} \right]$$

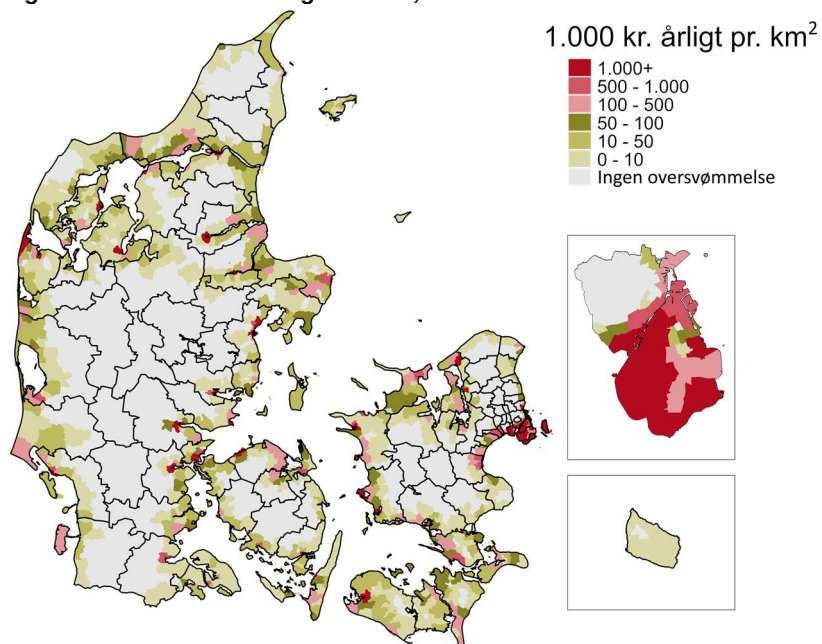
Hvor D_f^k er de forventede årlige skader, 9 er antal hændelser benyttet i beregningen, p_t er sandsynlighed for at hændelse t overgås og D_t^k er skaderne i celle k ved hændelse t .

5 Geografiske fordeling af de forventede årlige skader

I kapitlet præsenteres både udviklingen og den geografiske fordeling af de forventede årlige skader. For at tydeliggøre de geografiske forskelle, opgøres de forventede årlige for hvert sogn, som tildeles en farve efter niveauet af skaderne.

I det følgende præsenteres den geografiske fordeling af de forventede årlige skader i 2023, samt de absolutte ændringer i de forventede årlige skader i 2073 og 2123 relativt til 2023 for de tre klimascenarier.

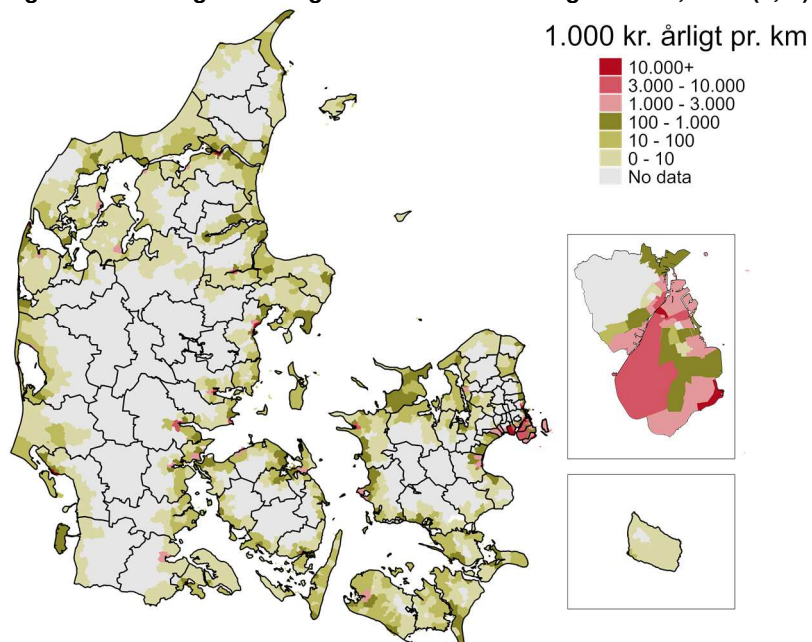
Figur 4: De forventede årlige skader, 2023



Anm: Den øverste boks til højre viser sognene i kommunerne København, Frederiksberg, Dragør og Tårnby. Data præsenteres på sogneniveau for at tydeliggøre geografisk variation. De mørke linjer angiver kommunegrænser.

Kilde: Egen beregninger på data fra Kystdirektoratet.

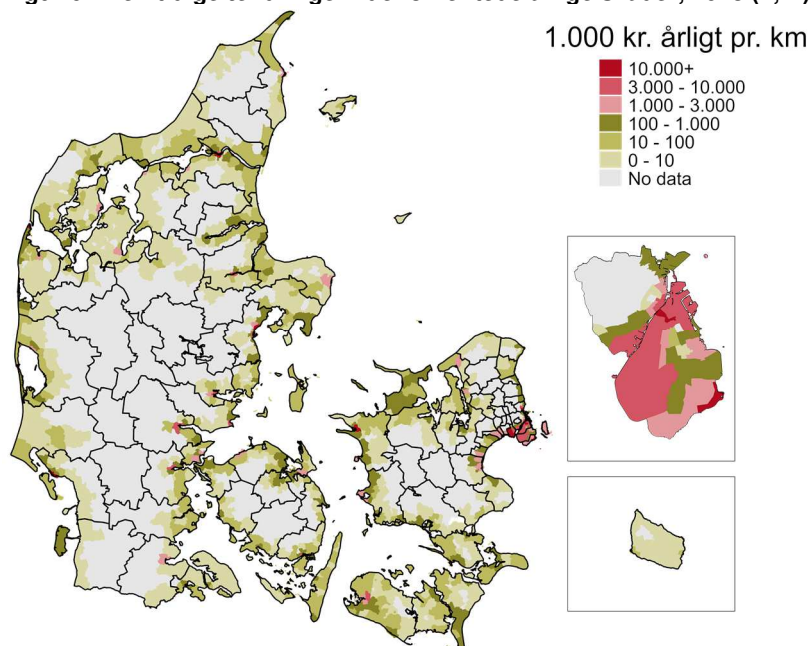
Figur 5: Fremtidige ændringer i de forventede årlige skader, 2073 (1,8°)



Anm: Den øverste boks til højre viser sognene i kommunerne København, Frederiksberg, Dragør og Tårnby. Data præsenteres på sogneniveau for at tydeliggøre geografisk variation. De mørke linjer angiver kommunegrænser.

Kilde: Egen beregninger på data fra Kystdirektoratet.

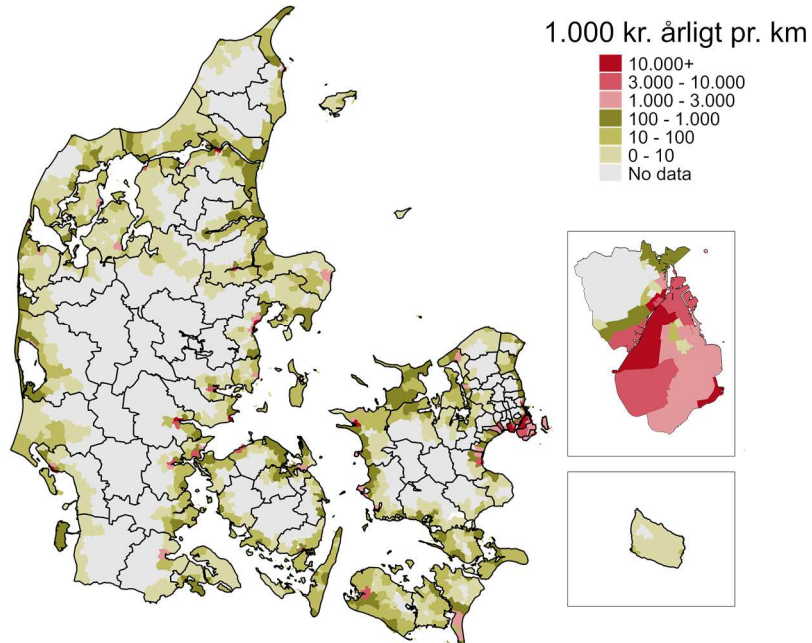
Figur 6: Fremtidige ændringer i de forventede årlige skader, 2073 (2,7°)



Anm: Den øverste boks til højre viser sognene i kommunerne København, Frederiksberg, Dragør og Tårnby. Data præsenteres på sogneniveau for at tydeliggøre geografisk variation. De mørke linjer angiver kommunegrænser.

Kilde: Egen beregninger på data fra Kystdirektoratet.

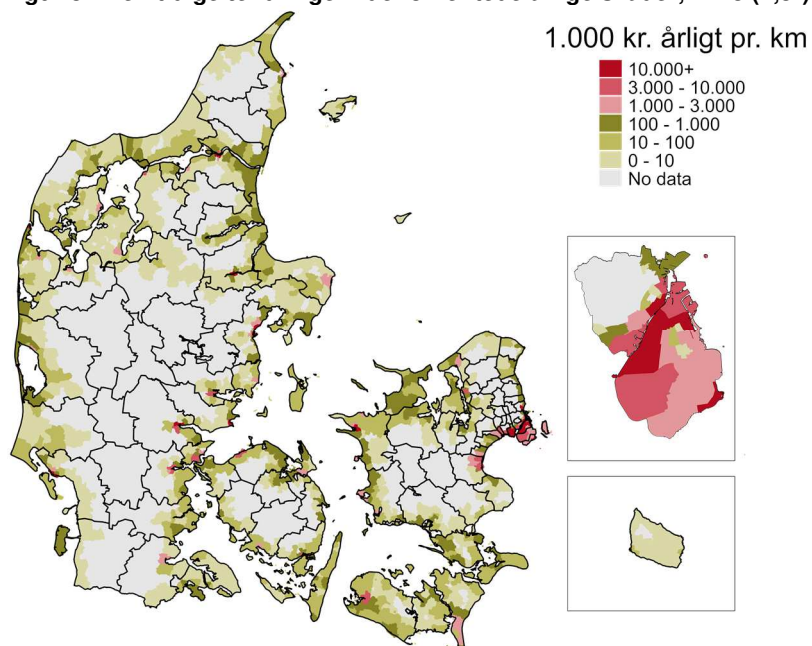
Figur 7: Fremtidige ændringer i de forventede årlige skader, 2073 (4,4°)



Anm: Den øverste boks til højre viser sognene i kommunerne København, Frederiksberg, Dragør og Tårnby. Data præsenteres på sogneniveau for at tydeliggøre geografisk variation. De mørke linjer angiver kommunegrænser.

Kilde: Egen beregninger på data fra Kystdirektoratet.

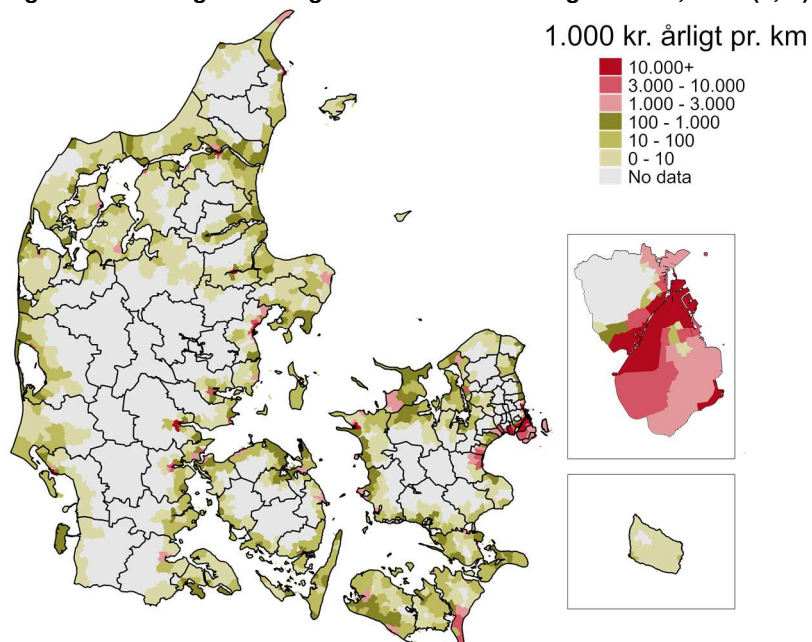
Figur 8: Fremtidige ændringer i de forventede årlige skader, 2123 (1,8°)



Anm: Den øverste boks til højre viser sognene i kommunerne København, Frederiksberg, Dragør og Tårnby. Data præsenteres på sogneniveau for at tydeliggøre geografisk variation. De mørke linjer angiver kommunegrænser.

Kilde: Egen beregninger på data fra Kystdirektoratet.

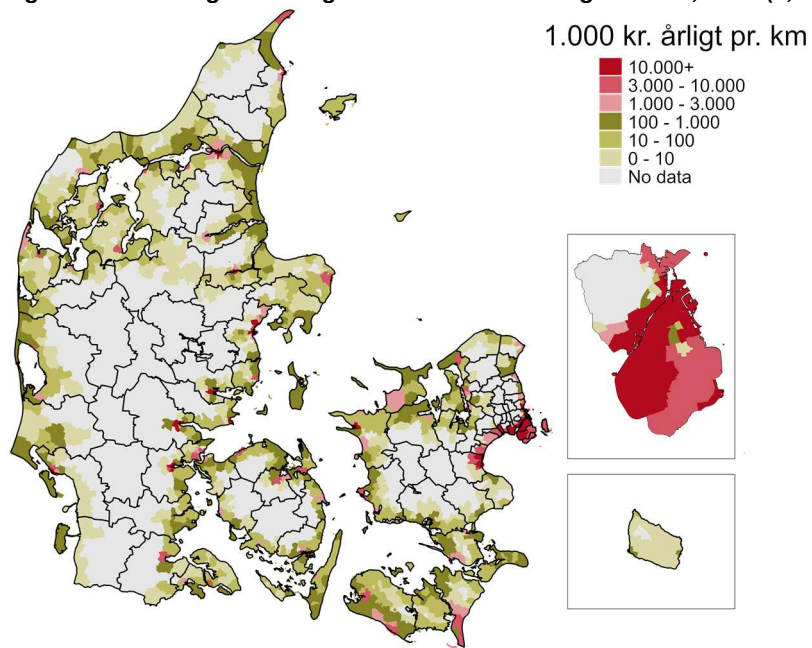
Figur 9: Fremtidige ændringer i de forventede årlige skader, 2123 (2,7°)



Anm: Den øverste boks til højre viser sognene i kommunerne København, Frederiksberg, Dragør og Tårnby. Data præsenteres på sogneniveau for at tydeliggøre geografisk variation. De mørke linjer angiver kommunegrænser.

Kilde: Egen beregninger på data fra Kystdirektoratet.

Figur 10: Fremtidige ændringer i de forventede årlige skader, 2123 (4,4°)



Anm: Den øverste boks til højre viser sognene i kommunerne København, Frederiksberg, Dragør og Tårnby. Data præsenteres på sogneniveau for at tydeliggøre geografisk variation. De mørke linjer angiver kommunegrænser.

Kilde: Egen beregninger på data fra Kystdirektoratet.

6 Litteratur

Aerts, J. C. H., N. Lin, W. J. W. Botzen, K. Emanuel og H. de Moel (2013): Low-Probability Flood Risk Modeling for New York City. *Risk Analysis*, 33 (5), s. 772-788.

Halsnæs, K., M. A. D. Larsen, og K. L. Drenck (2022): Samfundsøkonomiske konsekvenser af oversvømmelser og investeringer i klimatilpasning. DTU, Department of Management Engineering.

Kystdirektoratet (2004): *Comrisk – Subproject SP 7. Risk assessment of the Wadden Sea*.

Kysdirektoratet (2020): *Metode til kortlægning af fare og risiko for oversvømmelse. Oversvømmelsesdirektivet, Anden planperiode*.

Kystdirektoratet (2023): *Metoderapport for Kystplanlægger*.

Larsen, M., A., D., G. Karamitilios og K. Halsnæs (2020): DMI report WP311 - Data driven climate change adaptation Part B: National and local scale flood modelling as a basis for damage cost assessments, *DTU Department of Technology, Management and Economics*.

Olsen, A., S., Q. Zhou, J. J. Linde, og K. Arnbjerg-Nielsen (2015): Comparing Methods of Calculating Expected Annual Damage in Urban Pluvial Flood Risk Assessments. *Water*, 7 (1), s. 255-270.

Ramirez, J., A., M. Lichter, T. J. Coulthard og C. Skinner (2016): Hyperresolution mapping of regional storm surge and tide flooding: comparison of static and dynamic models. *Natural Hazards*, 82(1). S. 571-590.