

Skrift nr. 31

Metoder til bestemmelse af serviceniveau for regnvand på terræn

2017

IDA Spildevandskomiteen



Metoder til bestemmelse af serviceniveau for regnvand på terræn

Spildevandskomiteen, Skrift nr. 31

© IDA Spildevandskomiteen 2017

Forfattere: Anders Skovgård Olsen, Gitte Godsk Dalgaard, Birgit Paludan, Ole Mark, Anne Laustsen, Jens Jørgen Linde, Carsten Jakobsen, Kristian Friis, Morten Hundahl, Dan Rosbjerg, Peter Steen Mikkelsen og Karsten Arnbjerg-Nielsen

Indholdsfortegnelse

Indholdsfortegnelse	3
Rekommandation.....	4
Forord	7
1 Indledning.....	8
1.1 Baggrund	8
1.2 Formål.....	9
2 Serviceniveau og funktionskrav for regnvandshåndtering	10
2.1 Formulering af funktionskrav for regnvand på terræn	11
2.2 Brug af risikoanalyse til at fastlægge funktionskrav	12
2.3 Brug af samfundsøkonomiske analyser i forbindelse med funktionskrav	13
3 Metoder til udarbejdelse af risikoanalyse	16
3.1 Beregningsmetoder og modeller til identifikation og analyse af regnvand på terræn	16
3.2 Opgørelse af skader i forbindelser med oversvømmelser.....	19
3.3 Beregning af forventet årlig omkostning, <i>EAD</i>	25
4 Samfundsøkonomiske analyser	29
4.1 Analysemetode 1: Cost-benefit analyse til sammenligning af forskellige konkrete klimatilpasningstiltag	29
4.2 Analysemetode 2: Optimering med henblik på at fastlægge serviceniveau	33
5 Eksempler	36
6 Afsluttende bemærkninger	38
7 Referencer.....	39
8 Ordliste	41
Bilag A Eksempler fra København, Aarhus, Greve og Helsingør.....	43
Bilag B Beregning af <i>EAD</i> og optimering under særlige antagelser.....	55

Rekommandation

Dette skrift fra Spildevandskomitéen rekommanderer metoder til fastlæggelse af et serviceniveau, der inkluderer regnvand på terræn.

I Skrift 27 er angivet en rekommandation for serviceniveau og funktionskrav for afløbssystemer, ligesom det anbefales at anvende sikkerhedsfaktorer i forbindelse med dimensionering. Dette skrift fastholder disse anbefalinger, men supplerer med metoder til fastlæggelse af serviceniveau og funktionskrav for regnvand på terræn. Et serviceniveau defineres herefter som en kombination af funktionskrav for afløbssystemer og funktionskrav for regnvand på terræn, og serviceniveauet anses for opfyldt, såfremt begge funktionskrav er opfyldt.

For afløbssystemer er et funktionskrav defineret som en minimal gentagelsesperiode for opstuvning til en konkret defineret kritisk kote jf. Skrift 27. Funktionskravet for regnvand på terræn kan fastlægges, så det svarer til funktionskravet for afløbssystemet.

Dette skrift anvender risikobaseret dimensionering, hvilket nødvendiggør en sammenlignelig og entydig definition af begrebet risiko. Det er valgt at benytte den forventede årlige omkostning af skader (Eng: Expected Annual Damage) forårsaget af ekstreme regnhændelser som mål for risikoen. *EAD* opgøres som summen af skadesomkostninger forårsaget af årlige maksimale regnhændelser vægtet med sandsynligheden for deres forekomst.

Baseret på samfundsøkonomisk optimering fastlægges funktionskrav for regnvand på terræn med udgangspunkt i et af de følgende tre principper:

1. Funktionskrav fastsættes for kommunen som helhed som en maksimal skadevoldende vanddybde på terræn, der kun må overskrides med en generel fastsat gentagelsesperiode. Herved bliver der afhængig af bygningers og delområders værdi forskel på den risiko, der optræder forskellige steder i kommunen.
2. Funktionskrav fastsættes, differentieret på arealanvendelsen i kommunen, som maksimale skadevoldende vanddybder på terræn, der kun må overskrides med fastsatte gentagelsesperioder.
3. Funktionskrav fastsættes i hvert delområde for sig i kommunen som maksimale skadevoldende vanddybder på terræn, der kun må overskrides med en lokalt fastsat gentagelsesperiode.

Som baggrund for den risikobaserede analyse udarbejdes et oversvømmelseskort og et værdikort for området.

Til brug for udarbejdelse af oversvømmelseskortet skal der gennemføres en hydraulisk beregning. Valg af model til denne beregning bør bero på dels områdets kompleksitet og dels analysens omfang.

Værdikortet kan ligeledes udarbejdes med forskellige detaljeringsgrader. Inden analysen skal det besluttes, hvilke typer af skader der skal indgå i analysen. Der skelnes mellem direkte og indirekte skader og mellem markedsomsatte skader og ikke markedsomsatte skader (immaterielle aktiver).

For at kunne vurdere effekten af forskellige klimatilpasningstiltag findes der en række værktøjer, som kan være med til at give et konsistent sammenligningsgrundlag, når forskellige alternative løsningsformer skal vurderes, eller indsatsen prioriteres. I nærværende skrift lægges der op til at udføre en samfundsøkonomisk analyse på en af to måder:

- en cost-benefit analyse (*CBA*), der beskriver samfundsøkonomiske gevinster/tab ved sammenligning af konkrete projekter eller
- en samfundsøkonomisk optimering, hvor der fastlægges et serviceniveau for regnvand på terræn.

Begge disse samfundsøkonomiske analyser kan anvendes uafhængigt af hvilket detaljeringsniveau, der er benyttet i de foregående analyser med oversvømmelses- og værdikortlægning.

Forord

Dette skrift er en opfølgning på Spildevandskomiteens Skrift 27 fra 2005. Skrift 27 anbefalede en række nye principper for dimensionering og analyse af afløbssystemer. Siden 2005 har især udviklingen af digitale højdekort gjort det muligt at lave egentlige beregninger af udbredelsen af regnbetingede oversvømmelser og de heraf betingede skader. Det muliggør dimensionering ud fra en konkret afvejning af reduktion af oversvømmelsernes skade og de omkostninger, som reduktionen medfører. Princippet blev diskuteret i Skrift 23 fra 1985, men først nu har den teknologiske udvikling muliggjort, at metoden kan anvendes i praksis.

Der har været nedsat et udvalg under Spildevandskomiteen med repræsentanter fra Spildevandskomiteen, Kommunernes Landsforening samt DANVA. Et udkast til skriftet blev forelagt og principgodkendt på Spildevandskomiteens plenarmøde 1. juni 2016 og efterfølgende er en tilrettet version af skriftet forelagt og godkendt på møde i Spildevandskomiteens forretningsudvalg og af en styregruppe nedsat af Spildevandskomiteen, Kommunernes Landsforening og DANVA.

Gitte Godsk Dalgaard

Civilingeniør

Formand for Spildevandskomiteens
udvalg vedr. opdatering af dimensioneringspraksis

Ulrik Højbjerg

Civilingeniør

Formand for Spildevandskomiteen

1 Indledning

1.1 Baggrund

Alle danske kommuner har udarbejdet klimatilpasningsplaner i 2013-2014. En del af dette arbejde var etablering af et risikokort for kommunen, som skulle danne grundlag for en prioritering af klimatilpasningen. Flere kommuner har som følge heraf et oversvømmelseskort for kommunen og har allerede været inde i problemstillingen med at vurdere, hvilke værdier der skal medtages i de samfundsøkonomiske beregninger. Risikokortene kan således i mange tilfælde anvendes som grundlag for de analyser og beregninger, dette skrift anbefaler.

Et væsentligt anderledes punkt i nutidens regnvandshåndtering i forhold til tidligere er, at det er ønskeligt at håndtere regnvand også på terræn og ikke kun i afløbssystemer. Når afstrømning på terræn anvendes bevidst som metode til håndtering af regnafstrømningen, skal den medtages som et element i en dimensionering, hvilket nærværende skrift anviser metoder til.

Spildevandskomiteen udtrykte allerede i Skrift 23 i 1983 et ønske om at kunne forholde sig til forholdet mellem øgede udgifter til større afløbssystemer og de skader, som kunne undgås, såfremt disse systemer blev bygget. Ønsket blev gentaget i Skrift 27, ligesom EU's oversvømmelsesdirektiv også er målrettet en reduktion af oversvømmelseskader. Parallelt hermed er der internationalt udarbejdet en række værktøjer fra især FN-organer. Disse værktøjer forholder sig til mange forskellige slags typer af naturlige farer såsom nedbør, stormfloder, orkaner, jordskælv og skovbrande. Fælles for disse værktøjer er, at de fokuserer på metoder, som sjældent har været brugt til analyse af afstrømning af vand i byer.

Det første eksempel på anvendelsen af disse metoder på afstrømning af vand i byer i Danmark blev udgivet af Miljøstyrelsen i 2007 (Arnbjerg-Nielsen et al., 2007). En række aktører har siden lavet analyser på flere forskellige oplande i Danmark med anvendelse af tilsvarende metoder. Formålet har været at opstille service- og funktionskrav til afløbssystemer under regn. Disse analyser har været præget af meget store forskelle i både terminologi, formål og typer af resultater.

Der er derfor et behov for at skabe en fælles dansk ramme for terminologi og metode for opstilling af serviceniveau for regnvand på terræn. Det betyder ikke, at alle områder i Danmark skal have samme serviceniveau. Tværtimod vil lokale forskelle have stor betydning, da forholdet mellem investering i yderligere sikkerhed mod oversvømmelse og reduktion af skader varierer endog rigtig meget fra sted til sted. Anbefalingerne fra Skrift 27 fungerer i denne sammenhæng som et minimumkrav, der skal overholdes.

1.2 Formål

Kloakker er anlagt med det formål at aflede vand og spildevand for at sikre folkesundheden. Ingen andre tiltag har på noget tidspunkt haft så stor betydning for en forbedret folkesundhed som kloakering. Samtidig er opsamling og afledning af vand via afløbssystemer nødvendigt for etablering af renseanlæg og kontrollerede udløb af regnvand. Løsninger der har stor betydning for miljøet.

Ukontrollerede oversvømmelser kan, specielt i byområder, forvolde store skader på bygninger og infrastruktur. Herved vil der gå værdier tabt for både borgere og samfund. Der er således mange gode grunde til, at der skal ske en bevidst håndtering af vand i byer, så skader begrænses, og ikke mindst folkesundheden opretholdes. Formålet med dette skrift er at anvise metoder, der kan anvendes til fastlæggelse af serviceniveau for regnvand på terræn samt en optimering af dette. Skriftet er et supplement til Skrift 27, hvor nærværende skrift ikke ændrer på anbefalingerne vedr. funktionskrav for afløbssystemer, men supplerer med metoder til fastlæggelse af det samlede serviceniveau, hvor der også indgår funktionskrav for regnvand på terræn.

Fastlæggelse af serviceniveau for regnvand på terræn og valg af klimatilpasningsløsninger bør foretages ud fra en samfundsøkonomisk vurdering. Cost-benefit analyser og optimeringsmetoder vil være en hjælp til at vælge de mest hensigtsmæssige løsninger. Her vejes udgifter til løsninger op mod reduktion af skadesrisiko. Analysen kan således anvendes til beslutning af serviceniveau.

Omkostningsniveauet for samme skade varierer regionalt, og det er derfor ikke hensigtsmæssigt at fastsætte nationale værdier for, hvor meget en oversvømmelse må være skadevoldende gennem faste gentagelsesperioder for opstuvning til kritiske niveauer over terræn. Derfor er det nødvendigt, at der lokalt er mulighed for at formulere et serviceniveau ud fra en eksplicit vurdering af konsekvenserne for samfundet samt fordele og ulemper ved højere eller lavere serviceniveau. Dette sker under hensyntagen til lighedsprincipperne, således at alle, der er tilsluttet kloaksystemet, kan forvente samme minimumsserviceniveau. Serviceniveauet kan være forskelligt i forskellige kommuner, ligesom de konkrete funktionskrav for regnvand på terræn kan differentieres indenfor den enkelte kommune.

2 Serviceniveau og funktionskrav for regnvandshåndtering

De samfundsmæssige konsekvenser ved skybrud og store regnmængder har gjort det nødvendigt at tage initiativer til at øge byers robusthed overfor skybrud ved at begrænse skader, beskytte vitale værdier og at sikre folkesundheden ved at hindre menneskelig kontakt med spildevand.

Når afløbssystemets kapacitet er opbrugt, vil vand på byens overflader følge de naturlige vandveje og i mange tilfælde skabe lokale oversvømmelser, hvoraf nogle vil være skadevoldende. Fremkomsten af digitale højdekort og mulighed for detaljeret hydraulisk beregning af strømning på overflader giver muligheder for nye beregningsmetoder, hvor de samfundsøkonomiske analyser foretages på et mere detaljeret grundlag, når vandets strømning på overfladen eksplicit medtages i beregningerne. Dermed er det muligt at beregne på en række kombinationer af tiltag både i afløbssystemet og på byens overflader. Det er derfor essentielt, at der er en bevidsthed om valg af metoder og teknologier til håndtering af afstrømmende regnvand på overfladen. Udfordringerne vil være forskellige afhængigt af, om vandet afledes i fælles- eller separatsystemer, og om der er tale om løsninger for store oplande eller mere lokale løsninger.

Som beslutningsstøtte er der i dette skrift opstillet beregningsmetoder til at fastsætte det serviceniveau, en given kommune og spildevandsselskab vil tilbyde sine borgere. Et serviceniveau for regnvand på terræn defineres i form af funktionskrav for afløbssystemerne og funktionskrav for det overfladiske afstrømningssystem. Funktionskrav formuleres som en kombination af en veldefineret kritisk kote og en mindste gentagelsesperiode for opstuvning til dette niveau og er dermed en variabel, der kan måles og/eller modelleres. Serviceniveauet anses for opfyldt, såfremt alle funktionskrav er opfyldt. Der omtales i dette skrift to forskellige former for funktionskrav:

1. Funktionskrav for afløbssystemer under regn (introduceret i Skrift 27 og tilstrækkeligt til at definere et serviceniveau for afløbssystemer).
2. Funktionskrav for regnvand på terræn (nyt).

Et serviceniveau for regnvandshåndtering udtrykker den service, som samlet kan forventes fra de professionelle aktører til samfundet og borgere. Der kan ikke sikres samme service til alle borgere, men det kan og skal sikres, at forskelle i service er rationelt begrundet (herunder f.eks. forskelle i topografi og udbygningstakt).

2.1 Formulering af funktionskrav for regnvand på terræn

For afløbssystemer er et funktionskrav defineret som en minimal gentagelsesperiode for opstuvning til en konkret defineret kritisk kote, jf. Skrift 27. For funktionskrav for regnvand på terræn definerer nærværende skrift følgende tre metoder:

1. Funktionskrav fastsættes for kommunen som helhed som en maksimal skadevoldende vanddybde på terræn, der kun må overskrides med en generel fastsat gentagelsesperiode. Herved bliver der afhængig af bygningers og delområders værdi forskel på den risiko, der optræder forskellige steder i kommunen.

Kan f.eks. formuleres som:

Maksimalt 10 cm vanddybde på terræn hvert 100. år.

2. Funktionskrav fastsættes, differentieret på arealanvendelsen i kommunen, som maksimale skadevoldende vanddybder på terræn, der kun må overskrides med fastsatte gentagelsesperioder.

Kan f.eks. formuleres som:

Maksimalt 5 cm vanddybde på terræn hvert 10.000. år for hospitaler og UNESCO verdensarvsliste.

Maksimalt 10 cm vanddybde på terræn hvert 100. år i boligområder.

Maksimalt 20 cm vanddybde på terræn hvert 30. år i parker.

3. Funktionskrav fastsættes i hvert delområde for sig i kommunen som skadevoldende vanddybder på terræn, der kun må overskrides med en lokalt fastsat gentagelsesperiode.

Kan f.eks. formuleres som:

Ud over Skrift 27 anvendes økonomisk optimering ved klimatilpasning af deloplande. For hvert delopland anvendes et funktionskrav baseret på skadevoldende vanddybder på terræn for hele deloplandet.

De nævnte metoder til fastsættelse af funktionskrav for regnvand på terræn kræver anvendelse af risikobaseret dimensionering og økonomisk optimering, hvilket kort vil blive introduceret i de følgende afsnit. Der er i skriftet i videst muligt omfang anvendt den terminologi, som anvendes indenfor de to discipliner. Bemærk især, at begrebet 'acceptabel risiko' ikke nødvendigvis betyder, at risikoen er lille.

2.2 Brug af risikoanalyse til at fastlægge funktionskrav

Risikoanalyse består af en vurdering af sandsynligheder for hændelser (ofte angivet i form af gentagelsesperioder) og de tilsvarende konsekvenser for et givet system (ofte angivet i kroner). Analysen medfører overordnet tre resultater; at risikoen for en hændelse er uacceptabel, acceptabel, eller midt imellem. Princippet er skitseret i figur 1.

		Konsekvens				
		1	2	3	4	5
Sandsynlighed	1	Uacceptabel risiko				5
	2					
	3	Acceptabel risiko		3		
	4				Acceptabel risiko	
	5	Acceptabel risiko		1		

Figur 1 Eksempel på risikoanalyse, hvor sandsynligheder og konsekvenser er opdelt i klasser. En høj sandsynlighedsklasse indebærer, at det er en sjælden hændelse, mens en høj konsekvensklasse indikerer, at konsekvensen er alvorlig.

Som angivet i figur 1 er der typisk 3 hovedresultater af en risikoanalyse:

- Såfremt risikoen er uacceptabel, skal man ubetinget sænke sandsynlighed og/eller konsekvens uanset de økonomiske eller andre konsekvenser. For regnvandshåndtering kunne det være et tiltag, der målbart ændrer sundhedstilstanden i Danmark.
- Regionen mellem det acceptable og det uacceptable benævnes ofte ALARP (på engelsk: As Low As Reasonably Practicable). Et eksempel på et gult område er, at det kan være samfundsøkonomisk billigere at give enkelte områder en dårligere service end formuleret i funktionskravet. Men dette kan i sig selv ikke retfærdiggøre et lavere serviceniveau, idet andre overvejelser end økonomiske kan have været afgørende for valget af serviceniveau. Vandrammedirektivets bestemmelser om mulighed for undtagelse af målopfyldelse, såfremt omkostningerne er uforholdsmæssigt høje, er et andet eksempel på en konkret udmøntning af ALARP.
- Såfremt risikoen er samfundsøkonomisk acceptabel, kan man lave en økonomisk optimering af forskellige tiltag, så længe man bliver indenfor dette område. Det kan f.eks. ske ved hjælp af cost benefit analyser, som vil blive beskrevet i dette skrift. Det kan f.eks. være at vælge imellem tiltag, der oversvømmer boliger i et område med gentagelsesperioder på 100 år og 500 år. Alternativt kan man vælge en optimeringsberegning.

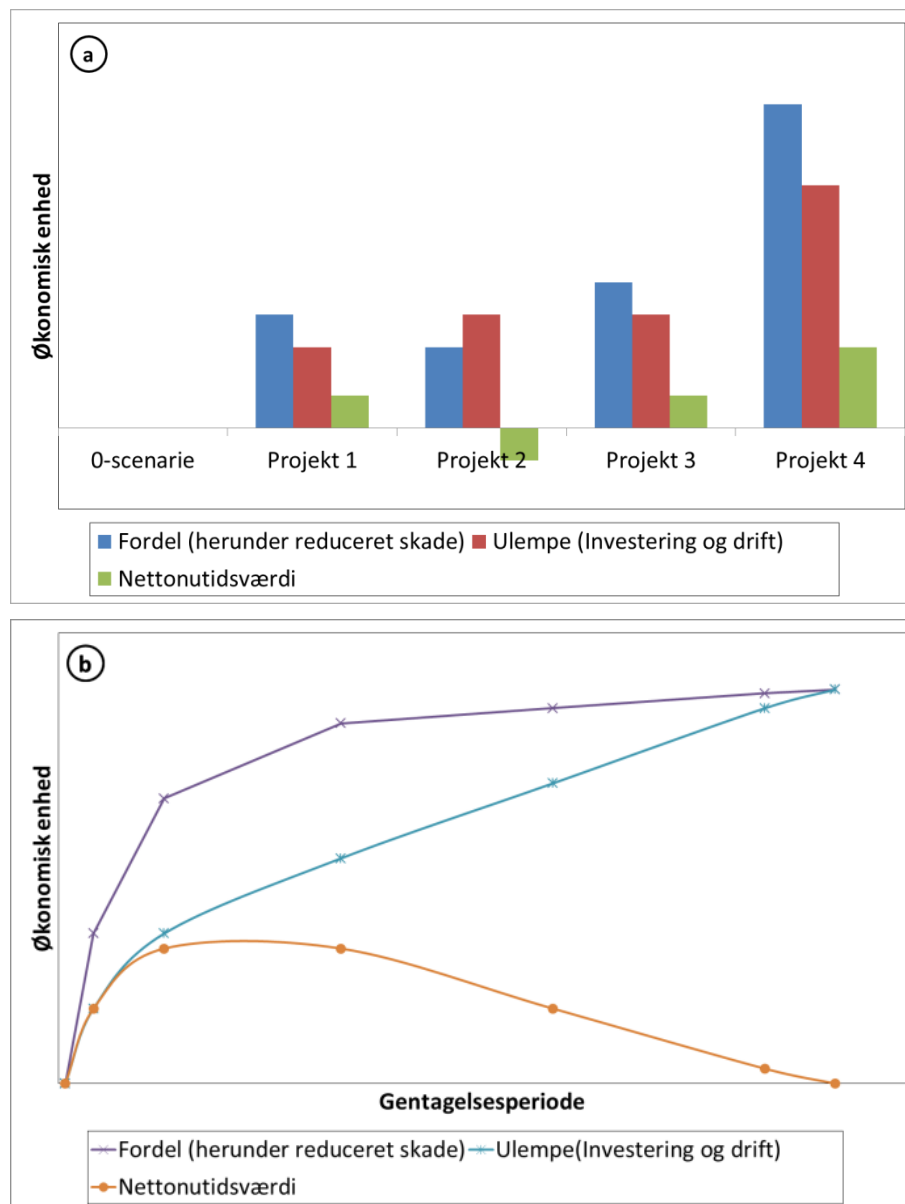
Ovenstående er en udvidelse af den fremgangsmåde, der er anbefalet i Skrift 27. Udvidelsen giver mulighed for mere fleksibelt at opstille flere (typer af) funktionskrav.

2.3 Brug af samfundsøkonomiske analyser i forbindelse med funktionskrav

Forudsætningen for anvendelse af samfundsøkonomiske analyser er, at risikoen for samfundet er acceptabel (jf. figur 1). I det tilfælde kan man vælge mellem forskellige alternative projekter ved bl.a. at vurdere deres indflydelse på samfundsøkonomien. Et simpelt eksempel er opkøb og nedrivning af en eller flere ejendomme i et opland, fordi dette er billigere end at lave en udbygning af afløbssystemet, der ville sikre opfyldelse af funktionskravet for disse ejendomme. Generelt udføres samfundsøkonomiske analyser ofte i form af cost-benefit analyser, der består af følgende trin (Boardman et al., 2011):

1. Definer en række af alternative projekter.
2. Beslut hvilke aktørers omkostninger og fordele, der skal indgå i analysen (f.eks. er det oplandets beboere, kommunen eller et større område?).
3. Fastlæg hvilke effekter der skal vurderes og hvilke indikatorer, der skal benyttes.
4. Forudsig fordele og omkostninger kvantitativt for hele projektets levetid.
5. Fastlæg hvordan fordele og omkostninger kan opgøres økonomisk (prissæt begge dele).
6. Fastlæg diskontering over tid.
7. Beregn den samfundsøkonomiske effekt i form af f.eks. nettonutidsværdi for hvert projekt.
8. Lav skøn over usikkerheden i form af følsomhedsanalyser.
9. Lav en anbefaling ud fra analysen.

For en mere grundig introduktion til samfundsøkonomiske analyser i forbindelse med klimatilpasning henvises til special-litteraturen, f.eks. Damgaard et al. (2006). Som det fremgår af ovenstående liste, er afgrænsningen af undersøgelsen afgørende for resultatet. I Skrift 27 er der angivet en metode til at optimere gentagelsesperioden for et funktionskrav. Det er principielt en samfundsøkonomisk analyse, hvor kun én type teknologi anvendes (rør), hvor omkostninger består af anlægs- og driftsudgifter, og hvor fordelene er reduktion af skadesomkostninger. Denne metode svarer til figur 2b. En mere traditionel cost-benefit analyse med sammenligning af forskellige projekter i form af forskellige valg af f.eks. teknologier og funktionskrav er vist på figur 2a.



Figur 2

Princip for økonomisk optimering af forholdet mellem fordele og ulemper. På delfigur a er angivet resultaterne af en traditionel cost-benefit analyse, hvor forskellige projekter/metoder sammenlignes. En noget mere kompliceret analyse er angivet i delfigur b, hvor man for en række gentagelsesperioder (for givet formulering af funktionskrav) har foretaget en række analyser som angivet i delfigur a, hvorved man kan finde et samlet økonomisk optimum for det givne funktionskrav.

Den samfundsøkonomiske analyse lægger dog op til, at også andre elementer indgår i analysen f.eks. værdiforøgelse af byområdet. Man kan ligeledes sammenligne forskellige teknologier og bestemme optimale funktionskrav med mere komplekse samfundsøkonomiske analyser. Det sker i givet fald

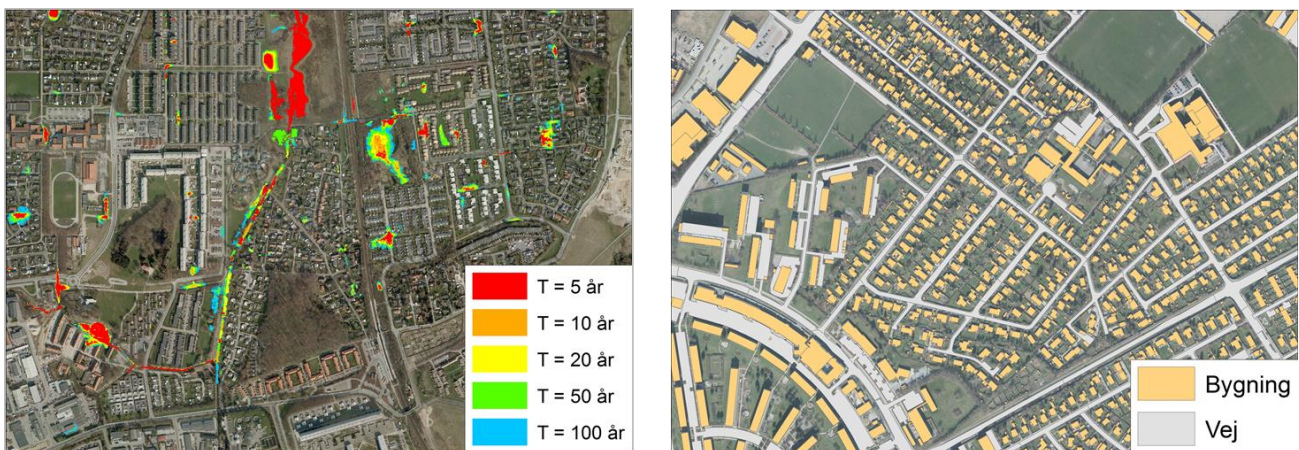
ved at vælge en formulering af et funktionskrav (ofte formuleret ud fra metode 1, se afsnit 4.1) og så bestemme fordele og ulemper for en række gentagelsesperioder. Endelig kan man optimere for flere typer af funktionskrav. Det kan f.eks. være for afløbssystemet separat, hvorefter man sikrer opfyldelse af et funktionskrav for terræn-oversvømmelser.

Det skal bemærkes, at i de samfundsøkonomiske beregninger skal skaderne opgøres uden brug af sikkerhedsfaktorer på den statistiske modelusikkerhed i beregningerne. Sikkerhedsfaktorer til håndtering af klimaændringer og fortætning indarbejdes direkte i de årlige gennemsnitlige omkostninger, som er beskrevet i de følgende kapitler. Dermed er analysen baseret på det bedste bud på, hvordan den faktiske risiko er, både i nutiden og i fremtiden. I risikoanalysen er det det konkrete afløbssystem, der anvendes. Dette afløbssystem bør dimensioneres efter principperne i Skrift 27 og altså med en anden anvendelse af sikkerhedsfaktorerne, end hvad der anvendes i nærværende skrift.

I det følgende kapitel vil metoder til opgørelser af fordele og omkostninger blive gennemgået med udgangspunkt i afløbstekniske beregninger.

3 Metoder til udarbejdelse af risikoanalyse

I det følgende beskrives metoder for udarbejdelse af en risikoanalyse. Indenfor dette skrifts fagområde bliver de to grundlæggende elementer i risikoanalysen (sandsynlighed og konsekvens) operationaliseret gennem oversvømmelseskortet, som repræsenterer omfanget af oversvømmelser i et givent område for udvalgte gentagelsesperioder, og værdikortet, som repræsenterer konsekvensen ved oversvømmelse af et givent område afhængigt af hvilke værdier, som bliver ramt (se figur 3). Metoder til at lave oversvømmelseskortet er kort beskrevet i afsnit 3.1, og metoder til værdikortlægning kan findes i afsnit 3.2. Grove oversvømmelses- og værdikort er for mange kommuners vedkommende lavet i forbindelse med klimatilpasningsplanerne.



Figur 3 Eksempel på oversvømmelseskort, som viser udbredelsen af oversvømmelse for en række gentagelsesperioder (venstre), mens værdikortlægning viser forskellige skadesklasser såsom bygninger og veje (højre).

3.1 Beregningsmetoder og modeller til identifikation og analyse af regnvand på terræn

I dette afsnit beskrives på overordnet niveau de hydrauliske modeller, der kan anvendes i forbindelse med klimatilpasning, risikoanalyse og prioritering af klimatilpasning. Modellerne er grupperet i modeller til: a) problemidentifikation af områder, som potentielt oversvømmes og b) modeller, som også kan anvendes til analyser af tiltag. Der er vist et overblik for anvendelserne af de forskellige modelværktøjer i figur 4. For detaljerede beskrivelser af alle modeller henvises der til kapitel 4 i DANVAs ”Klimakogebog” (DANVA, 2011).

3.1.1 Metoder og modeller til identifikation af potentielt oversvømmede områder

Der skelnes mellem følgende metoder og modeller:

1. DTM Hulkort. GIS-analyse, hvor der ved hjælp af digitale terrænmodeller beregnes fordybninger i overfladen.

Anvendelighed:

Metoden tager kun overfladiske afstrømninger i regning uden rør, overløbsværker, pumper og øvrig hydraulik.

2. Hulkort kombineret med simpel afstrømningsmodel. Simpel volumenbetragtning på nedbørsmængder og afstrømningskapaciteter på terræn indlægges i ”hulkort”-beregningen, så der kan findes et skøn på risikozoner.

Anvendelighed:

Screening for problemer i små oplande.

3. Hydrodynamisk afstrømningsmodel i 1D. Der beregnes kun i rør og kanaler.

Anvendelighed:

Metoden medtager ingen terrænstrømninger og simulerer ikke oversvømmelser på terræn. Metoden giver informationer om kritiske steder, hvor der forekommer regnvand på terræn pga. overbelastning af afløbssystemet.

3.1.2 Metoder og modeller til identifikation af oversvømmelsesområder og analyse af tiltag

Der skelnes mellem følgende metoder og modeller:

1. Kombineret hydrodynamisk afløbsmodel og overflademodel (1D-1D). I en 1D afstrømningsmodel implementeres overfladen som bassiner forbundet med overløbskanter.

Anvendelighed:

Metoden viser risikozonerne, mængden der opstaves, og hvor vandet når til, men ikke strømhastigheder og bevægelsesveje på terræn.

2. Kombineret hydrodynamisk afløbsmodel og 2D-overflademodel (1D-2D). Afløbsmodel og hydrodynamisk 2D overflademodel kombineres.

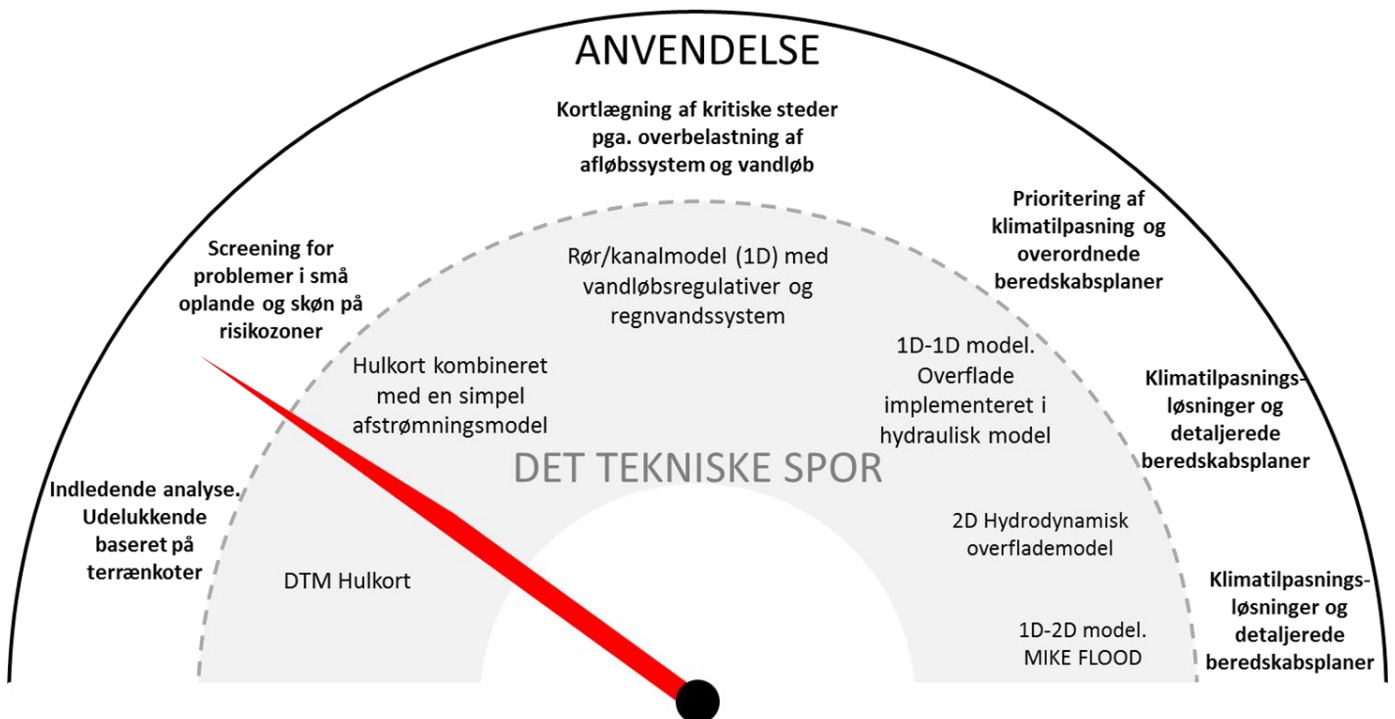
Anvendelighed:

Metoden medtager strømhastigheder og bevægelsesveje på overfladen.

3. Simulering af det samlede vandkredsløb i kombination af 1D, 2D og 3D modeller. En kombination af modeller som beskriver afstrømningen fra grundvandszonen, vandløb, afløbssystem og havet – samt udvekslingen af vand/tryk imellem modellerne.

Anvendelighed:

Dette vil give det samlede overblik over afstrømningsforholdene i byerne. P.t. kan afstrømningssystem og vandløb kombineres med hydrologien i grundvandszonen, men det er meget beregningstungt at opstille modellerne i en detalje, der gør det værd at gennemføre det store arbejde.



Figur 4 Illustration af modelværktøjer og hvad de forskellige modelleringsniveauer kan anvendes til. Figur udarbejdet på baggrund af DANVAs "Klimakogebog" (2011).

3.2 Opgørelse af skader i forbindelser med oversvømmelser

Opgørelser af skader i forbindelse med oversvømmelser er en omfattende opgave, der både kræver store mængder data og er forbundet med store usikkerheder. For konkrete undersøgelser er det derfor vigtigt at definere analysen ud fra både formålet og mængden af tilgængelige data. Afgrænsningen og detaljeringsgraden af skadesopgørelse skal desuden reflektere detaljeringsgraden af de hydrauliske beregninger og observationer. Ændringen i skader som følge af et tiltag indgår som et væsentligt element i den samfundsøkonomiske opgørelse af fordele ved et tiltag.

Når man skal opgøre omfanget af den skade, en oversvømmelse har forårsaget, er der forskellige elementer, der spiller ind. Først og fremmest viser internationale undersøgelser, at de faktorer, der har den største indflydelse på omfanget af materielle skader, er vanddybden, varigheden af oversvømmelsen og forureningsgraden af vandet (Olesen et al., 2017). Derudover har vandets hastighed, en eventuel varsel om oversvømmelsen samt bygningernes udformning målt som ”modstandsevne” i nogle tilfælde også væsentlig indflydelse.

Afsnit 3.2.1 – 3.2.4 er i høj grad baseret på en gennemgang af den internationale litteratur, som er afrapporteret i Olesen et al. (2017).

3.2.1 Skadesklasser

Skaderne opgøres ofte i fire klasser. Først og fremmest skelnes mellem, om skaden skyldes direkte kontakt med vandet eller ej. Disse tab benævnes henholdsvis direkte og indirekte skader. Dernæst skelnes mellem, om det er muligt at prissætte tabet objektivt eller ej. Disse tab benævnes henholdsvis som markedsomsatte skader og ikke markedsomsatte skader (immaterielle skader). Det medfører samlet de fire klasser, som er angivet i tabel 1.

Tabel 1 Oversigt over de fire skadesklasser.

	Direkte tab	Indirekte tab
Markedsomsatte skader	Fysiske skader: <ul style="list-style-type: none"> • Bygninger • Infrastruktur • Køretøjer • Landbrugsjord 	Forstyrrelser: <ul style="list-style-type: none"> ○ Transport ○ Forretning ○ Produktion
	Udgifter: <ul style="list-style-type: none"> ○ Evakueringer og redningsaktioner ○ Oprydning 	Udgifter: <ul style="list-style-type: none"> ○ Midlertidig genhusning
Ikke markedsomsatte (immaterielle) skader	<ul style="list-style-type: none"> ○ Dødsfald og skader ○ Sygdomme ○ Tab af genstande med affektionsværdi ○ Tab af kulturarv ○ Skader på økosystemer og miljøfølsomme goder ○ Andre gener 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Psykisk stress for de berørte ○ Forstyrrelser af hverdagen og samfundsfunktion ○ Mindre tillid til det offentlige system ○ Reducerede boligværdier

3.2.2 Principper for prissætning

Prissætningen kan opgøres i økonomisk værdi for de markedsomsatte direkte skader. De fysiske skader kan enten opgøres som enhedsomkostninger eller som en funktion af f.eks. vanddybde med en såkaldt skadeskurve. I enhedsomkostningerne benyttes en uniform skadeskurve, hvor skaden opgøres til 0 eller 100 % af det mulige tab, afhængigt af hvorvidt en bestemt tærskelværdi overskrides. En skadeskurve angiver det relative eller absolutte tab som funktion af f.eks. vanddybden og/eller de andre faktorer, som har betydning for skadens omfang. Kurven kan enten fremstilles syntetisk eller empirisk. Syntetisk kan den konstrueres ved for en hypotetisk hændelse at udregne omkostningerne ved at udbedre alle de skader, som man kan opgøre vil forekomme. Empiriske kurver kan findes ved at opgøre skaderne efter tidligere hændelser. Denne metode er dog begrænset af, om skadesdata fra oversvømmelser i tilsvarende områder er tilgængelige (Olesen et al., 2017).

For at estimere de direkte skader som enhedsomkostning har man i nogle danske studier brugt forsikringsdata opgjort og udleveret af Forsikring og Pension (COWI, 2011; Zhou et al., 2013b). Her skal man være opmærksom på, at der er forskel mellem den udbetalte forsikringssum og den samlede skade som angivet i tabel 1. De direkte tab er ofte overvurderede, fordi man erstatter til nypris, hvilket ofte er højere end den faktiske pris. Til gengæld er der værdier, der ikke er forsikrede, ligesom skader

på de ikke markedsomsatte aktiver som regel ikke erstattes, og de indirekte tab kun i nogle tilfælde erstattes. Samlet kan forsikringsdata derfor både underestimere og overestimere de samlede faktiske skader, men i de fleste tilfælde vil de undervurdere det samlede tab i forbindelse med en oversvømmelse. Udenlandske erfaringer tyder på, at de forsikrede tab udgør omkring halvdelen af det samlede tab. Forsikringsgraden i Danmark er dog højere end i mange andre lande, og derfor kan det være vanskeligt at overføre sådanne erfaringstal fra udlandet til Danmark.

I nogle oplande vil der være såkaldte hotspots i form af f.eks. museer, særlige naturområder eller hospitaler, hvor skader i form af direkte tab på markedsomsatte goder udgør en meget lille del af de samlede tab for samfundet. Det kan medføre, at der skal anvendes særlige metoder til prissætning, som diskuteret i det følgende afsnit.

3.2.3 Prissætning indenfor hver skadesklasse

Direkte markedsomsatte omkostninger

Denne skadesklasse er medtaget i alle de undersøgelser, der er fundet, og flere danske studier er hovedsagligt baseret på denne klasse (COWI, 2011; COWI, 2014; DHI, 2015; Paludan, 2007). I disse danske undersøgelser har bygningerne ofte vist sig at udgøre hovedparten af de direkte skader. Skaderne skyldes den direkte kontakt med vandet, og omfanget af de materielle skader er derfor proportionelle med oversvømmelsens karakteristika, især i forhold til vanddybde og varighed. I de direkte markedsomsatte omkostninger inkluderes desuden omkostninger til at rydde op efter oversvømmelsen og evakuere udsatte borgere.

Indirekte markedsomsatte omkostninger

Indirekte markedsomsatte omkostninger dækker hovedsageligt over de omkostninger, der forekommer i forbindelse med en lang række gener, en oversvømmelse forårsager. Eksempler på forstyrrelsestab for virksomheder kan indebære tab af både salg og produktion. Tab i forbindelse med trafikforstyrrelser dækker over længere køretid i form af ventetid, udgifter til at køre en omvej og/eller manglende mulighed for at komme ind i det oversvømmede område.

Et studie baseret på brugerundersøgelser af 557 virksomheder viste, at forretningsforstyrrelser var en større omkostning end de direkte materielle skader (Thieken et al., 2016). De indirekte skader er mest betydningsfulde, hvis det ramte område har en høj densitet af industri, da dette skadeselement har et højt indirekte tab. Store indirekte skader kan desuden skyldes oversvømmelser af transport- eller energiknudepunkter, herunder lufthavne og større transformestationer.

Direkte ikke-markedsomsatte omkostninger

Direkte ikke-markedsomsatte omkostninger er ofte omkostninger forbundet med borgernes velfærd og helbred. De største omkostninger i denne klasse er irreversible tab som tab af menneskeliv, betydningsfulde kulturelle værdier og/eller naturområder. At tabet er irreversibelt, gør det ekstra svært at fastsætte en skadesomkostning. Såfremt der er væsentlige omkostninger i denne skadesklasse, kan man overveje at lave en skala, hvor forskellige typer af skader opgøres og omregnes til en fælles enhed, så det sikres, at de direkte markedsomsatte tab ikke får for stor betydning for resultatet af analysen. En anden mulighed er at gå tilbage til principperne for risikoanalyse skitseret i kapitel 4 og konstatere, at nogle delområder har en risiko, der er uacceptabel eller ligger i ALARP området (figur 4.1). Dermed kan der ikke laves en økonomisk optimering ud fra generelle økonomiske nøgletal.

Indirekte ikke-markedsomsatte omkostninger

Indirekte ikke markedsomsatte omkostninger kan være svære at identificere og ikke mindst prissætte. Som udgangspunkt dækker disse skader i en samfundsøkonomisk analyse over borgernes velbefindende. Et tysk studie baseret på brugerundersøgelser af påvirkede borgere efter en kraftig oversvømmelse i juni 2013 (Thieken et al., 2016) viste dog med stor tydelighed, at man ikke altid kan negligere dem. Studiet fandt, at de pågældende borgere var mere påvirket af de mentale problemer og forstyrrelser i forsyningen af vand, el og varme i forbindelse med oversvømmelsen end af de faktiske fysiske skader på bygningerne og infrastrukturen.

Dette viser, at selvom de indirekte ikke-markedsomsatte omkostninger kan være svære at prissætte, så bør man inddrage dem i analyserne. Hvis de ikke kan kvantificeres, må de overvejes i forbindelse med implementeringer af tiltag, der minimerer risikoen for oversvømmelser.

3.2.4 Anbefalet fremgangsmåde

For at kunne sammenligne risikoanalyser for forskellige områder er det vigtigt, at de samme metoder for skadesopgørelser er anvendt. En risikoanalyse skal derfor som minimum angive, hvilke skadesklasser, der er medtaget, og på hvilken måde.

De direkte markedsomsatte skader (og som minimum bygninger) skal altid medtages, og det skal opgives, hvorvidt prissætningen er baseret på faktisk værdi eller nyværdi. Herefter kan de følgende 3 skadesklasser medtages i denne rækkefølge: Indirekte markedsomsatte omkostninger, direkte ikke markedsomsatte omkostninger og indirekte ikke markedsomsatte omkostninger. Metoden er illustreret i figur 5.

Såfremt formålet er en simpel sammenligning af et projekt med et business-as-usual scenarie, kan det i nogle tilfælde være nok kun at inkludere de direkte markedsomsatte skader. Dette er tilfældet, hvis projektet allerede giver et overskud med denne skadesklasse, da fordelene ved tiltaget alt andet lige er

undervurderet. Hvis analysen derimod bruges til at sammenligne forskellige projekter, hvor forskellige skadestyper påvirkes uens, vil det være nødvendigt at medtage alle 4 skadesklasser. Ved bestemmelse af, hvor mange trin man skal medtage i analysen, er det dog vigtigt at gøre klart, at kravet til mængden og kvalitet af data vokser. Når man bevæger sig mod trin 3 og 4 og inddrager de ikke markedsomsatte omkostninger, må man desuden acceptere, at usikkerheden stiger væsentligt.

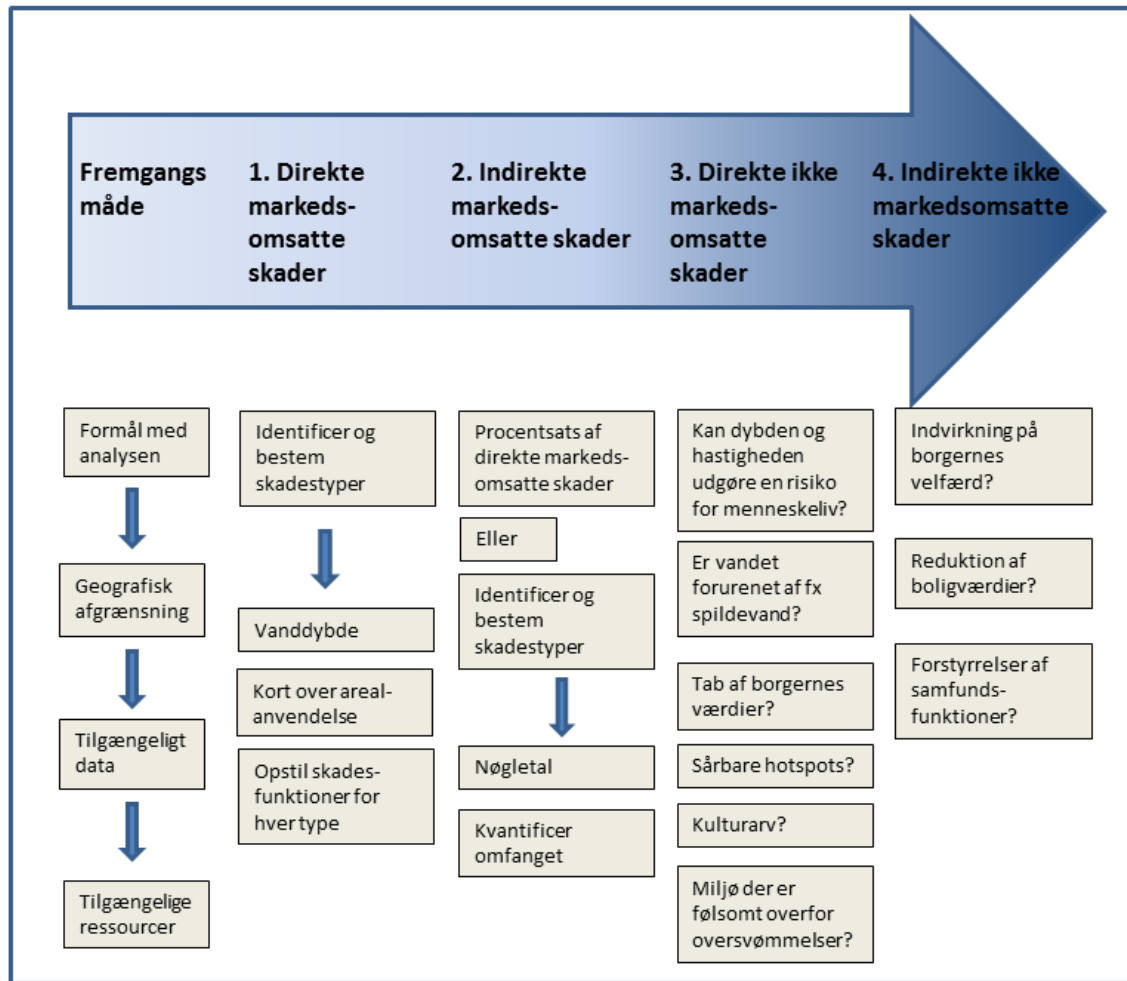
I analysen skal det undersøgte område afgrænses geografisk. For de fysiske skadesomkostninger er der måske en oplagt afgrænsning, men for de indirekte skader kan denne afgrænsning være mindre entydig. Forstyrrelser af trafik og energiforsyning vil ofte have effekter udenfor området, som principielt bør indregnes. Samtidig bør en del af de indirekte omkostninger indenfor området modregnes af en indirekte indtægt fra naboområderne, f.eks. ved at en butik udenfor oversvømmelsesområdet kan have en meromsætning som følge af det indirekte tab en butik i oversvømmelsesområdet oplever.

Naturstyrelsen har udgivet et regneark, hvor der er angivet en række enhedspriser for skader på direkte og indirekte markedsomsatte værdier (PLASK, 2016). Det bør for ethvert konkret projekt vurderes, om de opgivne enhedspriser kan antages at være repræsentative for det pågældende område, og om mere komplekse nøgletal skal fremskaffes for det konkrete projekt.

Indirekte markedsomsatte omkostninger bør skønnes ud fra en vurdering af, hvorvidt de angivne enhedspriser for skader i Naturstyrelsens regneark er repræsentative, eller om der er væsentlige effekter i området, som enten vurderes for højt eller lavt. Det bemærkes, at udenlandske undersøgelser i nogle tilfælde anbefaler at angive de indirekte markedsomsatte omkostninger som en procentsats af de direkte markedsomsatte omkostninger. Der er dog ikke tilstrækkelige undersøgelser til, at en konkret procentsats kan anbefales for undersøgelser i Danmark.

De ikke-markedsomsatte omkostninger er vanskelige at prissætte. Ofte vil det være ønskeligt med en screening af, hvorvidt der overhovedet kan ske oversvømmelser af områder, hvor der er risiko for tab af menneskeliv, eller af særlige hotspots i området.

Bestemmelse af de indirekte ikke-markedsomsatte skader er vanskelig på nuværende tidspunkt. De fleste undersøgelser peger på, at borgernes velfærd vil blive negativt påvirket i form af usikkerhed og stress.



Figur 5 Anbefalet fremgangsmåde for opgørelser af skader i forbindelse med oversvømmelser. Man starter med at fastlægge omfanget af undersøgelsen og prissætter herefter de skader, som undersøgelsen har mulighed for at prissætte.

3.3 Beregning af forventet årlig omkostning, *EAD*

Risikoanalysens resultat sammenfattes i en beregnet forventet årlig omkostning, *EAD* (Engelsk: Expected Annual Damage). *EAD* udtrykker, hvor store omkostninger der i gennemsnit over en lang årrække er forbundet med oversvømmelser. Udgifterne til oversvømmelser er naturligvis ikke jævnt fordelt fra år til år, men er et resultat af ekstremregn af meget forskellig størrelse. Den meget store oversvømmelse, som fandt sted d. 2. juli 2011 i København, medførte skader på omkring 6 mia. kr., hvilket svarer til mange års *EAD*.

Hvis der tages udgangspunkt i afløbssystemets hydrauliske kapacitet, håndteres alt regnvandet i systemet op til en vis grænse, og derfor vil kun hændelser over denne kapacitet give anledning til oversvømmelser. Den årlige omkostning kan da opgøres til summen af disse skader delt med længden af observationsperioden, se figur 6.

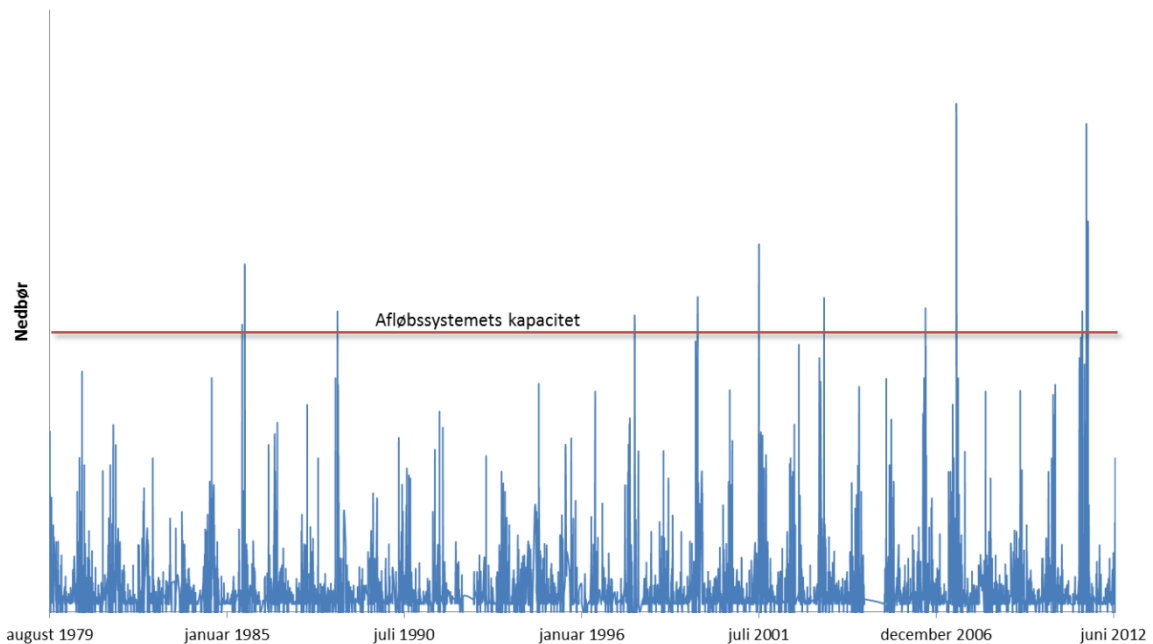
Den årlige omkostning kan for et eksisterende opland illustreres ud fra historiske data som i figur 7. For et givent område kan man, såfremt man har tilstrækkeligt valide data, opgøre den årlige omkostning som summen af alle skader indenfor området delt med længden af observationsperioden. Når der ses på den *forventede* årlige omkostning fremover, er det imidlertid andelede, da fordelingen af hændelser i fremtiden ikke er kendt. Den forventede årlige omkostning må derfor estimeres på basis af gentagelsesperioden for de enkelte hændelser. Da det ikke er praktisk muligt at analysere risikoen for alle tænkelige hændelser, vil det være nødvendigt at finde en sammenhæng mellem, hvor kraftig en hændelse er (gentagelsesperioden), og hvor store skader den giver anledning til. Erfaringer viser, at denne sammenhæng ofte tilnærmet kan beskrives som en log-lineær relation, hvor gentagelsesperioderne afbildes på en logaritmisk x-akse og skadesomkostningerne på en lineær y-akse. Et eksempel fra Odense på dette kan ses i figur 8.

Ud fra figur 8 ses, at afløbssystemets kapacitet i dette tilfælde ligger omkring en 2-års gentagelsesperiode. Herefter begynder der er at opstå skader som følge af stigende gentagelsesperioder. En 100-års hændelse giver skader for omkring 40 mio. kr., men sandsynligheden for overskridelse af en 100 års hændelse er samtidig også kun 1 % i et givent år.

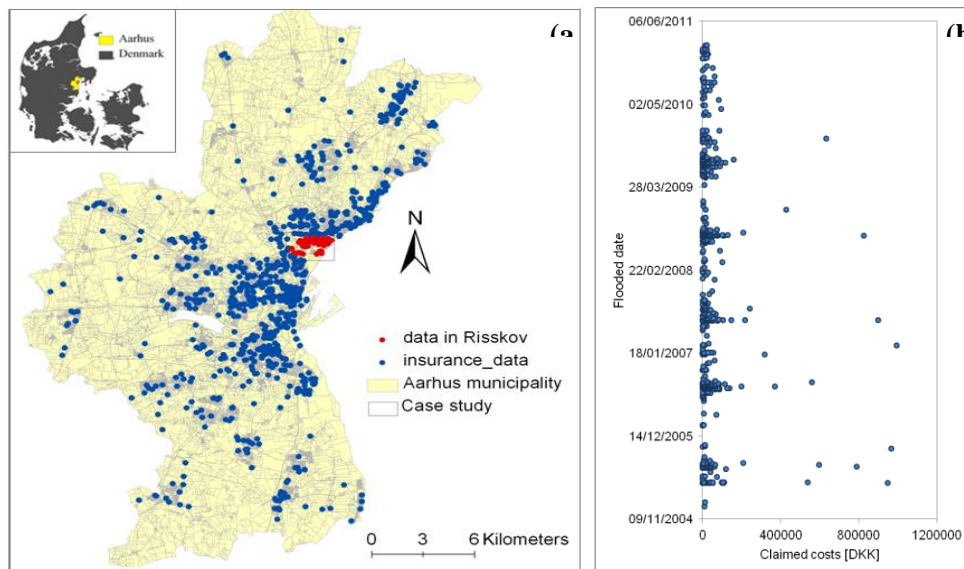
Mere formelt udregnes den forventede årlige omkostning, *EAD*, som integralet af omkostningen ved skadevoldende hændelser vægtet med sandsynligheden for de pågældende hændelser:

$$EAD = \int_{x_{T_s}}^{\infty} D_X(x_T) f_X(x_T) dx_T$$

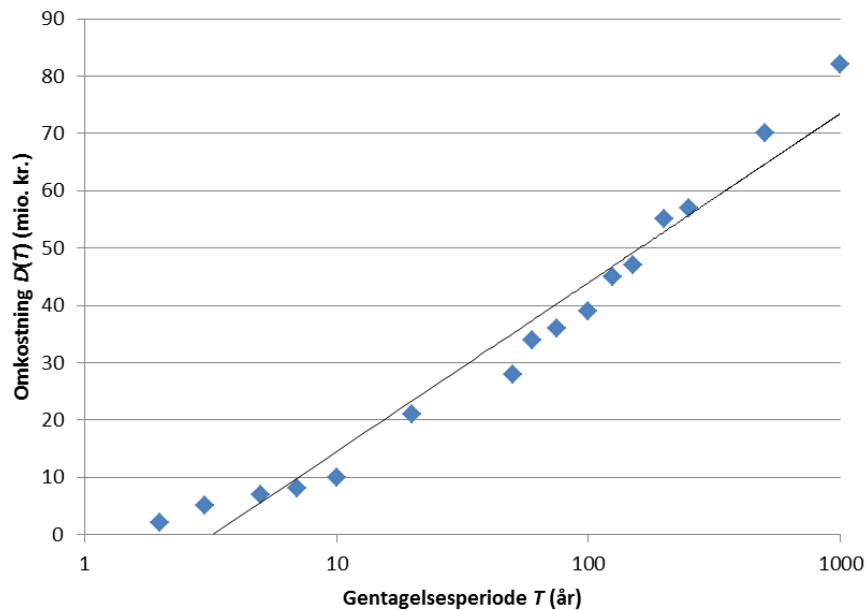
hvor x_{T_s} er den mindste regnhændelse, der medfører skade, $D_X(x_T)$ er skadeomkostningen ved regnhændelsen x_T , $f_X(x)$ er sandsynlighedstæthedsfunktionen for årsmaximumsregnhændelser og sandsynligheden $p = 1/T$. Den mindste gentagelsesperiode, der medfører skader, T_s , antages her større eller lig med T_0 , hvor T_0 angiver skæringen af omkostningsfunktionen med abscisseaksen.



Figur 6 *Et afløbssystem vil kunne håndtere op til en vis mængde regn (rød linje). Når systemets kapacitet overskrides, vil der ske oversvømmelser. Den forventede årlige omkostning findes ved at summere omkostningerne for alle skadevoldende hændelser i perioden og herefter dividere med længden af observationsperioden.*



Figur 7 *Eksempel på den tids- og stedsmæssige fordeling af skader målt i form af udbetalte erstatninger fra forsikringskader på baggrund af oversvømmelser fra regnvejr. Figur fra Zhou et al. (2013b).*



Figur 8 For stigende gentagelsesperiode vil der være voksende skadesomkostninger. Ofte kan sammenhængen tilnærmet beskrives med en log-lineær sammenhæng.

EAD kan ofte nemmere bestemmes ved integration/summation over enten overskridelsessandsynligheden, p , eller gentagelsesperioden T , d.v.s.

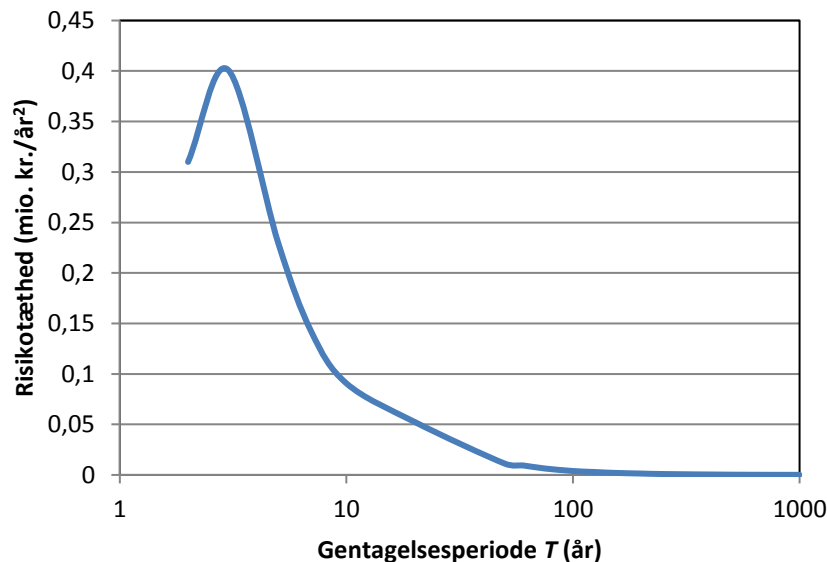
$$\begin{aligned}
 EAD &= \int_0^{p_s} D_p(p) dp \\
 &= \int_{T_s}^{\infty} \frac{D(T)}{T^2} dT
 \end{aligned}$$

hvor $D_X(x_T) = D_p(p) = D(T)$ er den samme skadefunktion blot med forskelligt argument. Udtrykket $D(T)/T^2$ benævnes risikotætheden (Rosbjerg, 2017) og viser grafisk, hvilke gentagelsesperioder der bidrager mest til den samlede risiko, se figur 9. Metoden forudsætter, at der kun optræder skader for gentagelsesperioder væsentligt over 1 år. Hvis skader optræder tæt på eller hyppigere end en gang om året beregnes EAD ud fra metoden beskrevet i Olsen et. al (2015).

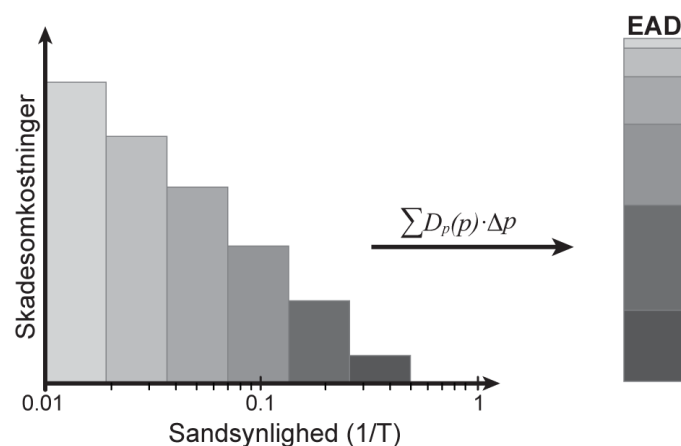
EAD kan beregnes ved numerisk integration af figur 9. Alternativt kan man, som f.eks. i PLASK (2016), lave summation mellem udvalgte gentagelsesperioder som skitseret i figur 10. Hvis skadesomkostninger som funktion af gentagelsesperioden følger en log-lineær sammenhæng, som det er antydnet figur 8, kan man finde et eksplicit udtryk for EAD , se Bilag B.

Beregning af EAD vil blive mere præcis, hvis der indgår mange hændelser i beregningen. Såvel praktiske erfaringer som teoretiske overvejelser viser, at det især er vigtigt at have en god beskrivelse

omkring toppunktet i figur 9, mens det er mindre nødvendigt med mange hændelser for meget små og meget store gentagelsesperioder.



Figur 9 Skadesomkostningerne for de enkelte hændelser divideret med T^2 angiver risikotætheden og viser det relative bidrag til den samlede forventede årlige omkostning, EAD, som funktion af gentagelsesperioden. Den viste risikotæthed er beregnet ud fra den log-lineære model angivet i figur 8, og figuren viser dermed, at det største bidrag til EAD kommer fra hændelser med en gentagelsesperiode på omkring 3 år. Figur fra Rosbjerg (2017).



Figur 10 Illustration af summation over udvalgte beregningpunkter baseret på p . Selvom skadesomkostningerne for den største hændelse er størst, er det ikke den, der bidrager mest til EAD.

4 Samfundsøkonomiske analyser

Beregningen af den forventede årlige omkostning, *EAD*, er et nødvendigt input til de egentlige samfundsøkonomiske analyser af klimatilpasning. Et klimatilpasningstiltag er i denne sammenhæng et projekt, der sænker *EAD* forårsaget af ekstremregn (det kan også være et godt projekt uden at have denne egenskab, men så er det ikke et klimatilpasningsprojekt til ekstremregn). Den samfundsøkonomiske analyse har som formål at undersøge, hvorvidt faldet i *EAD* er tilstrækkeligt til at retfærdiggøre investeringen i tiltaget.

For at kunne vurdere effekten af forskellige klimatilpasningstiltag findes der en række værktøjer, som kan være med til at give et konsistent sammenligningsgrundlag, når forskellige alternative løsningsformer skal vurderes, eller indsatsen prioriteres. I nærværende skrift lægges der op til at udføre en samfundsøkonomisk analyse på en af to måder:

- en cost-benefit analyse (*CBA*), der beskriver samfundsøkonomiske gevinster/tab ved sammenligning af konkrete projekter eller
- en samfundsøkonomisk optimering, hvor der fastlægges et serviceniveau for regnvand på terræn.

Begge disse samfundsøkonomiske analyser kan anvendes uafhængigt af hvilket detaljeringsniveau, der er anvendt til at bestemme *EAD*.

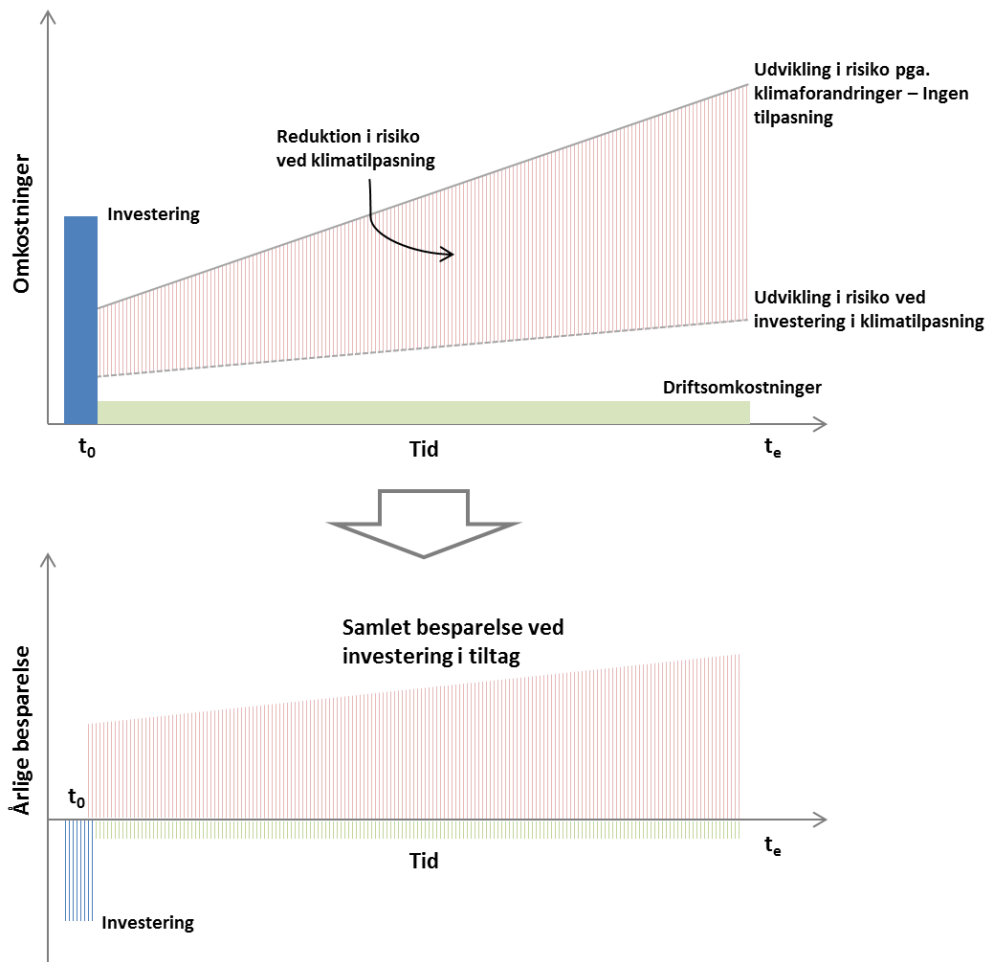
4.1 Analysemetode 1: Cost-benefit analyse til sammenligning af forskellige konkrete klimatilpasningstiltag

En cost-benefit analyse (*CBA*) går ud på at sammenligne to eller flere konkrete projekter eller forskellige løsningsformer (klimatilpasningstiltag) på et gennemskueligt sammenligningsgrundlag, som gør det muligt at medtage både reducerede omkostninger og andre positive sideeffekter i den økonomiske analyse, der skal føre frem til en prioritering.

Ethvert tiltag vil være forbundet med nogle tiltagsomkostninger og en række driftsomkostninger, hvilket udgør ”cost”-delen i *CBA*’en. Ved at implementere klimatilpasningstiltag vil risikoen (udtrykt ved *EAD*) sænkes. Den reducerede risiko skyldes, at klimatilpasningstiltaget medfører færre skadesomkostninger på grund af oversvømmelser. Denne reduktion er den faste ”benefit”-del i *CBA*’en. Herudover kan medtages andre positive sideeffekter som f.eks. en forbedring af de rekreative muligheder i et område, hvorved området bliver mere attraktivt (se f.eks. Zhou et al., 2013a).

Implementering af klimatilpasningstiltag vil oftest medføre store anlægsomkostninger i det første år af dets levetid. Reduktionen i *EAD* vil derimod være en årlig gevinst, hvorfor også dyre projekter kan

ende med at blive samfundsøkonomisk attraktive, når der ses på effekten af projektet i hele dets levetid – faktisk vil fordelene principielt vokse år for år, fordi klimaændringer generelt øger *EAD*, se figur 11.



Figur 11 Øverst: Udvikling i risiko (opgjort som *EAD*) ved investering i klimatilpasningstiltag og ved ingen tiltag (*business as usual*). Nederst: Samlet besparelse ved klimatilpasning.

I et hvert givent år vil nettogevinsten, eller nettoværdien, af klimatilpasningstiltag derfor kunne udregnes som fordele minus ulemper. De samlede nettoværdier kan så summeres op for alle år i projektets levetid, hvilket er udtryk for den samlede samfundsøkonomiske gevinst. I en *CBA* er det dog bredt anerkendt, at disse fordele og ulemper bør diskonteres, således at beløbet udtrykkes i en såkaldt nettonutidsværdi, *NNV*, se faktaboks 1, der er defineret som:

$$NNV = \sum_{t=t_0}^{t_e} \frac{Benefit_t - Cost_t}{(1+r)^t}$$

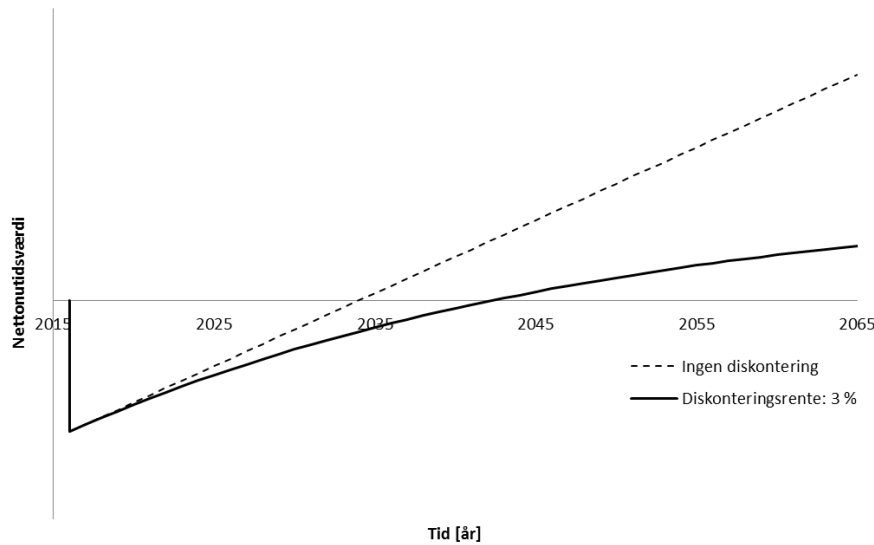
hvor $Benefit_t$ og $Cost_t$ er gevinster og omkostninger i år t , r er diskonteringsrenten og t_0 og t_e er henholdsvis start- og slutår i projektets samlede levetid. Et eksempel på dette, med og uden diskontering, kan ses i figur 11.

Faktaboks 1. Diskontering

Med en enkeltudgift i et år og uendelig mange års benefit vil alle projekter i princippet være gunstige. I samfundsøkonomien opereres der derfor med en såkaldt diskonteringsrente, så fremtidens benefits langsomt udtyndes, da benefits langt ude i fremtiden vil være mindre værd for dem, der udfører et projekt nu. I praksis vil ting som driftsomkostninger og projektets levetid have stor indflydelse på et projekts NNV .

For en gennemgang af metoder til at fastsætte størrelsen af diskonteringen henvises til den samfundsøkonomiske faglitteratur.

Et klimatilpasningsprojekt er ifølge den samfundsøkonomiske analyse som udgangspunkt en god investering, når NNV er positiv. På samme måde vil to forskellige projekter, eller løsningsalternativer, kunne sammenlignes ved at udregne den respektive NNV for hver især. Det bedste projekt er dermed alt andet lige det projekt, der har den højeste NNV . Fordelen ved at anvende NNV er, at andre samfundsøkonomiske fordele og ulemper ved det konkrete projekt kan adderes direkte. Dermed kan f.eks. rekreative og/eller miljømæssige fordele, i det omfang de kan prissættes, indgå direkte i den samfundsøkonomiske analyse på linje med den økonomiske fordel af at ændre risikoen for oversvømmelse.



Figur 12 Eksempel på udviklingen af NNV som funktion af længden af den periode som projektets økonomi vurderes over, med og uden diskonteringsrente. I starten vil der være store anlægsomkostninger, men da der er en årlig besparelse i form af lavere EAD kan dette set i et længere tidsperspektiv retfærdiggøre en stor investering.

Det er dog vigtigt at understrege, at der i det konkrete projekt bør indgå andre overvejelser end blot den rent samfundsøkonomiske. Synergier med den øvrige byplanlægning, kloakfornyelse o.lign. kan være med til at gøre et projekt attraktivt at udføre.

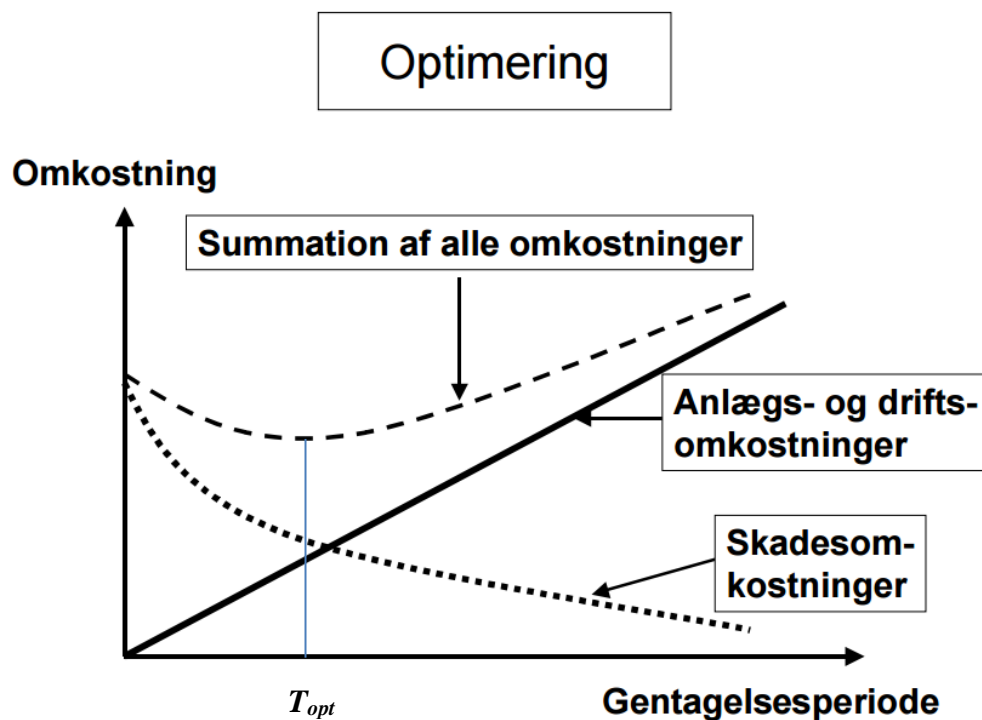
Andre ændringer over tid

I praksis vil risikoen opgjort som EAD ikke kun ændre sig grundet klimaforandringer – den vil også ændre sig på grund af byudvikling. Det drejer sig om større projekter med nye bydele, men også større renoveringsprojekter kan være væsentlige, ligesom almindelig byfortætning er en ganske væsentlig proces at medtage.

4.2 Analysemetode 2: Optimering med henblik på at fastlægge serviceniveau

Hvor den i forrige afsnit beskrevne metode kan indikere, om et projekt er en god samfundsøkonomisk investering eller ej, kan den ikke umiddelbart benyttes til indikation af, hvor store investeringer der ud fra et samfundsperspektiv bør foretages i klimatilpasning.

For at kunne gøre det – og dermed nå frem til et optimalt serviceniveau for regnvand på terræn – kan man undersøge de samlede anlægs- og driftsudgifter til klimatilpasning for en række forskellige funktionskrav, hvor funktionskravene er direkte relateret til gentagelsesperioder, og sammenligne dem med de tilsvarende værdier af *EAD*. Optimeringen består herefter i at bestemme gentagelsesperioden svarende til minimum af skadesomkostninger plus anlægs- og driftsomkostninger, se figur 12. Figuren kommer fra Skrift 27, hvor den kritiske kote er defineret som terrænniveau, men princippet kan også anvendes til at formulere funktionskrav for vanddybder over terræn, jf. kapitel 2.



Figur 13 Det grundlæggende princip for økonomisk optimering af serviceniveau baseret på forholdet mellem anlægs-, drift- og skadesomkostninger omregnet til en gennemsnitlig årlig omkostning som funktion af gentagelsesperioden for overholdelse af et defineret funktionskrav. Figuren tilpasset fra Skrift 27 (2005).

Ved udførelse af klimatilpasningstiltag opnås en højere grad af sikring mod oversvømmelser, og som følge heraf vil *EAD* formindskes. Jo højere funktionskrav, der klimasikres til, jo mere vil *EAD* blive reduceret, men samtidigt vil omkostningerne til en klimatilpasning forøges. Det er derfor relevant at finde det niveau for klimatilpasningen, der giver den mindste totale årlige omkostning, når både ændringer i *EAD* og anlægs- og driftsomkostninger til udførelse af klimatilpasningsplanen tages i betragtning.

Kapitalomkostningerne kan udregnes som årlige udgifter til forrentning og afskrivning af den investerede kapital. Inkluderer klimatilpasningstiltaget også forbedringer i bymiljøet, som ikke direkte er nødvendige for klimatilpasningen, skal de årlige kapitalomkostninger til disse fraregnes. Netto årlige kapitalomkostninger betegnes *ACC* (annual capital costs). Med en forventet levetid på L år og rentefoden r kan *ACC* svarende til en kapitaludgift CC udregnes som

$$ACC = \frac{r CC}{1 - (1 + r)^{-L}}$$

Med tillæg af de årlige driftsomkostninger *OC* (operational costs) opnås de samlede årlige udgifter *EAC* (equivalent annual costs) hidrørende fra etablering og drift af klimatilpasningstiltag

$$EAC = ACC + OC$$

Både *EAD* og *EAC* vil således være funktioner af den gentagelsesperiode T , som klimasikringen udbygges til. En optimering af indsatsen vil derfor kunne foretages ved at undersøge, om der kan findes et minimum for de to totale årlige omkostninger *TAC* (total annual costs) ved at variere T

$$TAC(T_{opt}) = \min_T \{EAD(T) + EAC(T)\}$$

Hvis både *EAD* og *EAC* kan beskrives som log-lineære funktioner af T , kan der findes en simpel analytisk løsning til optimeringsproblemet, se bilag B. Et meget væsentligt resultat af de gennemførte analyser er, at det er betydeligt mere omkostningstungt at underdimensionere end at overdimensionere ved klimatilpasning (Rosbjerg, 2017). Dette er tidligere påvist i andre sammenhænge (f.eks. Gregersen og Arnbjerg-Nielsen, 2012) og er et ret robust resultat på tværs af mange analyser.

Såfremt det tages i regning, at udgifterne til oversvømmelserne gradvis vil forøges som følge af kraftigere regn i fremtiden, vil det medføre, at den beregnede optimale gentagelsesniveau bliver lidt højere. Dette er ligeledes illustreret i bilag B.

Inddragelse af andre elementer i beregningerne

En af de første analyser af klimatilpasning i Danmark omhandlede en vurdering af, hvorvidt det var samfundsmæssigt fornuftigt at følge anbefalingerne i Skrift 29 omkring inddragelse af en klimafaktor i forbindelse med projektering af nyanlæg. Analysen blev beskrevet i Miljøprojekter 1187 og 1188

(Arnbjerg-Nielsen et al., 2007) fra Miljøstyrelsen og viste, at det for Roskilde by var en endog særdeles fordelagtig investering.

Andre projekter er mere komplekse, og mange analyser viser, at man ved en omhyggelig planlægning kan opnå meget lav risiko for skader forårsaget af regnafstrømning. Det kræver planlægning af, hvor vandet opmagasineres og transporteres under kraftig nedbør, og at afstrømning i byens afløbssystem og på byens overflader vurderes i en samlet analyse.

Der er naturligvis en række andre elementer ved vandafledning, der skal indgå ved vurdering af klimatilpasningstiltag, som f.eks. ændringer af drift og investeringsbehov for renseanlæg. Derudover kan andre faktorer også medtages såsom biodiversitet og de rekreative værdier i byen. Et kompromis, hvor andre kriterier end lige netop vand indgår, vil ofte være det endelige resultat. Andre typer af tiltag såsom f.eks. rekreative værdier kan eventuelt indgå i vurderingen, såfremt de kan prissættes, ligesom ved vurdering af konkrete projekter i cost-benefit analyser.

5 Eksempler

Som nævnt indledningsvis, har en række aktører lavet analyser på flere forskellige oplande i Danmark, men selvom der har været metodemæssige lighedspunkter, har analyserne været præget af meget store forskelle i både terminologi, formål og typer af resultater.

Under arbejdet med dette skrift er en række forskellige cases blevet diskuteret. De har været kendetegnet af metodemæssige forskelle, men også med meget forskellige organisatoriske, politiske og økonomiske rammer. Alle væsentlige detaljer har ikke altid været tilgængelige. Endvidere har nogle af dem repræsenteret afsluttede analyser, hvor væsentlige beslutninger allerede er taget, mens andre har haft foreløbig karakter.

Fire eksempler er blevet udvalgt for at illustrere nogle af de metodemæssige valg, der kan gennemføres, og nogle af de typer af resultater som analyserne kan omfatte. Hovedtræk ved de 4 eksempler er anført i tabel 2, og eksemplerne er forklaret oversigtligt i bilag A.

Tabel 2 Hovedtræk af de 4 eksempler, som gennemgås i bilag A.

	Funktionskrav afløbssystem	Funktionskrav for regnvand på terræn	Skadetyper medtaget i risikokort	CBA gennemført	Optimering gennemført	Benyttet til beslutninger
København	Skrift 27	10 cm over terræn, T<100 år i 2110 (Metode 1)	Direkte og indirekte markeds- omsatte	Ja	Ja	Ja
Aarhus	Skrift 27	Erfaringer opsamles på projektbasis de næste 4 år (Metode 3)	Direkte markeds- omsatte	Nej	Nej	Ja
Birkedalen, Greve	Skærpet ifht. Skrift 27	Skader ved opstuvning over terræn kun tilladt for T>100 år (Metode 3)	Bygninger	Ja	Nej	Ja
Helsingør	Skrift 27	Under overvejelse (Metode 2)	Bygninger	Ja	Ja	Ja

6 Afsluttende bemærkninger

Nærværende skrift kommer med en række anbefalinger til, hvordan man kan opstille et beslutningsgrundlag for serviceniveau for regnvand på terræn. Skriftet giver en række konkrete anbefalinger både med hensyn til metodevalg, og til hvordan serviceniveauet kan formuleres. Skriftet er i overensstemmelse med det arbejde, der er foregået internationalt gennem de seneste ca. 10 år, samtidig med at der er introduceret en dansk metode og givet konkrete forslag til, hvordan sådanne analyser kan integreres med traditionel dimensionering og analyse af afløbssystemer i Danmark.

Skriftets tilblivelse har været en længere proces, hvor både rammen for undersøgelsen og begrænsninger i anvendelsen har været diskuteret intensivt. Et højere serviceniveau end i Skrift 27 indebærer ofte, at vandet håndteres bevidst på terrænet. Det er en proces, der indebærer, at byrummet kommer i spil. Derfor er der mange aktører i processen, og der er mange behov, der skal tilgodeses.

Alt i alt er processen med at definere serviceniveau for regnvand på terræn og opstille gode projekter ofte sværere end 'blot' at bygge afløbssystemer. Det er en af årsagerne til, at arbejdet med at udforme og skrive skriftet har taget lang tid. For arbejdsgruppen er nærværende skrift ikke slutmålet, men et middel. Det overordnede mål er, at regnvandshåndtering kan bidrage til at skabe bedre byer, der tilpasses fremtidens små, store og rigtig store regnhændelser og samtidigt skabe byer, der er gode at leve i til daglig. Vi håber, at skriftet kan give inspiration til at nå dette mål.

7 Referencer

- Arnbjerg-Nielsen K, Fleischer HS, Hansen JH, Olsen DB, Seidelin C, Nielsen T, Kunnerup T. (2007). Klimatilpasning af afløbssystemer og metodeafprøvning. Økonomisk analyse. Miljøprojekt 1187, Miljøstyrelsen, København.
- Boardman AE, Greenberg DH, Vining AR, and Weimer DL (2011): Cost-Benefit Analysis. Concepts and Practice. Fourth Edition. Prentice Hall, New Jersey.
- COWI (2010): Betydning af klimaændringer for hovedstadsregionen. Analyse for Region Hovedstaden, Maj 2010.
- COWI. (2011). Risikovurdering af oversvømmelser.
- COWI. (2014). Enhedsomkostninger ved oversvømmelseskader fra skybrud.
- Damgaard C, Strandmark L, Heideman R, Nielsen T, Emborg L (2006): Metodemæssige problemstillinger i forbindelse med samfundsøkonomiske vurderinger af klimatilpasningstiltag. Miljøstyrelsen.
- DANVA, 2011: En kagebog for analyser af klimaændringers effekter på oversvømmelser i byer, DANVA 2011.
- DHI. (2015). Integrated Urban Water Systems. Retrieved April 8, 2015, from <http://www.mikepoweredbydhi.com/products/west/integrated-urban-water-systems>.
- Gregersen IB og Arnbjerg-Nielsen K (2012). Decision strategies for handling the uncertainty of future extreme rainfall under the influence of climate change. *Water Science and Technology*, 66, 2, 284-291.
- Olsen, AS, Zhou Q., Linde JJ, Arnbjerg-Nielsen K 2015. Comparing Methods of Calculating Expected Annual Damage in Urban Pluvial Flood Risk Assessments. *Water* 2015, 7, 255-270; doi:10.3390/w7010255.
- Olesen, L, Löwe, R & Arnbjerg-Nielsen, K (2016). Flood Damage Assessment. Literature review and recommended procedure. DTU 2016.
- Paludan, B. (2007). Udarbejdelse af oversvømmelseskadesrisikokort for Greve Kommune, 1–8.
- PLASK (2016) <http://www.klimatilpasning.dk/viden-om/oekonomi/beregningsvaerktoej.aspx>.
- Rosbjerg, D (2017). Optimal adaptation to extreme rainfalls in current and future climate. *Water Resources Research*, 53,1, 535-543, DOI: 10.1002/2016WR019718.
- Spildevandskomiteen (1999): Regional variation af ekstremregn i Danmark. Skrift 26, Spildevandskomiteen, Ingeniørforeningen i Danmark.

- Spildevandskomiteen (2005): Funktionspraksis for afløbssystemer under regn. Skrift 27, Spildevandskomiteen, Ingeniørforeningen i Danmark.
- Spildevandskomiteen (2006): Regional variation af ekstremregn i Danmark - ny bearbejdning (1979-2005). Skrift 28, Spildevandskomiteen, Ingeniørforeningen i Danmark.
- Spildevandskomiteen (2008): Forventede ændringer i ekstremregn som følge af klimaændringer. Skrift 29, Spildevandskomiteen, Ingeniørforeningen i Danmark.
- Spildevandskomiteen (2014): Opdaterede klimafaktorer og dimensionsgivende regnintensiteter. Skrift 30, Spildevandskomiteen, Ingeniørforeningen i Danmark.
- Thieken, AH., Bessel, T, Kienzler, S, Kreibich, H, Müller, M, Pisi, S, Schröter, K (2016). The flood of June 2013 in Germany: how much do we know about its impacts? *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16, 1519–1540. <http://doi.org/10.5194/nhess-2015-324>.
- Zhou Q, Panduro TE, Thorsen BJ, Arnbjerg-Nielsen K (2013a). Adaption to extreme rainfall with open urban drainage system - An integrated hydrological cost benefit analysis. *Environmental Management*, 51, 3, 586-601.
- Zhou Q, Panduro TE, Thorsen TJ, and Arnbjerg-Nielsen K (2013b). Verification of flood damage modelling using insurance data. *Water Science and Technology*, 68, 2, 425-432. doi: 10.2166/wst.2013.268

8 Ordliste

<i>Forventet omkostning, EAD</i>	<i>årlig</i>	Den gennemsnitlige omkostning fra oversvømmelser fra ekstremregn pr. år fra en uendelig lang måleserie af skadesdata i en by uden ændringer af afløbssystem, byudvikling eller klimaændringer.
<i>Funktionskrav</i>		Konkret formulering af krav til den hydrauliske funktion af afløbssystemer, eller afløbssystemer og det overfladiske afstrømningssystem, under regn. Formuleres ud fra en kombination af veldefinerede kritiske koter og en acceptabel mindste gentagelsesperiode for opstuvning til dette niveau. Et fastsat funktionskrav, eller en kombination af flere fastsatte funktionskrav, er et udtryk for et givet serviceniveau.
<i>Klimatilpasning</i>		Tilpasning af afløbssystemer eller overfladiske afstrømningssystemer, og det byggede miljø, til fremtidige klimatiske forhold med henblik på at opnå et defineret serviceniveau. Skybudssikring er en del heraf. Benyttes også som en generel term, der fokuserer på tilpasning for at nå miljømål som f.eks. nedbringelse af overløb.
<i>Klimatilpasningstiltag</i>		Ethvert tiltag – strukturelt eller ikke-strukturelt – til imødegåelse af effekterne af klimaforandrings effekt. Strukturelle tiltag kan være f.eks. bassiner, tunneler, vejprofiler, der indgår i det overfladiske afstrømningssystem, søer, lokal afledning af regnvand og naturbaserede metoder til håndtering af regnvand. Ikke-strukturelle tiltag kan være f.eks. beredskabsplaner og borgeres medansvar for at flytte værdier bort fra oversvømmelsestruede kældre.
<i>Netto-nutidsværdi, NNV</i>		Den økonomiske fordel, som et projekt vil give, såfremt alle udgifter og indtægter tilbageskrives til nutiden.
<i>Oversvømmelseskort</i>		Viser udbredelse af oversvømmelse på terræn for forskellige gentagelsesperioder.
<i>Risikokort</i>		Viser den arealmæssige fordeling af oversvømmelsesrisiko i et område, opgjort f.eks. ved den forventede årlige omkostning, <i>EAD</i> .
<i>Serviceniveau</i>		Udtrykker den grad af sikkerhed mod skader i forbindelse med oversvømmelse, som borgeren oplever. Kan være baseret på en samfundsøkonomisk optimering og/eller et politisk valg. Konkretiseres ved at formulere et eller flere funktionskrav.

<i>Værdikort</i>	Viser beliggenheden af fysiske objekter med forskellige skadesklasser, som f.eks. huse og veje.
<i>Skybrud</i>	Voldsom regnbyge, der forårsager oversvømmelse af kloakker og tagrender. Defineres af DMI som situationer, hvor der falder mere end 15 mm nedbør på 30 minutter, men benyttes indenfor afløbsteknik som en generel term for skadevoldende regnhændelser.
<i>Skybrudssikring</i>	Særlig udgave af klimatilpasning, der udelukkende fokuserer på skadevoldende regnskyl.

Bilag A Eksempler fra København, Aarhus, Greve og Helsingør.

A.1 Eksempel København – valg af serviceniveau vha. samfundsøkonomisk optimering på kommuneniveau

Allerede i 2008 iværksatte Københavns Kommune undersøgelser med henblik på, hvilken klimatilpasningsstrategi kommunen skulle lægge sig fast på. På baggrund af nogle overordnede analyser blev der udvalgt en strategi, som både skulle sikre en begrønning af byen og samtidigt gøre den mere robust overfor større regnmængder og havvandsstandstigninger. Efter den store oversvømmelse i 2011 besluttede Københavns og Frederiksbergs kommuner sig for at lave en samlet screening af, hvilket funktionskrav der med fordel kunne anvendes i begge kommuner for regnvand på terræn ud fra en økonomisk optimering. Det vil gå for vidt at komme ind på de mange analyser, der er foretaget. Derfor er der nedenfor taget udgangspunkt i den overordnede rapport, der fastlægger funktionskrav for regnvand på terræn på baggrund af en økonomisk optimering (COWI, 2012).

En række forskellige strategier for løsninger blev analyseret, hvori der indgik flere tiltag i forskellige kombinationer. Det var tiltag som etablering af højvandslukker, øget kapacitet af afløbssystemet, afkobling af regnvand fra afløbssystemet, håndtering af skybrud på overfladen, håndtering af skybrud ved en kombination af overflade- og tunnelløsninger, en kombineret udbygning af afløbssystemet til at overholde funktionskravet for afløbssystemet i 2100 og etablering af skybrudsløsninger.

Det har været en forudsætning for arbejdet, at byens udformning i form af arealanvendelse (placering og funktion af bygninger, pladser, infrastruktur mv.) anses for at være uændret, men med hensyn til klimabelastning betragtes som et system i år 2110.

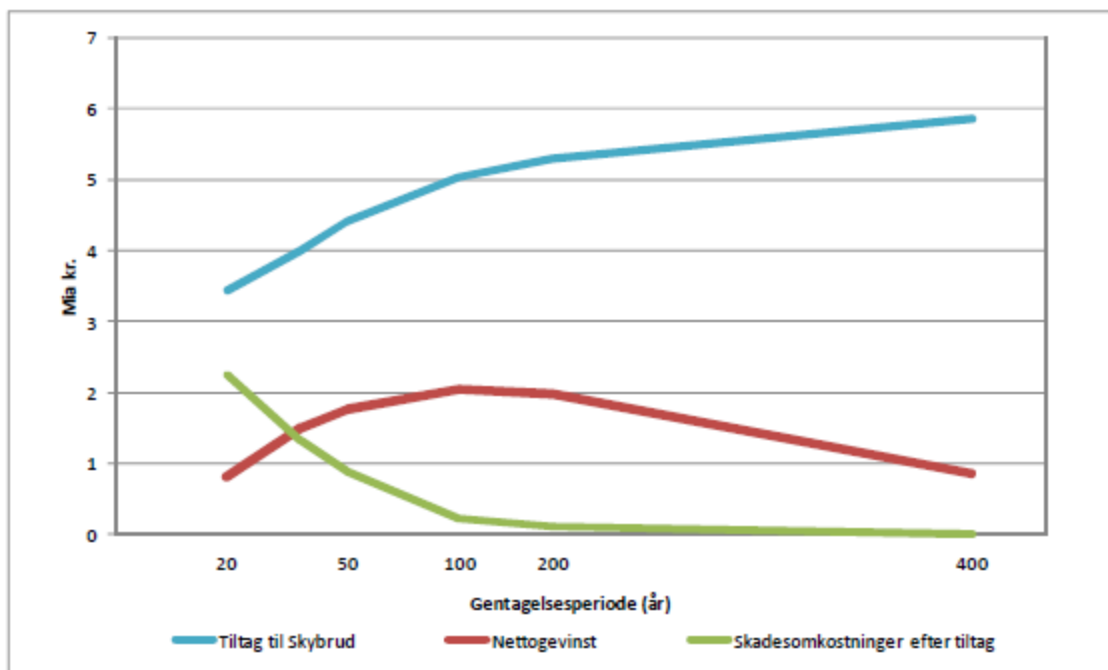
Derefter blev der lavet en række samfundsøkonomiske beregninger med henblik på bl.a. at fastsætte funktionskrav for vand på terræn.

Der blev lavet screeninger af nødvendige investeringer i form af løsninger til sikring af forskellige funktionskrav formuleret som forventede gentagelsesperioder i år 2110.

Den samfundsøkonomiske analyse bestod af:

- En vurdering af risikoen for oversvømmelser ved mere regn og skybrud samt de skadesomkostninger, det kan afstedkomme over de næste 100 år, hvis der ikke gøres noget ("business-as-usual")
- En sammenligning af omkostningerne ved løsningerne og gevinsterne ved reduktion af skader i byen i forhold til "business-as-usual" (cost-benefit analyse). Denne beregning giver svar på, hvorvidt løsningerne er fordelagtige i forhold til ikke at gøre noget ("business-as-usual")

Resultatet af disse beregninger er vist i figur 1. Som det fremgår, svarer det til en kombination af de to metoder til vurdering af samfundsøkonomiske analyser, hvor analyse af flere konkrete projekter fører til en omtrentlig optimering. Analysen viser, at det er samfundsøkonomisk optimalt at investere op til et funktionskrav svarende til en gentagelsesperiode på 100 år i år 2110 (baseret på den regionale regnmodel fra Skrift 26). Det svarer til en gentagelsesperiode i det aktuelle klima i 2015 på omkring 250 år i henhold til Skrift 30.



Figur 1: Nutidsværdi af samfundsøkonomisk nettogevinst ved skybrudssikring til forskellige niveauer i København og Frederiksberg kommuner. Tiltag til skybrud er kun vist for København.

I de økonomiske vurderinger er medtaget direkte økonomiske konsekvenser, mens der ikke er inddraget værdien af øget herlighedsværdi fra åbning og begrønning af byen, sundhedsmæssige aspekter og lignende, da de er stort set ligeværdige for de undersøgte principløsninger. Det økonomisk mest fordelagtige vurderes at være en klimatilpasning, hvor skybrudssikringen koordineres med tilpasningen af afløbssystemet, så der opnås en synergieffekt og dobbelt udnyttelse og udbytte af skybrudsanlæggene. Undersøgelsen har vist, at for at opnå det bedste samfundsøkonomiske resultat, er det nødvendigt at kombinere fremtidssikring af afløbssystemet med overfladeafstrømning og transporttunneler op til en 100 års regn i 2110 og en acceptabel vanddybde på 10 cm.

Der er udarbejdet en plan for vandveje og oplande for de to kommuner, så håndteringen af skybrud kan koordineres og styres på en sådan måde, at der samlet set opnås den størst mulige synergi både

mht. selve skybrudssikringen, men også for blå-grønne klimakorridorer, grøn byudvikling, udbygningstakt mv.

Ref:

COWI (2012): Skybrudsplan og strategi. Rapport til Københavns Kommune, Teknik- og miljøforvaltningen og Frederiksberg Kommune, Bygge-, plan- og miljøafdelingen. August 2012. COWI, Kgs. Lyngby.

A.2 Eksempel Aarhus – lokale mål for tilpasning til regnvand på terræn i Aarhus Kommune

Baggrund

I forarbejdet til Spildevandsplan 2017-2020 er det vurderet, om der skal fastsættes mål for regnvand på terræn i Aarhus Kommune, og om det i givet fald skal være et generelt mål for hele kommunen eller lokale mål, der fastsættes på projektniveau.

Konklusionen af arbejdet blev, at det er fornuftigt at gøre noget, når det samfundsøkonomisk kan betale sig – altså når det er dyrere ”ikke at gøre noget” end at gøre noget. Hertil kommer, at der opnås en ekstra gevinst, når vandet ses som en ressource, der kan øge lokalområdets naturmæssige og rekreative værdi og gøre Aarhus til en god by at være og investere i.

I forhold til om der skal fastsættes ét fast mål eller lokale mål for vand på terræn, blev der taget udgangspunkt i, at Aarhus har store topografiske forskelle, og at sårbarheden for oversvømmelse i forskellige byområder dermed også er meget forskellige. Hertil kommer, at omkostningerne ved en klimaindsats altid bør holdes op mod værdien af det, der skal beskyttes. På denne baggrund blev konklusionen, at det giver mest mening at fastsætte lokale mål for regnvand på terræn i konkrete projekter.

Principperne for fastsættelsen af mål for regnvand på terræn

Aarhus Kommunes metode til fastsættelsen af mål for regnvand på terræn tager udgangspunkt i, at den investering, der lægges i klimatilpasningen, står mål med de sparede skadesomkostninger, samtidig med at driften af vitale samfundsnyttige funktioner (udpeget som ”hotspots” i Klimatilpasningsplan 2014) kan opretholdes. Hotspots omfatter anlæg, bygninger eller områder, der har en høj værdi set ud fra sundhedsmæssige, kulturelle, historiske, natur- eller miljømæssige og infrastrukturelle betragtninger.

I de kommende fire år frem til næste revision af Aarhus Kommunes Spildevandsplan, skal der opbygges erfaringer med at bruge metoden i forbindelse med gennemførelsen af de projekter, hvor der foretages adskillelse af regnvand og spildevand og større fornyelsesprojekter i afløbssystemet. Metoden vil blive tilrettet og beskrivelsen yderligere detaljeret i takt med, at der opnås praktiske erfaringer med at anvende metoden. Når projekterne er gennemført, følges områderne, så udviklingen i skadesomkostninger kan opgøres.

Da projektafgrænsningen er afgørende for opgørelsen af skadesværdien i det enkelte projektområde og dermed de investeringer, der samfundsøkonomisk optimalt kan foretages i området, er det et springende punkt, hvordan afgrænsningen skal fastlægges, når der samtidig er fokus på, at de enkelte

grundejere skal sikres en god og ligelig behandling. Det vil derfor være et væsentligt opmærksomhedspunkt i den videre udvikling af metoden.

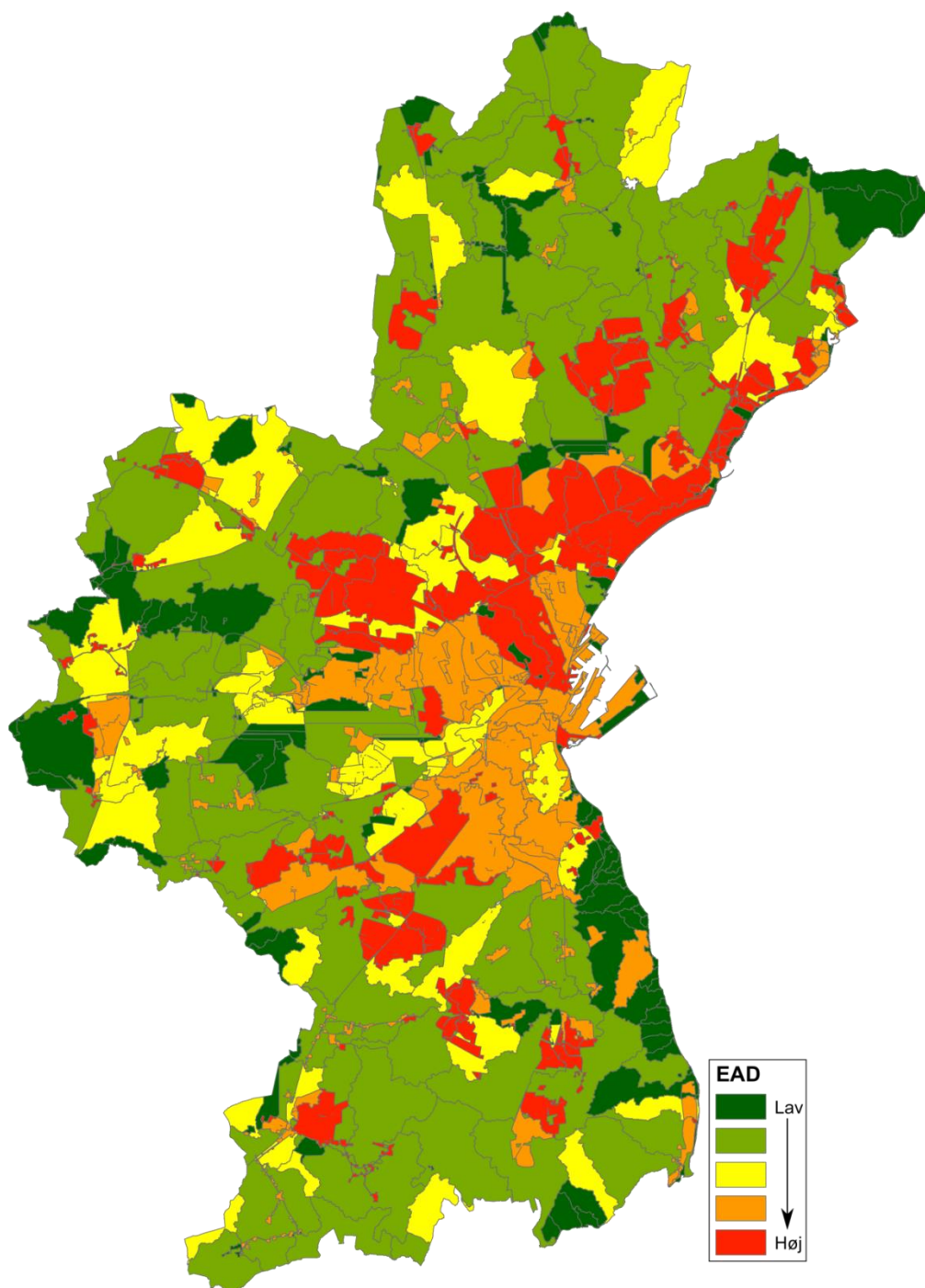
Principperne bag beregning af skadesomkostningen

Der er foretaget en beregning af den forventede årlige skadesomkostning (*EAD*) ved forskellige regnhændelser for hele kommunen ud fra skades- og oversvømmelseskortene i Aarhus Kommunes Klimatilpasningsplan. I opgørelsen af skadesværdier er medtaget direkte markedsomsatte skader på bl.a. boliger, industri, offentlig service, landbrugsjord, veje og jernbaner.

Skadesomkostningerne er et udtryk for, ”hvad det koster”, hvis der kun tilpasses til den dimensionsgivende regn svarende til Aarhus Vands serviceniveau for afløbssystemet.

Ved at kombinere oversvømmelseskortet med skadesomkostningerne er der udarbejdet et kort for hver gentagelsesperiode, der beskriver hvilket skadesniveau, der kan forventes for den modellerede oversvømmelse.

Det er nu muligt at summere de samlede skadesomkostninger inden for afgrænsede oplande. I Aarhus Kommune er der lavet en oplandsafgrænsning ud fra en kombination af kloakoplande og topografiske oplande. På figur 1 ses et kort over Aarhus Kommune, hvor *EAD*-værdierne er beregnet for alle disse oplande for hele kommunen.



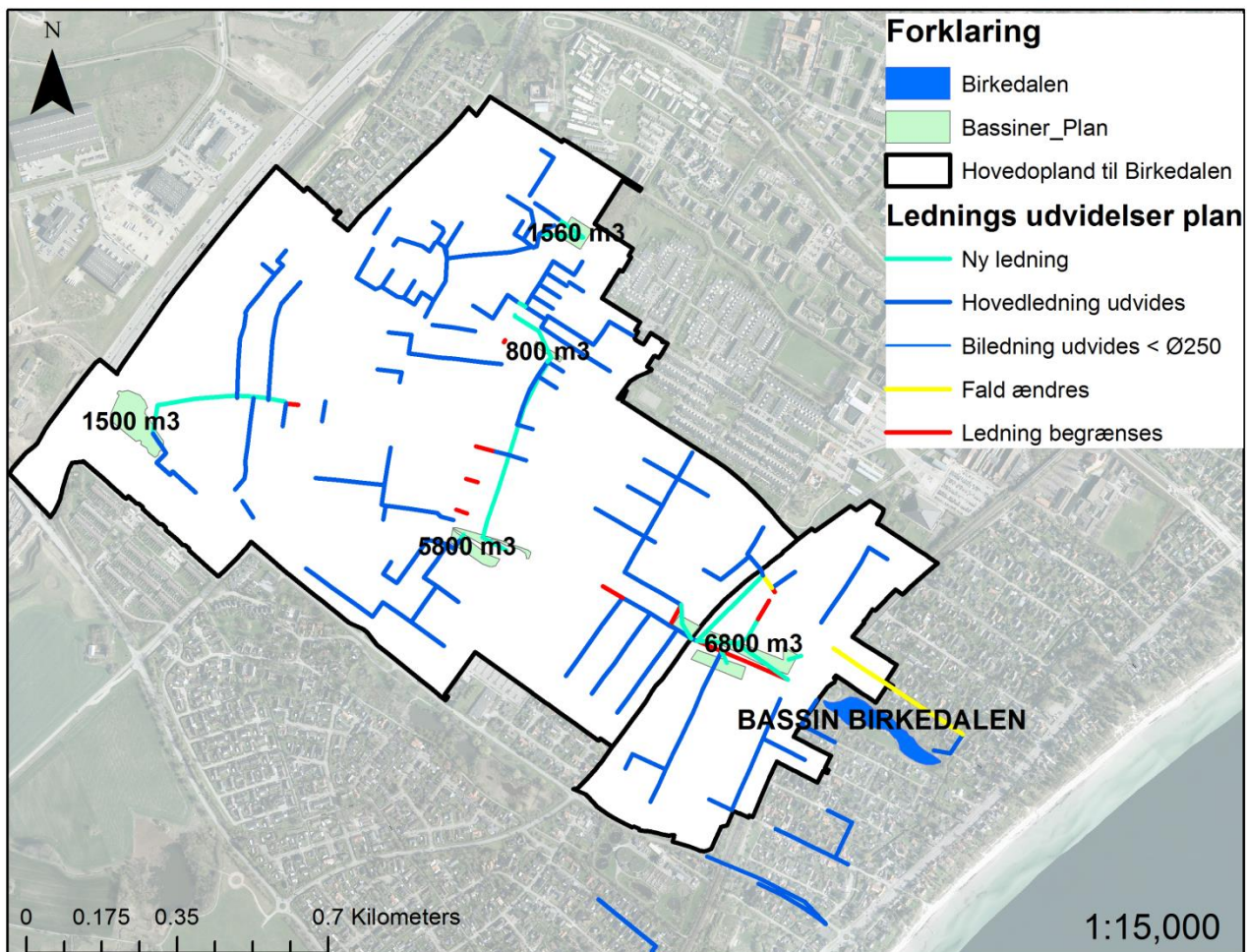
Figur 1; Forventede årlige skadesomkostninger (EAD) ved oversvømmelse fra ekstremregn for Aarhus Kommune.

A.3 Eksempel Greve – klimatilpasning og skybrudssikring i Birkedalen

For Greve Kommune er det politisk besluttet af byrådet, at serviceniveauet i alle områder, uanset kloakeringsform, skal overholde et funktionskrav på $T = 10$ år for opstuvning til terræn. Birkedalen består af flere kloakoplande og blev i kommunens risikokortlægning det højest prioriterede hovedopland. Området blev klimatilpasset, og efterfølgende blev der gennemført en analyse, som skulle vise, om det kunne betale sig at skybrudssikre området. Fremgangsmåden viser et eksempel på en implementering af Metode nr. 3 i Skrift 31.

Klimatilpasning af kloak

Klimatilpasning af afløbssystemet, så kommunens serviceniveau for kloak overholdes, har vist sig ved en cost-benefit analyse at være en god samfundsøkonomisk investering. Hydrauliske beregninger har vist, hvilke tiltag som er nødvendige for at overholde dette fremtidige serviceniveau (figur 1).



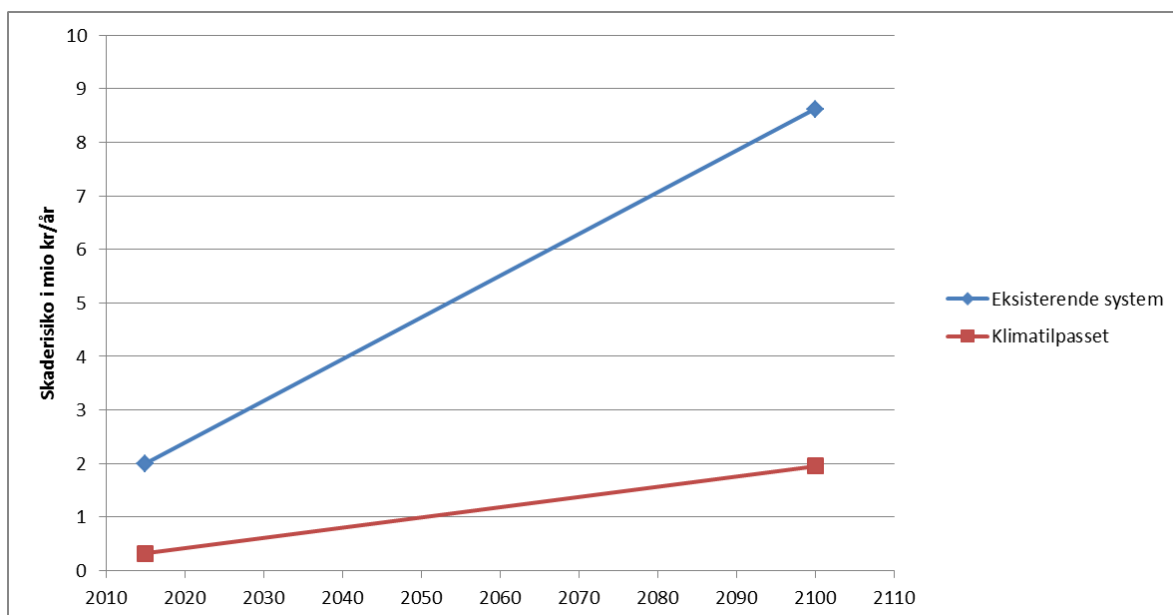
Figur 1: Nødvendige tiltag i form af øgede rørdimensioner og ekstra bassinvolumen for at opnå et serviceniveau på $T = 10$ år for opstuvning til terræn i år 2100.

Cost-benefit analysen blev gennemført med skadesværdier for bygninger beregnet ved sammenligning af oversvømmelser og skadesopgørelser fra Forsikring og Pension (Greve Solrød Forsyning 2011) som vist i tabel 1.

Oversvømmelse	Skadesomkostning	Skadesomkostning	Skadeselementer
	kr./bygning	kr./m ²	
over 20 cm	0,5 mio.	2500	Bygning
over 40 cm	1,25 mio.	6250	Bygning
over 0 cm	0,1 mio.	500	Kælder

Tabel 1. Oversvømmelsesskader som funktion af vanddybde. Data er fra Forsikring & Pension.

Udviklingen i skaderne ved investering i klimatilpasning af afløbssystemet (dimensionering til T = 10 år i år 2100) kan illustreres som i figur 2. Forskellen mellem kurverne, omregnet til nutidsværdi, udgør den samlede gevinst ved klimatilpasningen.



Figur 2: Udvikling i skaderisiko fra 2015 til 2100 opgjort for det eksisterende og for et klimatilpasset system (dimensionering til T = 10 år i år 2100) i Birkedalens opland.

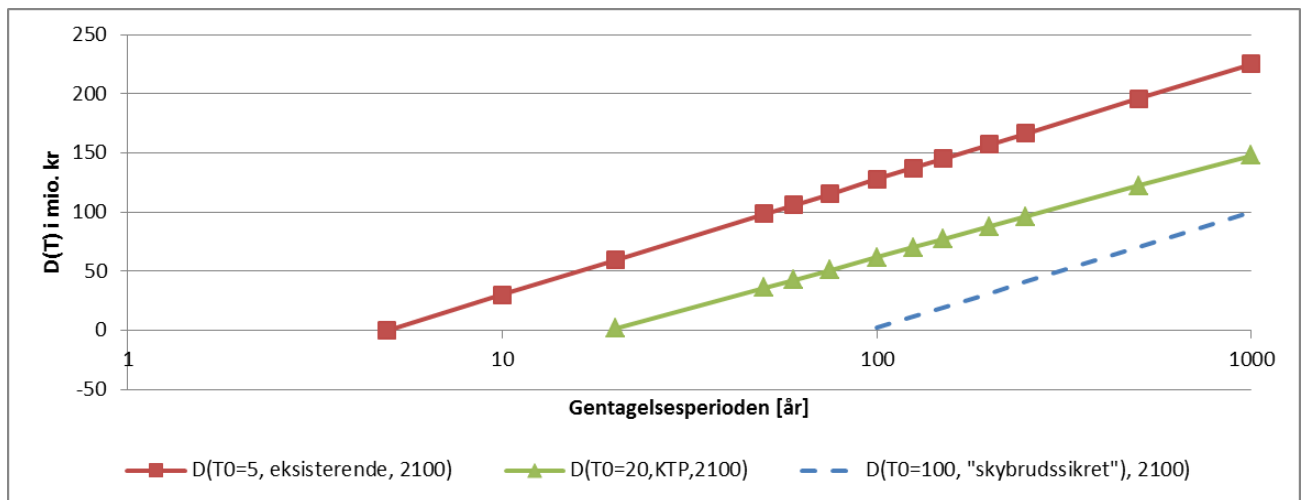
Resultatet her er opnået ved, at der alene er set på skader på bygninger. Hvis der blev medtaget skader på øvrige værdier, herunder trafikforsinkelser, miljø, folkesundhed og andre indirekte ikke-markedsomsatte værdier, ville det vise sig endnu mere rentabelt at klimatilpasse Birkedalen.

Den resterende oversvømmelsesrisiko vil kunne sænkes yderligere i Birkedalen, men omkostningerne til tiltag må ikke overstige den mulige reduktion i oversvømmelsesskader.

Skybrudssikring

Ved brug af en kombination af SCALGO og MIKE FLOOD er der fundet optimale skybrudsløsninger i Birkedalens opland. Løsningerne er skybrudsveje og render, men også udvidelser af de bassiner, som skal etableres for at klimatilpasse til T=10 år.

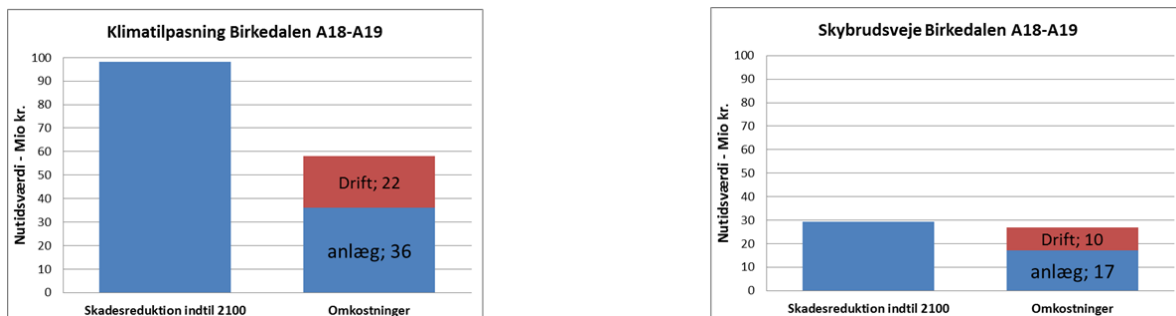
Der blev opnået serviceniveau for vand på terræn på T = 100 år (skader sker først for hændelser større end T = 100 år). Gevinsten i form af reducerede skader blev fundet ved at beregne nutidsværdier og tillægge en drift på ca. 2 % som et mål for, hvor meget skybrudssikringen til en 100 års hændelse måtte koste.



Figur 3: Skadeomkostningerne med det eksisterende system, samt ved klimatilpasning (KTP) og ved sikring mod skybrud i fremtiden.

Skybrudstiltag i Birkedalen består af forskellige overfladeløsninger, som blev implementeret i en hydraulisk model for at teste effekten og beregne den resulterende skadesrisiko.

Skybrudssikring til en 100 års hændelse viste sig at være økonomisk fordelagtig ved, at investeringen til tiltagene er mindre end skadesreduktionen. Ved denne investering vil alle borgere i det pågældende opland have samme minimum risiko for skader. Cost-benefit analyserne for hhv. klimatilpasning og skybrudssikring er vist i figur 4.



Figur 4: Cost-benefit analyse for hhv. klimatilpasning af afløbssystem til T=10 år og skybrudssikring til T=100 år i Birkedalens opland.

A.4 Eksempel Helsingør – differentieret serviceniveau baseret på en samfundsøkonomisk analyse

For at beslutte til hvilket niveau og i hvilken takt Forsyning Helsingør skal klimatilpasse afløbssystemet, gennemfører Forsyning Helsingør flere forskellige overvejelser, som skal ligge til grund for beslutningerne. Som en vigtig del af arbejdet har Forsyning Helsingør anvendt en samfundsøkonomisk analyse.

Helsingør Kommune og Helsingør Forsyning har i et fælles projekt set på klimatilpasning og skybrudssikring af centrum for at undersøge, på hvilket niveau regnvandet skal håndteres.

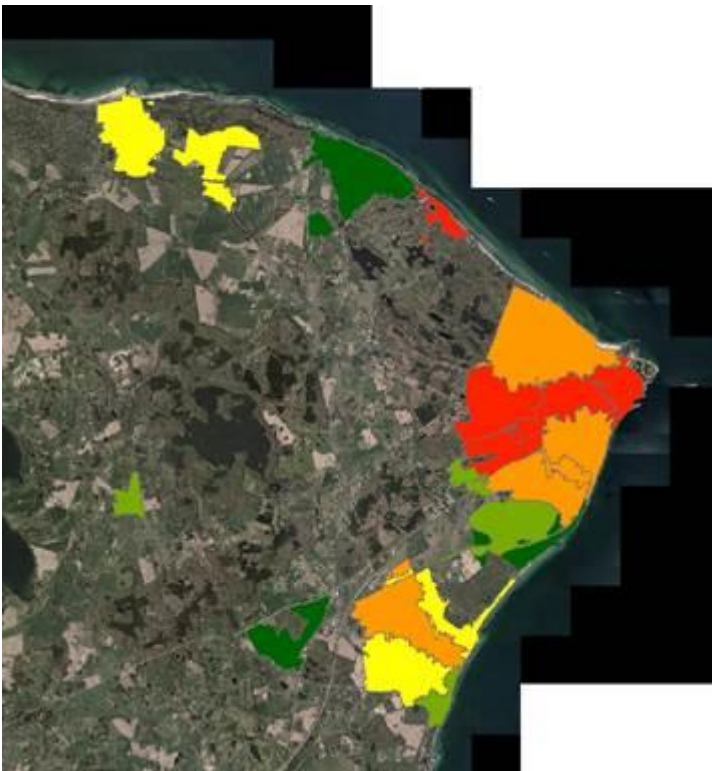
Metoden, som er beskrevet her, er endnu ikke anvendt til beslutninger, men resultatet, som er gennemført for centrum, fremlægges politisk i juni 2017.

Forsyning Helsingør ser også på bl.a. virksomhedsøkonomien, almennytten og borgerøkonomien som en vigtig del af beslutningsgrundlaget. De har valgt at stille arbejdet med den samfundsøkonomiske analyse, som er gennemført indtil nu, til rådighed for Skrift 31, så andre forsyninger og kommuner kan blive inspireret og eventuelt arbejde videre med denne metode.

Metode

For at gennemføre en cost-benefit analyse er det nødvendigt at etablere et grundlag, som afspejler på den ene side, hvilke omkostninger (oversvømmelseskader) Helsingør må forvente set ud fra en samfundsøkonomisk vinkel, og på den anden side, hvad det vil koste at reducere disse omkostninger.

I forbindelse med klimatilpasningsplanlægningen af Helsingør er der udarbejdet et risikokort, som viser de skadesomkostninger på bygninger, som må forventes i Helsingør Kommune i gennemsnit hvert år i fremtiden, når klimaændringerne slår igennem. Dette grundlag er anvendt til beregning af den årlige skadesomkostning (EAD).



Figur 14: Risikoen fordelt i Helsingør Kommune. De grønne områder har relativ lille risiko og de røde relativ høj risiko. Risikoen er fordelt på afstrømningsoplande.

Efterfølgende er der gennemført en overordnet hydraulisk beregning af hvilke kloakledninger, der skal øges, hvilke bassiner, der skal etableres eller udvides, samt hvilke pumper, der skal øges eller etableres, for at opnå et serviceniveau svarende mindst til niveauet i henhold til rekommandationen i Skrift 27. Baseret på den hydrauliske beregning er omkostningerne ved at implementere de nødvendige løsninger opgjort og indregnet i cost-benefit analysen.

Cost-benefit analyse for hele kommunen

Spildevandskomiteen anbefaler i Skrift 27, at regnvandssystemer i Danmark maksimalt stuver op til terræn gennemsnitligt én gang hvert 5. år og i fællessystemer én gang hvert 10. år. Det serviceniveau, som vælges, skal være økonomisk optimalt. Det er derfor nærliggende at gennemføre en cost-benefit analyse for det anbefalede minimumsniveau (5 og 10 år) og for et skærpet niveau (her er valgt 10 år for regnvand og 20 år for fællesvand). Der er gennemført en cost-benefit analyse for det anbefalede niveau (5 og 10 år) for at undersøge, om klimatilpasningen til dette serviceniveau er rentabel, eller under hvilke forudsætninger den kan gøres rentabel (justering af løsninger så det kan betale sig økonomisk). Her er minimum for skadesværdier svarende til bygningskadeværdier på 1100 kr./m² valgt.

For hele kommunen er det undersøgt, hvad omkostningsniveauet for en tilpasning til forskellige niveauer vil være. Det er antaget, at virkemidlerne for tilpasningen er traditionelle løsninger, som formentlig er dyrere end alternative løsninger som f.eks. overfladeløsninger.

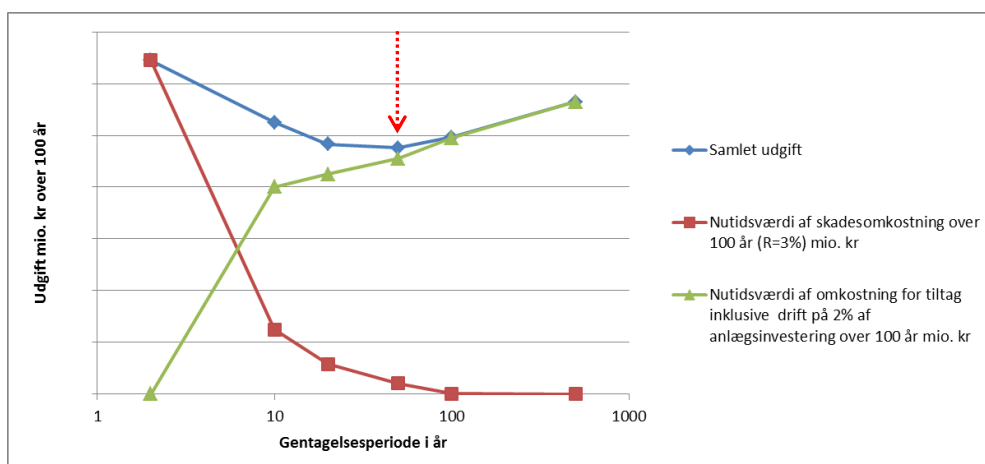
Idet der ikke kan forventes en investering af hele løsningen i hele kommunen på én gang, er det antaget, at man først tager de projekter, som har den bedste cost-benefit. Det betyder, at omfanget af skader aftager meget i starten af klimatilpasningsperioden, men mindre efterhånden som tilpasningen skrider frem. Dette mønster passer til en strategi med at ”plukke de lavt hængende frugter”, når man klimatilpasser som Forsyning Helsingør har beskrevet i Spildevandsstrategien 2015.

Analysen viser, at det ikke ud fra et samfundsøkonomisk synspunkt er fordelagtigt at klimatilpasse Helsingør som et samlet opland.

Det er således klart, at når der ses på hele kommunen som et, så kan det ikke betale sig at tilpasse til mere end minimumserviceniveauet for Skrift 27, dvs. til maksimalt $T=10$ for fællessystemet og $T=5$ år for regnvandssystemet, når der tilpasses med traditionelle løsninger. Derimod forventes det, at det vil kunne betale sig at klimatilpasse nogle oplande, som er særligt sårbare, eller hvor det er billigere at reducere oversvømmelserne.

Baseret på den indledende cost-benefit analyse forventes det, at Helsingør Centrum med sin store kulturværdi samt store oversvømmelsesrisiko i den tætte by, har et stort potentiale for at kunne tilpasses til en for kommunen relativt høj gentagelsesperiode, idet der kan gennemføres relativt lette tiltag ved afkobling af vejvendte tagflader til åbne render på overfladen med direkte udløb til havet.

Helsingør Kommune skal renovere belæggningerne i Helsingør Centrum, og i den forbindelse har kommunen og Forsyningen gennemført en detaljeret cost-benefit analyse i Helsingør Centrum for såvel klimatilpasning af afløbssystemet som skybrudssikring af byen, og det har vist sig, at der er en samfundsøkonomisk gevinst ved at klimatilpasse til en 10 års hændelse ved afkobling af regnvand til et regnvandssystem. Analysen viser også, at det kan betale sig at skybrudssikre, og at det optimale skybrudsserviceniveau er på 50 år. På figur 2 er optimeringen af skybrudsserviceniveauet vist.



Figur 2 Nutidsværdi af udgifter som funktion af sikringsniveauet. Den røde pil indikerer det mest optimale tilpasningsniveau.

Bilag B Beregning af *EAD* og optimering under særlige antagelser

B.1 Beregning af *EAD* ved antagelse af log-lineær model mellem skadesomkostning og gentagelsesperiode

Den log-lineære sammenhæng mellem skadesomkostning (D) og gentagelsesperiode (T) beskrives som

$$D(T) = a \ln(T) + b \quad \text{hvor} \quad \ln(T) = \frac{\log_{10} T}{\log_{10} e} \quad \text{og} \quad e = 2.78128\dots$$

hvor a og b er koefficienter i den log-lineære sammenhæng. T_0 er defineret som skæringen med absicisseaksen, dvs. $D(T_0) = 0$. Det antages først, at $T_0 > 1$ år angiver nedre grænse for gentagelsesperioder, der medfører skader. Ved integration fås (Olsen et al., 2015; Rosbjerg, 2017):

$$EAD = \int_{T_0}^{\infty} \frac{D(T)}{T^2} dT = a \exp\left(\frac{b}{a}\right) = \frac{a}{T_0} \quad \text{hvor} \quad T_0 = \exp\left(-\frac{b}{a}\right)$$

For $T_0 < 1$ år fås $EAD = a+b$, da nedre integrationsgrænse ikke kan blive mindre end 1 år.

Er $D(T)=0$ for $T_0 < T < T_s$, dvs. at der først opstår skader ved gentagelsesperioder større end $T_s > T_0$, fås

$$EAD = \frac{a}{T_s} \left(1 + \ln\left(\frac{T_s}{T_0}\right) \right)$$

Eksempel

Sammenhængen mellem gentagelsesperiode og skadeomkostning er givet som vist i tabel B.1 og figur B.1. Koefficienterne bestemmes umiddelbart til $a = 13,3$ mio. kr. og $b = -17,3$ mio. kr. Idet $T_0 = \exp(-b/a) = 3,67$ år og dermed større end 1 år, kan EAD bestemmes til $a/T_0 = 3,6$ mio. kr.

Tabel B.1 Eksempel på beregnet skadeomkostning $D(T)$ for gentagelsesperiode T og tilsvarende $\ln(T)$.

T (år)	$\ln(T)$	$D(T)$ (mio. kr.)
2,54	0,93	2
3,53	1,26	5
5,52	0,71	7
7,51	2,02	8
10,5	2,35	10
20	3	21
50	3,91	28
60	4,09	34
75	4,32	36
100	4,61	39
125	4,83	45
150	5,01	47
200	5,3	55
250	5,52	57
500	6,21	70
1000	6,91	82

B.2 Optimering af gentagelsesperioder ved antagelse af log-lineær skadesfunktion

Som beskrevet i skriftet, er det plausibelt at antage en log-lineær relation mellem skadesomkostningerne og gentagelsesperioden:

$$D(T) = a \ln(T) + b \quad \ln(T) = \frac{\log(T)}{\log(e)} \quad e = 2,71828\dots$$

Når det yderligere antages, at stigningstakten i omkostningerne er uændret efter klimatilpasning, kan de forventede årlige omkostninger ved oversvømmelser efter tilpasning til niveauet T beregnes som

$$EAD(T) = \int_T^{\infty} \frac{D(\tau) - D(T)}{\tau^2} d\tau = \frac{a}{T}$$

De totale årlige anlægs- og driftsomkostninger, EAC , vil være stigende med et voksende niveau for klimatilpasning. Hvis en log-lineær sammenhæng også her kan antages, fås

$$EAC(T) = c \ln(T) + d$$

Den totale årlige omkostning, TAC , bliver derfor

$$TAC(T) = \frac{a}{T} + c \ln(T) + d$$

Det kan vises, at denne funktion har et minimum for

$$T_{opt} = \frac{a}{c}$$

En brugbar løsning kræver $c < a$. Hvis den tidlige stigningstakt i oversvømmelsesomkostningerne efter en klimatilpasning ændres fra a til en anden værdi a_1 , men i øvrigt er uafhængig af tilpasningsniveauet, kan a blot udskiftes med a_1 i ovenstående udtryk.

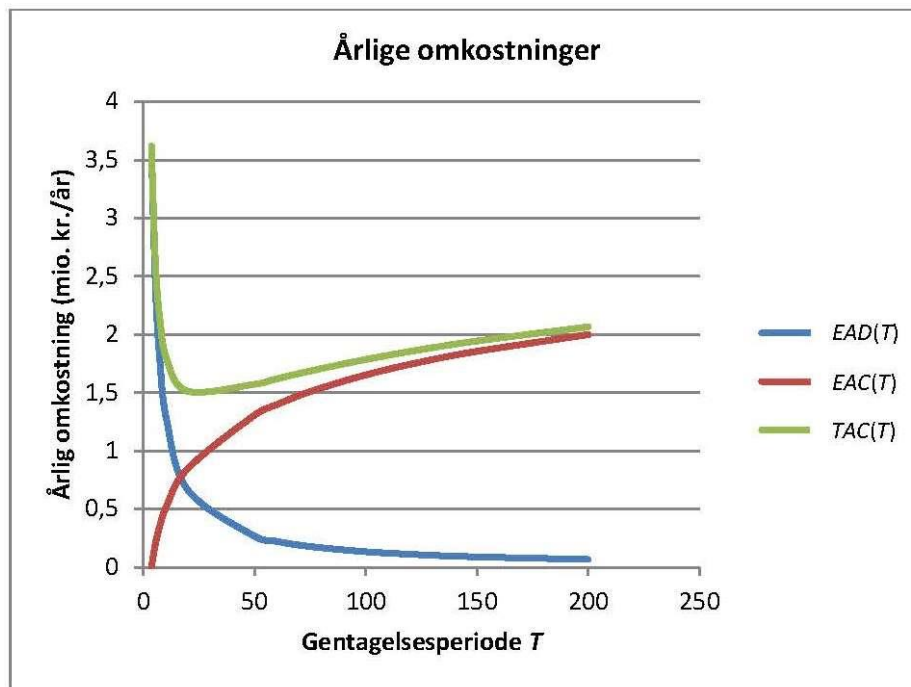
Eksempel

Med $a = 13,3$ mio. kr. og $c = 0,5$ mio. kr./år fås umiddelbart $T_0 = 3,67$ år, $T_{opt} = 26,6$ år og $TAC(T_{opt}) = 1,49$ mio. kr./år. En illustration heraf er givet i tabel B.2 og figur B.1.

Figur B.1 illustrerer, at det er betydeligt mere omkostningstungt at underdimensionere klimatilpasningstiltag end at overdimensionere. Hvis $D(T)$ og/eller $EAC(T)$ kan beskrives ved alternative funktioner til den log-lineære, kan en simpel analytisk løsning ikke nødvendigvis findes. I sådanne tilfælde kan et minimum bestemmes grafisk eller numerisk.

Tabel B.2 Gentagelsesperiode for klimatilpasning T , $\ln(T)$ samt tilhørende årlige skadesomkostninger $EAD(T)$, årlige anlægs- og driftsomkostninger $EAC(T)$ og årlige totale omkostninger $TAC(T)$.

T (år)	$EAD(T)$ (mio. kr. /år)	$EAC(T)$ (mio. kr. /år)	$TAC(T)$ (mio. kr. /år)
3,23	4,00	0,00	4,00
5	2,56	0,22	2,78
7	1,82	0,39	2,22
10	1,28	0,57	1,85
20	0,64	0,92	1,55
50	0,26	1,37	1,63
60	0,21	1,46	1,67
75	0,17	1,57	1,74
100	0,13	1,72	1,84
125	0,10	1,83	1,93
150	0,09	1,92	2,00
200	0,06	2,06	2,13
250	0,05	2,17	2,23
500	0,03	2,52	2,55
1000	0,01	2,87	2,88



Figur B.1 Årlige skadesomkostninger $EAD(T)$, årlige anlægs- og driftsomkostninger $EAC(T)$ og årlige totale omkostninger $TAC(T)$ som funktion af gentagelsesperiode for klimatilpasning T . Figur fra Rosbjerg (2017).

Rosbjerg (2017) undersøger også betydningen af at inddrage en klimafaktor i ovenstående beregninger. Undersøgelserne viser, at generelt medfører det, at den optimale gentagelsesperiode øges, og at prisen for at underdimensionere ligeledes stiger markant. Endelig viser beregningerne, at en udskydelse af investeringerne ikke kan betale sig, da dette vil medføre en væsentligt højere optimal nutidsværdi.