

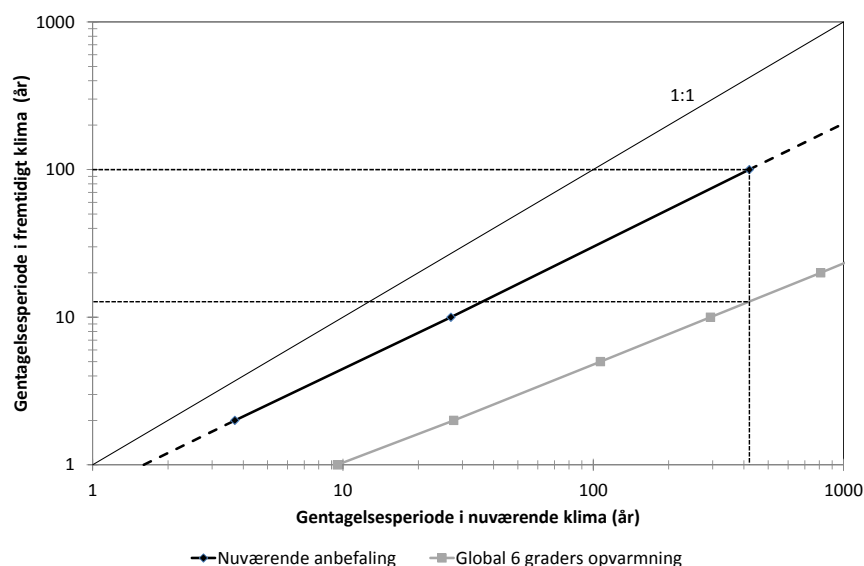
Virker klimatilpasning i en meget varmere verden?

Siden oversvømmelsen i 2011 har København arbejdet ambitiøst, hårdt og målrettet mod at gøre byen mere robust overfor især stigende ekstremregn. Udgangspunktet er de kendte anbefalinger om klimaændringer. Men hvad nu hvis klimaændringerne bliver meget voldsommere end vi har troet hidtil? Artiklen skønner de ændringer i ekstremregn og oversvømmelsesrisiko vi kan forvente i en seks grader varmere verden.

KARSTEN ARNBJERG-NIELSEN, LYKKE
LEONARDBSEN & HENRIK MADSEN

Mange danske byer er blevet ramt af oversvømmelser de seneste 10-15 år, men alligevel står hændelsen den 2. juli 2011 klart i erindringen. Regnhændelsen målt i mængde og intensitet var blandt de største målte hændelser, men nok så væsentligt faldt nedbøren præcis over det område der opsamler og leder vandet ind i det centrale København. Derfor var skaderne meget omfattende.

I lyset af hændelsen i juli 2011 påbegyndte Københavns Kommune at udarbejde en plan til at modstå og reducere konsekvenserne af fremtidige ekstremregn, hvilket resulterede i Skybrudsplanen /1/. En meget klar konklusion i forbindelse med Skybrudsplanen var, at hvis man tillod et mere fleksibelt mix af afstrømning i afløbssystemet og på byens overflader kunne man give en langt større beskyttelse mod skader fra ekstremregn end i dag – klimaændringer eller ej. Der er mange antagelser og forbehold omkring undersøgelsen og dens resultater, men beregningerne viste, at det optimale forhold mellem investeringer og resterende risiko for skader lå på et niveau svarende til kun 10% af de skadesomkostninger, som man har i København i dag. Besparelsen opstår både fordi der vil ske skader mere sjældent, fordi der vil være færre skader når det regner meget voldsomt og fordi de mest sårbare huse sikres særskilt.



Figur 1. Sammenhæng mellem gentagelsesperioder nu og i fremtidens klima under dels det nuværende bedste bud på klimaændringer og dels som beregnet i en 6 grader varmere verden. I figuren er markeret hvad Skybrudsplanens krav på 10 cm vand på bygninger med en gentagelsesperiode på 100 år i fremtidens klima svarer til i nuværende klima og i det fremtidige 6 graders klima.

Status for klimatilpasningsplaner for København

Københavns Skybrudsplan har stor betydning for alle byens centrale funktioner og er rettet mod mange niveauer. Sammenspil med borgerne og den øvrige planlægning af f.eks. trafik er af afgørende betydning samtidigt med at der er opstillet meget præcise funktionskrav for hvad en robust by er. De væsentligste elementer er følgende:

- En stor del af de nuværende skader i

København skyldes oversvømmelser af kældre forårsaget af, at vandet løber fra den offentlige kloak ind i private ejendomme. Dette skal forhindres og det er lodsejernes eget ansvar at sikre deres ejendom.

- Alle bygninger mv. skal sikres, så de kan "tåle" kortvarig eksponering af vand på op til 10 cm målt fra vejbanens overflade. Det vil også være den enkelte lodsejers ansvar.
- Der er opstillet et generelt krav for, hvor ofte bygninger mv. må blive eksponeret for

mere end 10 cm vand. Kravet svarer til det bedste bud på hvad en 100 års hændelse er i år 2110. Det er en klar skærpelse i forhold til de nuværende krav. Der vil blive udpeget særlige "skybrudsveje" hvor kravet ikke vil være opfyldt. Håndteringen af risikoen for disse veje sker efter en konkret vurdering.

Ud fra disse krav er byens områder opdelt i zoner, hvor der ikke skal ske indgreb, zoner, hvor vandet skal holdes tilbage, samt zoner, hvor vandet kan ledes væk mere effektivt end i dag. Nogle steder planlægges meget store tunneler til regnvand for at leve op til kravene og samtidigt bevare eksisterende byrum. Der er f.eks. planlagt en stor tunnel på Vesterbro. Hvis denne tunnel skulle undgås skulle man i stedet bruge et område mindst svarende til hele Kødbyen til opbevaring af vand i ekstrem-situationer – ud over den anvendelse af Sct. Jørgens Sø, der allerede indgår i planlægningen.

Ekstremregn i en 6 grader varmere verden

Det er vanskeligt at forestille sig, hvordan klimaet vil se ud, såfremt klodens temperatur stiger med i gennemsnit 6 grader, endsige hvordan kloden vil reagere. Det er en mere voldsom stigning end hvad FN's Klimapanel inddrager i deres scenarier for forventet udvikling frem til år 2100. De klimamodeller vi anvender til at beregne forventede klimamændringer er allerede presset under de "normale" projektioner af klimaet. Så at bruge modellerne til at forudsige så voldsomme ændringer er meget usikkert. Vi har prøvet at forudsige ændringerne på to måder; dels ved at finde områder i Europa hvor nedbør- og temperaturforhold i dag svarer til det vi forudsiger for Danmark i et fremtidigt klima, og

Tabel 1. Klimafaktorer der er anvendt under udarbejdelse af Skybrudsplanen samt for scenariet svarende til en 6 grader varmere verden.

	Gentagelsesperiode 10 år	Gentagelsesperiode 100 år
Anbefalet klimafaktor for klimatilpasning jf. /3/	1,3	1,4
Klimafaktor for scenarium med global opvarmning på 6 grader	2,2	2,7

dels ved at lave statistik på den ekstremnedbør som klimamodellerne simulerer.

Den første metode fejler. Under moderate klimaændringer har vi ret sikre indikationer på, at Danmark vil minde en del om Nordfrankrigs kystområder, f.eks. Caen. Det er ikke muligt at finde tilsvarende områder, hvor både temperatur og nedbør passer på fremtidens Danmark i en 6 grader varmere verden. Temperaturen passer på områder, der i dag ligger i Sydeuropa, de gennemsnitlige nedbørforhold ændres ikke så meget i forhold til de moderate scenarier, mens de ekstreme nedbørhændelser er meget usikre og passer tilsyneladende bedst på områder omkring Ukraine og Hviderusland (!). Så denne metode må vi forkaste.

Ud fra en statistisk bearbejdning af de ekstreme regnhændelser som klimamodeller simulerer kan vi beregne klimafaktorer, som angiver hvor meget intensiteten af ekstremregn ændrer sig i et fremtidigt klima (f.eks. svarer en klimafaktor på 1,3 til en 30 % stigning i intensiteten). Metoden er beskrevet i /2/. Der er tale om meget væsentlige ændringer, og meget kraftigere end dem vi normalt anvender til klimatilpasning, se tabel 1. Konsekvensen i form af ændrede gentagelsesperioder for ekstremregn ses i figur 1. Det fremgår, at kravet om 10 cm vand på almindelige bygninger i et sådant scenarie svarer til noget der sker med en gentagelsesperiode på ca. 12

år. En hændelse svarende til den 2. juli 2011 vil med en sådan ændring optræde med en gentagelsesperiode på 30-40 år.

Beregning af omkostninger med og uden klimatilpasning

Udgangspunktet for beregning af effekten af klimatilpasning er en økonomisk analyse af fordele og ulemper. Ulemperne er ret nemme at fastlægge; det er primært omkostningen til at bygge og vedligeholde de anlæg, der skal ændre vandets vej igennem byen fra den nuværende tilstand til den klimatilpassede tilstand. Fordelene er noget sværere at fastlægge. Som minimum indgår de sparede omkostninger til at reparere bygninger og udskifte ødelagte møbler og varer, men også f.eks. afbrydelser af trafik, tab af salgsværdi (og dermed skatteindtægter) og bekymring for gentagelser kan indgå. Desuden kan der være positive gevinster (og ulemper) fra andre sektorer, der også bør indgå i analysen. Tabel 2 viser de bedste skøn for gevinsterne fra undgåede konkrete skader. Tallene er beregnet ud fra den metode, der er beskrevet i Boks 1. Som det fremgår af tabellen er gevinsten ved Skybrudsplanens tiltag endog meget store i 6 graders scenariet; uden tiltag stiger omkostningerne til skader til næsten 8 gange det nuværende niveau, mens tiltagene kan holde omkostningerne på et niveau, der ikke er voldsomt større end i dag. Det betyder, at effektiviteten af implementere Skybrudsplanen øges, så hver krone investeret giver tre gange så meget afkast som forudsat i Skybrudsplanen.

Kritiske antagelser

Der er en række antagelser som er væsentlige i beregningerne i tabel 2. Den første og væsentligste er selve metoden til beregning af skader som følge af ekstremregn i et 6 grader varmere klima uden klimatilpasningstiltag. Der vil ske en væsentlig klimatilpasning i et sådant scenarie, uanset om kommune og forsyning ønsker det eller ej. De mest sårbare huse kan næppe nå at blive udtørrede mellem oversvømmelserne og vil dermed blive usælgelige eller beskyttet lokalt, transformatorstationer vil blive flyttet, osv. Så det scenarie har en indbygget konflikt i forhold til vores

Tabel 2. Beregnede udgifter til skader fra ekstremregn og stormfloder for København med og uden klimatilpasning under to fremskrivninger, bedste bud og 6 grader varmere. Nuværende omkostning til ekstremregn er sat til indeks 100.

	Omkostningsindeks
Ekstremregn, uden klimatilpasning	
Nuværende klima	100
2100, bedste bud	170
2100, 6 grader varmere	770
Ekstremregn, Skybrudsplanen fuldt implementeret	
Nuværende klima	10
2100, bedste bud	20- 30
2100, 6 grader varmere	120 – 210
Stormfloder og havstigning, uden klimatilpasning	
Nuværende klima	0
2100, bedste bud og 6 grader varmere	660

Boks 1: Beregning af økonomisk risiko for oversvømmelse

Beregningen af den økonomiske risiko er besværlig, fordi den varierer meget fra år til år. I mange år vil skaden være meget lille og i de værste år vil skaderne være meget omfattende. For at kunne lave en vurdering af omkostninger ved oversvømmelser benyttes derfor den gennemsnitlige omkostning per år. Denne omkostning kan for et givent klima beregnes ud fra historiske opgørelser af forsikringsoplysninger og andre data, mens man for fremtidens klima må benytte beregninger. Disse beregninger foretages ved at lave simuleringer af effekten af ekstremregn fra ret små hændelser til hændelser der er omtrent så store som den, der blev målt 2. juli 2011. For hver af disse hændelser udregnes så deres bidrag til den samlede risiko ved groft sagt at gange sandsynligheden for hver hændelse med den tilsvarende beregnede omkostning af oversvømmelserne. Summen af bidragene angiver så den samlede økonomiske risiko. Metoden gennemgås detaljeret i /4/.

beregninger.

Scenariet med de seks grader indeholder også en væsentlig ændring i, hvornår på året hændelser forekommer. Det overvejes pt. hvorvidt og hvordan København kan sikres mod stormfloder, der forventes at blive en anden meget væsentlig omkostning ved klimaændringerne (se tabel 2). I dag optræder stormfloder og ekstremregn på hver sin årstid, stormfloder om vinteren og ekstremregn om sommeren og efteråret, og der er derfor en meget lille risiko for at de vil optræde på samme tid. Det ser ud til at dette forhold vil ændre sig i 6 graders scenariet. Det er en stor udfordring, fordi f.eks. dæmninger kun virker, såfremt der kun er vand på den ene side af dæmningen. En hændelse med kombineret stormflod og ekstremregn vil være meget vanskelig at beskytte København imod.

Den sidste meget kritiske antagelse i analysen er, at Skybrudsplanen faktisk vil blive gennemført som planlagt. Det vil tage 20-40 år og kræve alvorlige ændringer af hele byen. Hvad nu hvis der kommer en periode, hvor der ikke er mange kraftige regnskyl, ligesom vi havde i 1970'erne? Så vil det ikke være let at holde fast i den overordnede plan.

Konklusion

Københavns Skybrudsplan er en ambitiøs plan, der har indflydelse på arealanvendelsen i store dele af byen. Den vil sikre borgerne

rigtig godt imod de klimaforandringer vi pt. anser som de mest realistiske. Hvis planen bliver gennemført vil byen også være godt rustet til at stå imod betydelige klimaændringer.

Litteratur

- /1/ Københavns Kommune, 2012. Københavns Kommunes Skybrudsplan 2012. Downloaded 1. august 2014 fra <https://subsite.kk.dk/~media/DFAAFC8B6004494F8E3D6DDDF91E6AA1.ashx>
- /2/ Sunyer MA, Gregersen IB, Madsen H, Luchner J, Rosbjerg D, Arnbjerg-Nielsen K, 2014. Comparison of different statistical downscaling methods to estimate changes in hourly extreme precipitation using RCM projections from ENSEMBLES. International Journal of Climatology. Early online. DOI: 10.1002/joc.4138
- /3/ Arnbjerg-Nielsen K, 2008. Forventede ændringer i ekstremregn som følge af klimaændringer. Skrift 29. Spildevandskomiteen, Ingeniørforeningen I København. http://ida.dk/sites/prod.ida.dk/files/SVK_Skrift29_final.pdf
- /4/ Olsen AS, Zhou Q, Linde JJ, Arnbjerg-Nielsen K, 2013. Assessing damage cost estimation of urban pluvial flood risk as a mean of improving climate adaptation investments. International Conference on Flood Resilience (ICFR), Exeter, 05-07 September 2013.

KARSTEN ARNBJERG-NIELSEN (karn@env.dtu.dk) er professor på DTU Miljø, LYKKE LEONARSEN er enhedschef for klima i Københavns Kommune, HENRIK MADSEN er Innovationschef hos DHI.

Risikovurdering for oversvømmelser i byer – klimadata, økonomi og usikkerheder

Risikovurderinger for oversvømmelse ved ekstrem nedbør er meget usikre. Usikkerhederne stammer fra klimadata, oversvømmelsesmodeller, og fra data om samfundsmæssige aktiviteter og mulige skader. Vi præsenterer et dansk model- og datasystem og diskuterer gennem en analyse for Odense, hvordan usikkerheder omkring klima og økonomi kan mindskes. Dette kan give beslutningstagere et bedre overblik over vidensgrundlaget for klimatilpasning.

KIRSTEN HALSNÆS &
PER SKOUGAARD KASPERSEN

Introduktion

Klimaændringer kan indebære, at ekstrem nedbør bliver mere hyppig /1/, og dermed giver en forøget risiko for oversvømmelser, hvilket vi også i de senere år har set eksempler på som f.eks. oversvømmelsen i København i juli 2011 og i august 2014.

En samfundsmæssig vurdering af skader ved oversvømmelserne, og af hvor det kan betale sig at sætte ind med klimatilpasning, er kompliceret at gennemføre, da en lang række modeller og ekspertise her skal spille sammen. Det gælder om at sammenkæde geografisk detaljerede klimadata med hydrologiske modeller og skadesfunktioner for, hvad der kan blive ramt som f.eks. i et byområde. Vi har her udviklet DIAS modellen (Danish Integrated Assessment System), som er rammen for en meget omfattende database og sammenkædning af modeller dækkende lige fra klimamodeller, til geografiske informationssystemer (GIS) for samfundsmæssige aktiviteter, og til beregningsværktøjer for oversvømmelsesskader.

DIAS systemet er specielt udviklet til at understøtte analyser af klima risici indenfor en tidshorisont på 10 til 50 år. Målet er at understøtte beslutningstagning om klimatilpasning, og interessenterne kan både være planlægningsmyndigheder, forsikringselskaber, byg-

herrer, borgere og andre aktører i et givent geografisk område.

Risiko

Risiko betyder i vores definition, at vi ser på konsekvenserne af en hændelse, som f.eks. oversvømmelse, og vurderer konsekvenserne koblet til sandsynligheden for hændelsen. Hvis det f.eks. gælder oversvømmelse, som i vores analyse for Odense, så ser vi på, hvad det samlet set ville koste, hvis bydele blev oversvømmet, og vi multiplicerer så omkostningen med sandsynligheden for oversvømmelsen. Sandsynligheden baseres på klimadata, hvor fremtidige nedbørshændelser med forskellige intensiteter er fremskrevet. Vi anvender et samfundøkonomisk perspektiv, og der er derfor tale om en samlet opgørelse af konsekvenser for bygninger, veje, jernbaner, sundhed, erhvervsliv, natur og særlige historiske værdier.

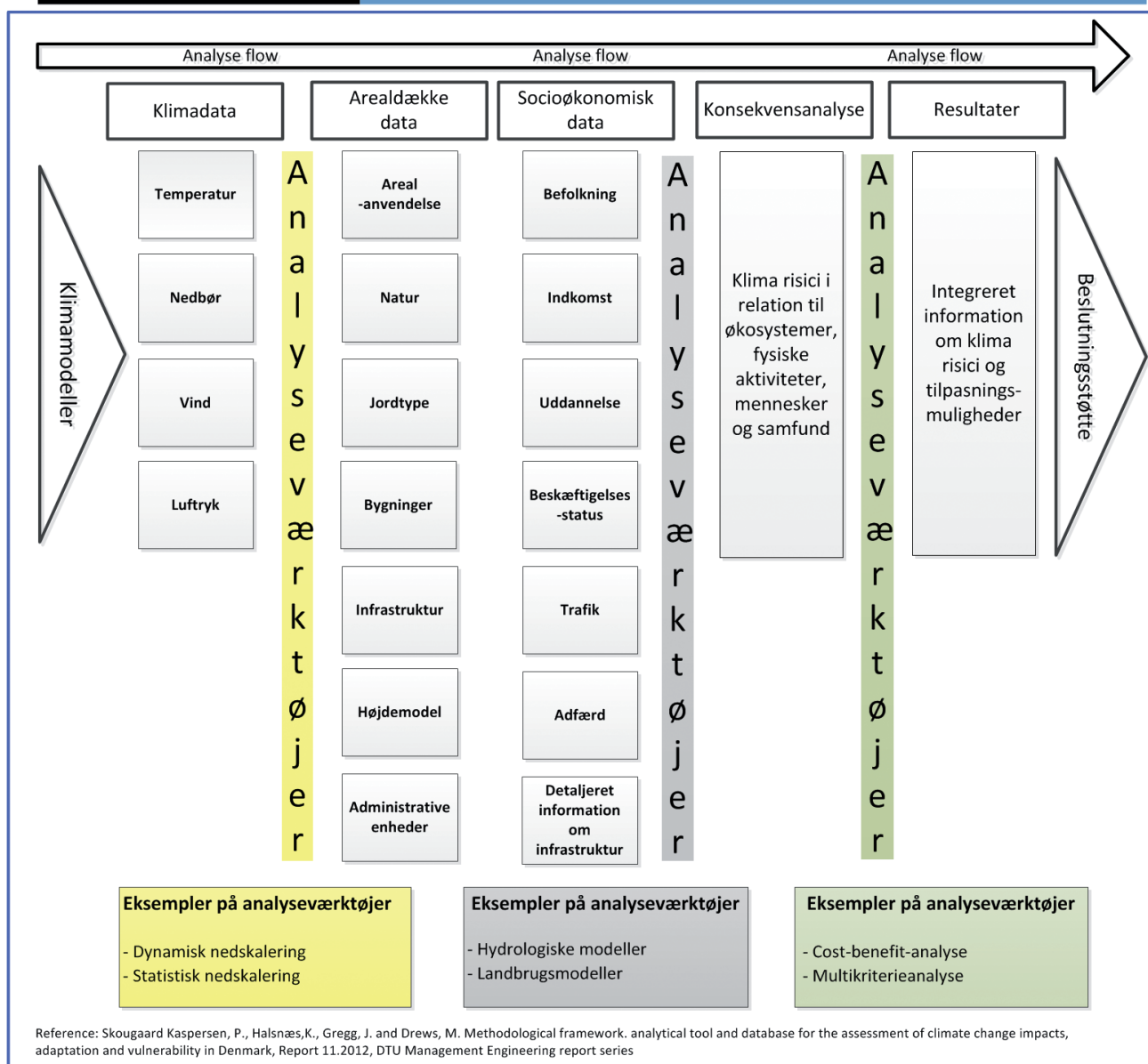
Ideen bag DIAS systemet

Selve udviklingen af DIAS systemet er udsprunget af et tæt forskningssamarbejde mellem DTU, DMI, GEUS, Aarhus Universitet og Københavns Universitet mellem eksperter i klima påvirkninger og økonomi, som blandt andet har fundet sted i Centre for Regional Change in the Earth System (CRES). Det har her været klart, at analyser af klima påvirkninger kræver et tæt og struktureret samarbejde mellem modelgrupper og eksperter med forskellig faglig baggrund og med adgang til omfattende arealbaserede data /2/.

DIAS systemet har på det nuværende udviklingstrin data om fremtidigt klima i Danmark, arealdata for anvendelseskategorier, grundvand, jordbundstyper, økosystemer, kritisk infrastruktur, befolkning, indkomst, bygninger, historiske mindesmærker, trafik, industri, og offentlige institutioner som skoler, børnehaver og hospitaler. Data ligger i GIS format for Danmark. Analyserne vil udover databasen skulle understøttes af f.eks. hydrologiske modeller, landbrugs- og energi modeller, kystmodeller, grundvandsmodeller, og økonomiske analyseværktøjer (Figur 1).

Risikoanalyser for klimapåvirkninger anvender som sagt forskellige modeller, og første del af analyserne sammenkæder klimamodeller og arealdata. Når det drejer sig om vurdering af konsekvenserne af oversvømmelser sammenknyttes klimadata og hydrologiske beregninger med samfundøkonomiske data. Det er så muligt at få et arealmæssigt overblik over mulige konsekvenser af ekstremnedbør, og et eksempel på et sådan kort for Odense er vist i Figur 2. Kortet er her blandt andet baseret på oversvømmelsesberegninger udført af VandCenterSyd som led i Odense kommunes klimatilpasningsplan /3/.

Figur 2 viser med blå farve beregnede oversvømmelser i Odense by ved en ekstrem nedbørshændelse svarende til 40 mm pr. time og sammenkobling med et arealanvendelseskort for det samme område danner basis for at vurdere omkostningerne ved ekstrem regn. Arealanvendelseskortet bygger på generelle arealdata i et system udviklet af Aarhus Universitet



Figur 1: Oversigt over hovedelementer i DIAS systemet

dækkende hele Danmark /4/.

Oversvømmede arealer i Odense omfatter veje, bygninger, infrastruktur og andre anlæg, hvor det i princippet er muligt at udbedre skader ved efterfølgende reparation, såvel som mere unikke værdier som museer, historiske mindesmærker, og økosystemer. Figur 4 viser et kort over Odense centrum, hvor en række særlige værdier som H.C. Andersens hus, historiske kirker, fortidsminder, museer og plejeboliger kan være oversvømmelses-truede.

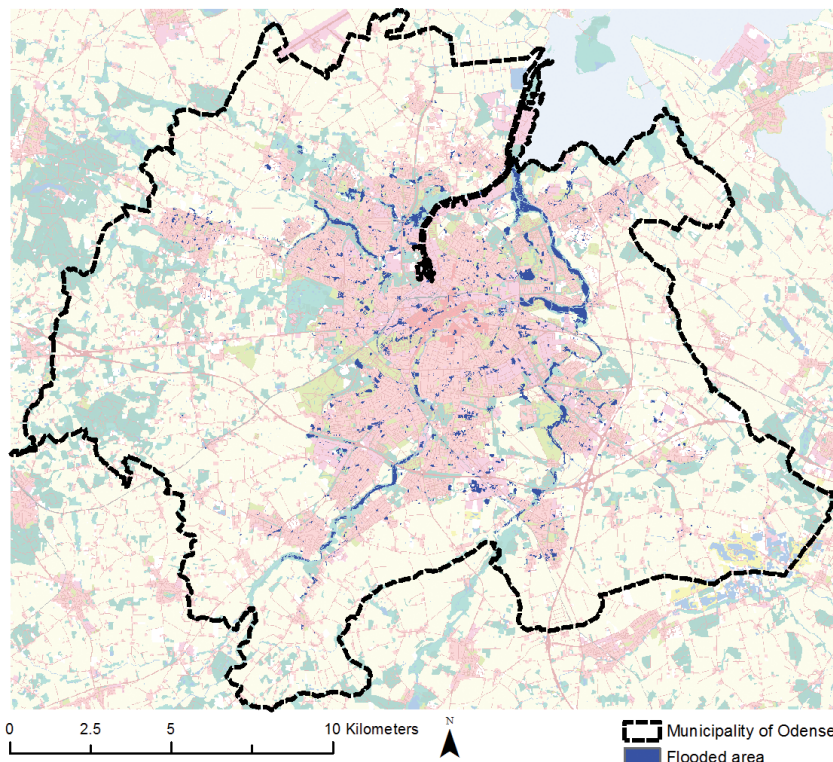
Omfanget af oversvømmelser vil naturligvis afhænge af nedbørsintensiteten, som igen afhænger af, omfanget af fremtidige klimaændringer. I forbindelse med CPRES projektets arbejde med fremtidige klimaændringer er der udarbejdet en oversigt over hyppigheden

af intensive nedbørshændelser baseret på en klimamodelberegning (Tabel 1). Her stiger hyppigheden af hændelser med store nedbørsmængder når klimaet ændrer sig fra det

nuværende og især ved store temperaturstigninger. Det betyder f.eks., at 30 mm nedbør pr. time, som kan give anledning til mærkbare oversvømmelser i en by som Odense, for-

Tabel 1: Maksimal intensitet pr. time pr. dag og antal nedbørshændelser pr. 100 år for nuværende klima og fremtidigt klima svarende til globale gennemsnitlige temperaturændringer på henholdsvis 2-, 4- og 6 graders celsius

Nedbørsintensitet		Antal hændelser pr. 100 år			
Maksimal (mm/time)	Total (mm/dag)	Nuværende klima	+ 2 °C	+ 4 °C	+ 6 °C
20	49	20	40	71	143
25	59	10	22	44	95
30	68	5	12	28	60
35	82	2	6	17	33
40	95	1	3	10	21



Figur 2: Oversvømmede arealer i forbindelse med et skybrud med en maksimal intensitet på 40 mm/time og en total mængde nedbør på 95 mm (Odense Kommune, 2014).

ventes at kunne ske i gennemsnit hvert tredje år over et hundredeårigt tidsforløb, hvis vi er i et forløb med globale temperaturstigninger på 4 grader eller derover.

Aktiviteterne og værdierne, som forventes at kunne blive berørt af intensiv nedbør i Odense er illustreret i Figur 5 og Figur 6. Det fremgår, at over 1500 bygninger kan blive oversvømmet i Odense ved 30 mm nedbør pr. time, og en øget intensitet på op til 40 mm pr. time vil udsætte over 2300 bygninger for oversvømmelse. Samtidig vil et stort antal bevaringsværdige bygninger og også museer, kirker og andre mindesmærker være udsatte.

Omkostninger ved oversvømmelser

Omkostninger ved oversvømmelser kan beregnes ved at sætte tal på økonomiske tab for de fysiske påvirkninger, se arealanvendelseskort i Figur 3. Det er vanskeligt at fastsætte præcise værdier for økonomien, da vi i Danmark heldigvis endnu ikke har været berørt af så mange alvorlige oversvømmelser. Vi tager her udgangspunkt i de skadesomkostninger, som er indberettet til forsikringselskaberne i forbindelse med oversvømmelsen i København i 2011. En anden begrænsning i opgørelsen af omkostninger er, at visse påvirkninger i sagens natur er vanskelige at opgøre økonomisk. Hvad er f.eks. samfundets tab ved, at H.C. Andersens hus i Odense beskadiges eller ved, at et barn udsættes for alvorlig

infektion fra bakterier i kloakvand?

Der er flere forskellige metoder til at estimere omkostningerne i forbindelse med oversvømmelser fra skybrud i byområder. Metoderne omfatter konsekvensberegninger med udgangspunkt i modeloutput fra oversvømmelsesmodeller og anvendelse af forsikringsdata. Vi præsenterer her et eksempel på førstnævnte. Konsekvensanalyser baseret på modeloutput bygger på en kortlægning af risikoen for oversvømmelser i forbindelse

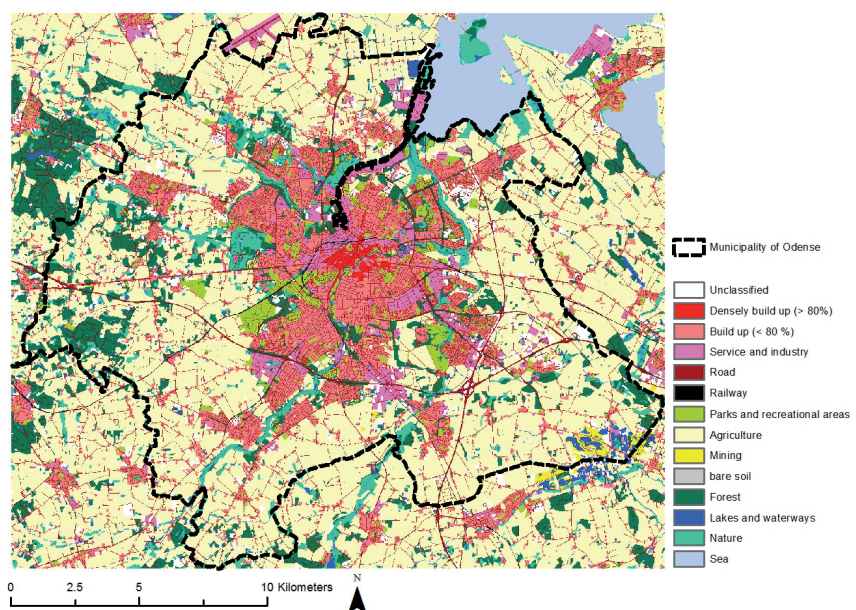
med nedbørshændelser med forskellige intensiteter (Figur 6, 7). I vores eksempel fra Odense har vi benyttet os af kommunens kortlægning, som er foretaget i forbindelse med tilblivelsen af deres klimatilpasningsplan fra 2014 /3/. Ved at kombinere oversvømmelseskortene med relevant information om arealanvendelse er det muligt at estimere potentielle omkostninger ved forskellige nedbørshændelser. Fra oversvømmelseskortene for Odense kender vi den maksimale vanddybde for alle områder i byen ved forskellige nedbørshændelser, og vi forudsætter at omkostningerne stiger lineært med den maksimale vanddybde (Tabel 2).

Forudsætningerne for udregning af skadesomkostningerne er baseret på forskellige kilder, og konsekvensen heraf er, at omkostningsberegningerne er behæftet med relativ stor usikkerhed. En kort oversigt over baggrunden for omkostningerne er givet i Box 1.

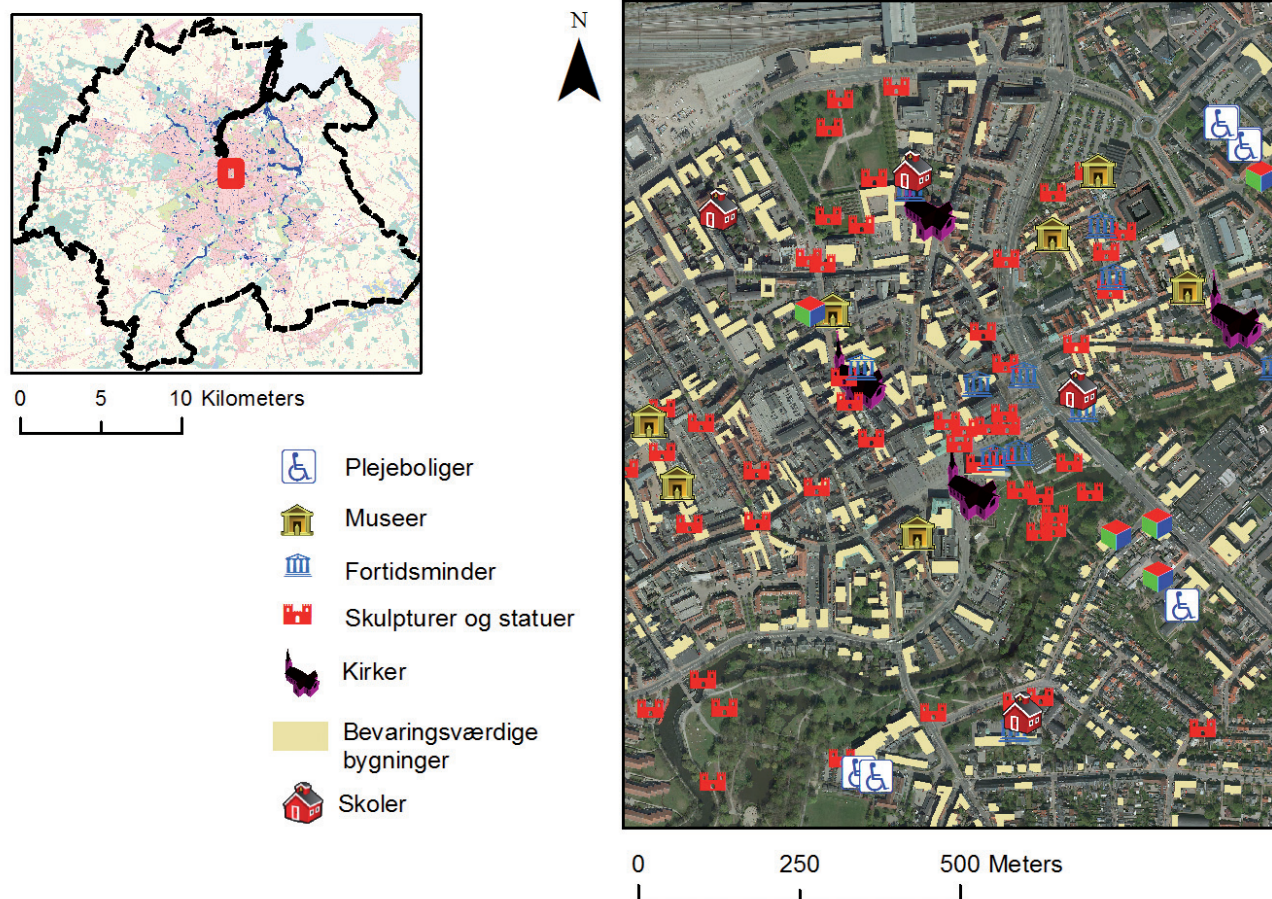
Som det fremgår af Figur 7 skønnes det, at omkostningerne ved intensiv nedbør i Odense vokser kraftigt ved overskridelse af nedbør 25 mm pr. time. Den største kategori af skader opstår for service og industribygninger, og dernæst følger skader på individuelle huse, veje og etageboliger. Selve værdisætningen af bevaringsværdige bygninger og andre mindesmærker er som sagt meget usikker, så sådanne skader kan vurderes som værende mindst lige så vigtige som andre områder.

Beslutningstagning og usikkerheder

Et vigtigt formål med beregninger af omkostninger ved klimapåvirkninger er at understøtte beslutningstagning, som f.eks. i forbindelse med kommunernes udarbejdelse af planer for klimatilpasning. Her drejer det



Figur 3: Arealanvendelse, Odense kommune (Levin et al., 2012)



Figur 4: Kort over særlige unikke historiske og kulturelle værdier i Odense Centrum

sig om at vurdere, hvilke skader, som er acceptable for borgerne, erhvervslivet og samfundet, og om hvad det kan betale sig at investere i at undgå skaderne.

Som tidligere omtalt er der en række usikkerheder forbundet med beregningerne, som er knyttet til alle de beregningstrin, som indledningsvis blev illustreret i Figur 1. De omfatter selve klimafremskrivningerne, nedskalering til et detaljeret geografisk niveau, fysiske beregninger af påvirkninger som f.eks. oversvømmelser, og også vurderingen af skadesomkostninger.

I forbindelse med beslutningstagning om investering i klimatilpasning kan det være værd at prøve at indsnævre, hvilke usikkerheder, som det er vigtigst at fokusere på ved en given beslutning. Disse usikkerheder er naturligvis afhængige af, hvilken specifik klimapåvirkning, der er i fokus. Mere konkret kan beregninger af konsekvenser af intensiv nedbør fokusere på usikkerheder, som har særlig betydning for klimatilpasningstiltag ved oversvømmelser i byer. Sådanne klimatilpasningstiltag kan omfatte:

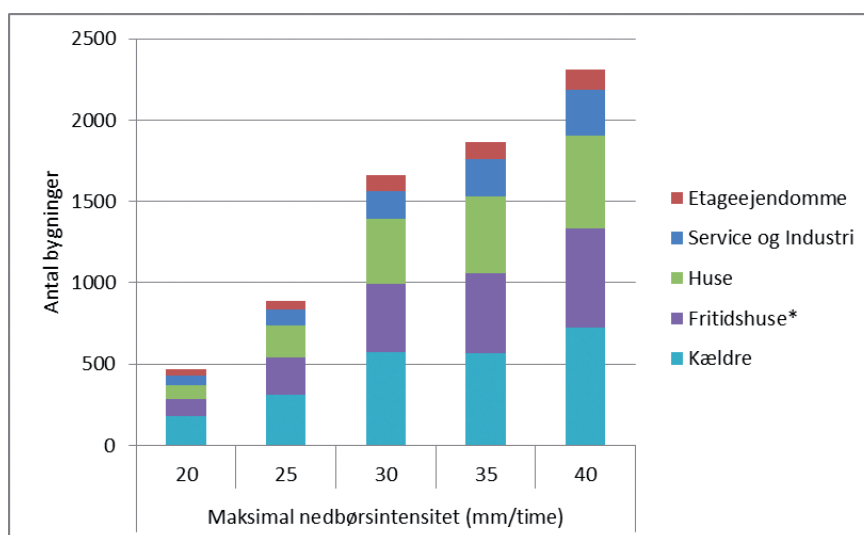
- Investeringer i kloakanlæg, som er omkostningstunge og har en lang levetid på op til 100 år.
- Investeringer i regnvandsbassiner, som er

relativt billige, og som måske kan kombineres med udvidelse af grønne områder.

- Specifikke beskyttelser af særligt bevaringsværdige områder med mindre omkostninger.
- Vandaflødningskanaler for områder som f.eks. veje af varierende økonomisk omfang.
- Beskyttelsesforanstaltninger i huse og andre

bygninger af mindre økonomisk omfang.

Særligt store og langsigtede investeringer som ved kloakanlæg er afhængige af en høj grad af pålidelighed i fremskrivninger af klimaet og lokal nedskalering af nedbør, og her vil en høj grad af usikkerhed kunne pege på, at det kunne være mere attraktivt at satse på



Figur 5: Antal bygninger som kan blive oversvømmet i Odense kommune ved skybrud med varierende nedbørsintensitet. * Fritidshuse dækker primært over garager, carporte, udhuse og drivhuse. En bygning er kategoriseret som værende oversvømmet ved 20 cm overfladevand mens der skal 5 cm til at oversvømme en kælder.

Box 1: Oversigt over anvendte metoder til omkostningsberegninger

Bygninger, kældre, veje og jernbaner

Omkostningerne ved oversvømmelser af veje, jernbaner og kældre er baseret på tal fra Odense kommunes klimatilpasningsplan /3/. Det er forudsat, at skader begynder ved overfladevand på 2,5 cm, skaden sættes her f.eks. for veje til 66 kr./m². Herefter stiger skadesomkostningen lineært indtil en maksimal omkostning nås ved 50 cm overfladevand (eks. veje: 1322 kr./m²). For bygninger forudsættes, at der sker en skade ved 10 cm overflade vand, og at det maksimale skadesniveau svarer til 70 cm overfladevand /5/ /6/ og /7/.

Helbred

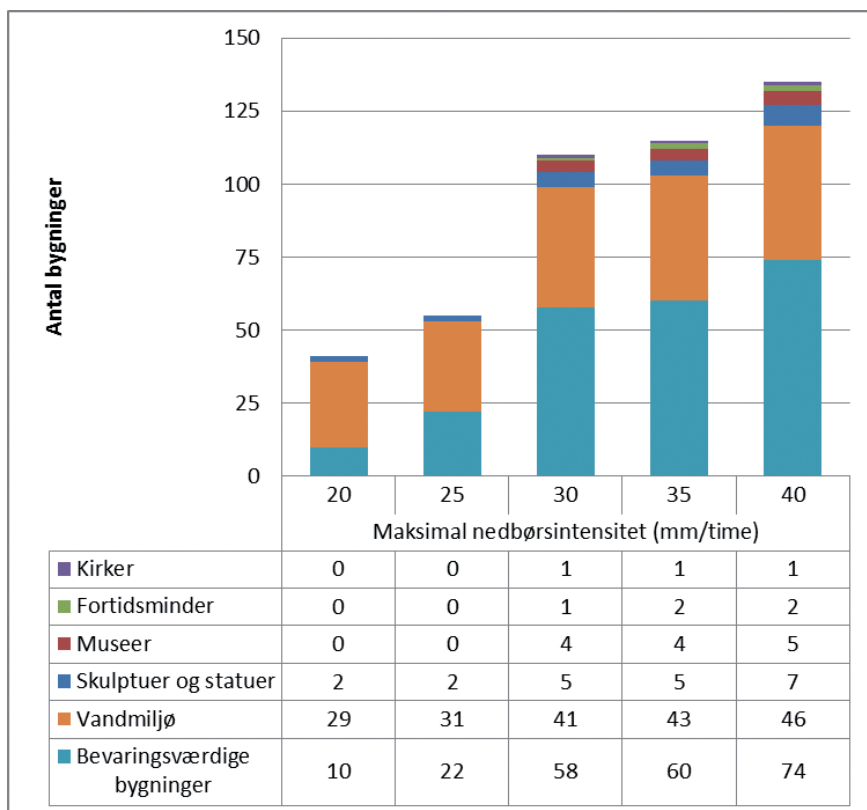
Helbredsomkostninger er baseret på antallet af personer, som er i kontakt med den blanding af regnvand og spildevand, som flyder op fra kloakkerne ved oversvømmelser. Vi er her gået ud fra antal oversvømmede kældre, og det antages, at gennemsnitlig 1,8 person er i kontakt med forurennet vand for hver oversvømmet kælder /5/. Vi forudsætter, at skader kan ske allerede ved en vanddybde på 15 mm, da kontakt med kun en meget lille dosis forurennet vand er nok til at forårsage helbredsproblemer. Helbredsomkostningerne stiger herefter lineært op indtil en maksimal skadeomkostning ved 50 mm.

Vandmiljø

Skadesomkostningen på vandmiljø er udregnet som antallet af vandløb og søer som bliver påvirket af spildevand i relation til de enkelte nedbørshændelser /5/.

Bevaringsværdige bygninger og andre mindesmærker

Som for bygninger gælder det at der skal 10 cm overfladevand til at påføre en skade på de uvurderlige aktiver. Enhedsomkostningen for uerstattelige aktiver er svær at vurdere da disse ikke umiddelbart kan erstattes eller genopbygges til deres oprindelige stand /3/. Herudover er der for disse aktiver en stor grad af subjektivitet forbundet med deres faktiske samfundsværdi. Der er for eksempel stor forskel på hvor meget forskellige individer værdsætter kirker, museer etc. Af denne grund er der meget stor usikkerhed forbundet med udregningen af skadesomkostningerne for denne kategori. De anvendte skadesomkostninger til denne analyse er baseret på /3/.



Figur 6: Antal bevaringsværdige bygninger, andre uerstattelige værdier og vandmiljøer som oversvømmes i Odense kommune ved skybrud med varierende nedbørsintensitet.

nogle af de andre tilpasningsmuligheder, som har en mindre omkostning her og nu, og som på en mere fleksibel måde kan skaleres op og videreudvikles over tid i tråd med, at den tilgængelige viden om klimaændringer forventes at vokse.

Modsat vil fremskrivninger af samfundsmæssige aktiviteter, som f.eks. en bys udvikling blive mere usikre over tid, hvilket kan pege på, at byens udviklingsmuligheder og struktur skal holdes åben, og det vil på samme måde som klimausikkerheden pege på, at store irreversible investeringer skal suppleres med andre tilpasningstiltag, som på en mere fleksibel måde kan skaleres op og ned over tid.

Referencer

- /1/ IPCC, 2014: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32.

Tabel 2: Skadesomkostninger ved forskellige oversvømmelsesniveauer: Skadesomkostninger ved forskellige oversvømmelsesniveauer

	Maksimal vanddybde							
Bygninger	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm	
Service og industri	520,632	1,041,264	1,561,896	2,082,529	2,603,161	3,123,793	3,644,425	DKK/bygning
Fleretageejendomme	341,709	683,418	1,025,127	1,366,836	1,708,545	2,050,254	2,391,962	
Huse	125,000	250,000	375,000	500,000	625,000	750,000	875,000	
Fritidshuse	6,250	12,500	18,750	25,000	31,250	37,500	43,750	
Kældre	2.5 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	30 cm	50 cm	DKK/m ²
	66	132	264	397	529	793	1,322	
Infrastruktur	2.5 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	30 cm	50 cm	DKK/m ²
Veje	66	132	264	397	529	793	1,322	
Jernbaner	330	661	1,321	1,982	2,642	3,963	6,605	
Helbred	0.15 cm	0.3 cm	1 cm	5 cm	10 cm	20 cm	50 cm	DKK/person
	81	162	541	2,707	5,415	10,829	27,073	
Vandmiljø	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm	euro/sø el. vandløb
	125,000	250,000	375,000	500,000	625,000	750,000	875,000	
Uerstattelig aktiver	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm	DKK/bygning
Monumenter	250,000	500,000	750,000	1,000,000	1,250,000	1,500,000	1,750,000	
Kirker	2,500,000	5,000,000	7,500,000	10,000,000	12,500,000	15,000,000	17,500,000	
Bevaringsværdige bygninger	250,000	500,000	750,000	1,000,000	1,250,000	1,500,000	1,750,000	
Statuer og skulpturer	250,000	500,000	750,000	1,000,000	1,250,000	1,500,000	1,750,000	
Museer	250,000	500,000	750,000	1,000,000	1,250,000	1,500,000	1,750,000	

- /2/ Skougaard Kaspersen, P., Halsnæs, K., Gregg, J., Drews, M., 2012. Methodological framework, analytical tool and database for the assessment of climate change impacts, adaptation and vulnerability in Denmark (No. Report 11.2012), DTU Management Engineering Report Series.
- /3/ Odense Kommune, 2014. Klimatilpasningsplan 2014 -

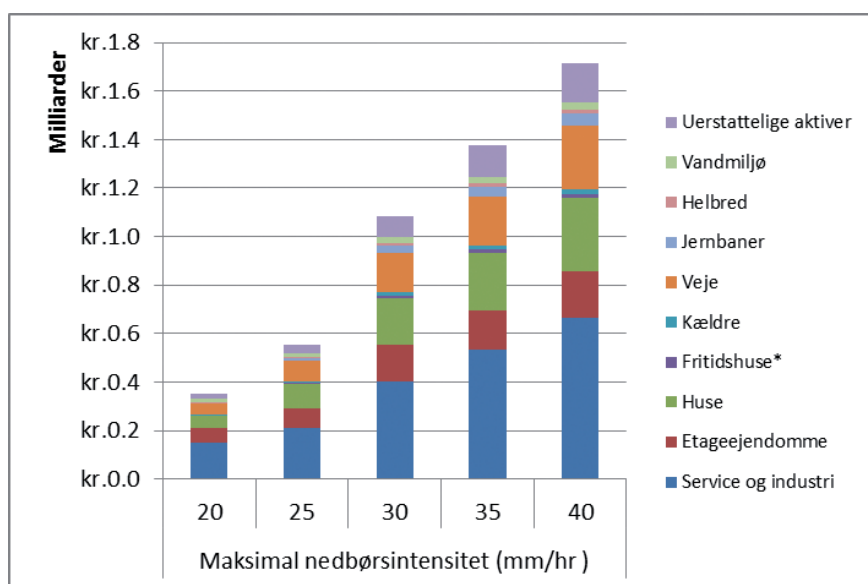
- Baggrundsrapport til Kommuneplantillæg nr. 1.
- /4/ Levin, G., Rudbeck Jepsen, M., Blemmer, M., 2012. Basemap - Technical documentation of a model for elaboration of a land-use and land-cover map for Denmark, Technical report from DCE - Danish Centre for Environment and Energy No. 11. Aarhus Universitet - Danish Centre for Environment and

Energy.

- /5/ Zhou, Q., Mikkelsen, P.S., Halsnæs, K., Arnbjerg-Nielsen, K., 2012. Framework for economic pluvial flood risk assessment considering climate change effects and adaptation benefits. J. Hydrol. 414-415, 539-549. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.11.031
- /6/ Arnbjerg-Nielsen, K., Fleischer, H.S., 2009. Feasible adaptation strategies for increased risk of flooding in cities due to climate change. Water Sci. Technol. 60, 273. doi:10.2166/wst.2009.298
- /7/ Forsikring og Pension 2014: Hjemmeside besøgt Juni 2014. http://www.forsikringogpension.dk/presse/Statistik_og_Analyse/statistik/forsikring/erstatninger/Sider/Erstatninger_for_vandskader.aspx

KIRSTEN HALSNÆS er professor i klima og økonomi ved DTU Management. Hun har mere end 20 års erfaring i international klimaforskning og har spillet en ledende rolle i FN's klimaekspertpanel IPCC. Hendes publikationer omfatter en lang række internationale tidsskriftsartikler og danske bidrag, og derudover har Kirsten været meget aktiv i dansk klimadebat og kommunikation.

PER SKOUGAARD KASPERSEN er PhD studerende ved DTU Management. Pers PhD projekt omhandler byudviklingens indflydelse på storbyers sårbarhed overfor ekstreme vejr-hændelser, herunder skybrud. Per er uddannet geograf fra Københavns Universitet.



Figur 7: Skadesomkostninger i Odense ved skybrud med varierende nedbørsintensitet

Vandressourcer i en 6 graders varmere verden

Udledningen af drivhusgasser er nu så voldsom, at det ikke længere er utopi at forestille sig et fremtidigt klima med markante temperaturstigninger. Det er derfor relevant at belyse, hvordan vandkredsløbet påvirkes af ekstreme klimatiske ændringer. I det følgende beskrives, hvordan vandbalancerne for grundvand, vandløb og rodzonen påvirkes, hvis den globale middeltemperatur stiger med over 6 grader.

TORBEN O. SONNENBORG, IDA B. KARLSSON, JENS CHRISTIAN REFGAARD & KARSTEN HØGH JENSEN

Introduktion

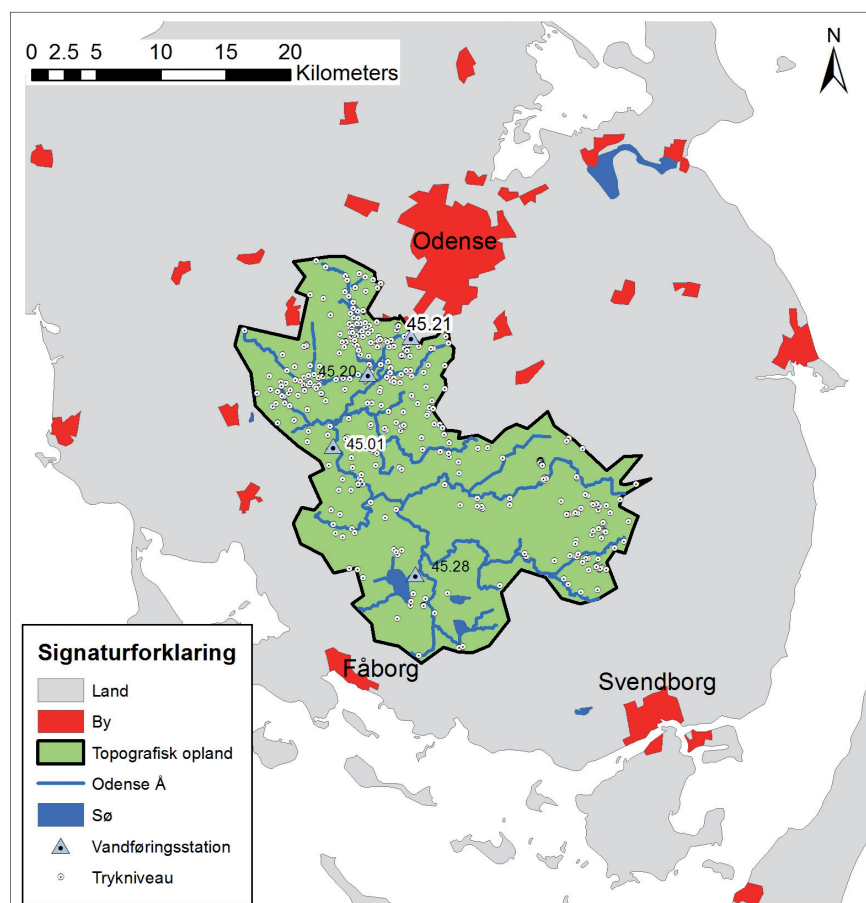
Det er umiddelbart vanskeligt at forestille sig, hvordan det hydrologiske kredsløb i Danmark vil reagere på et klima, som er karakteriseret ved en global temperaturstigning på 6 grader celsius. En så stor temperaturstigning vil give mulighed for, at luften kan indeholde langt mere vanddamp end under nuværende forhold, hvilket kan resultere i både mere fordampning og mere nedbør. Endelig kan en så dramatisk ændring i den globale temperatur også formodes at give anledning til signifikante ændringer i vejrsystemerne, som vil påvirke vandkredsløbet markant. Her vil vi med et eksempel fra Fyn eksemplificere hvordan vandressourcerne i Danmark påvirkes af et 6-graders scenarie. Ud over effekten på grundvand og vandløbsafstrømning vil effekten på jordvandsindholdet også blive beskrevet. Til dette formål introduceres et indeks for jordvandindhold, som giver en rumlig beskrivelse af fugtighedsforholdene i et opland med en tidlig opløsning på ugebasis.

Klimaet i et 6-graders scenarium

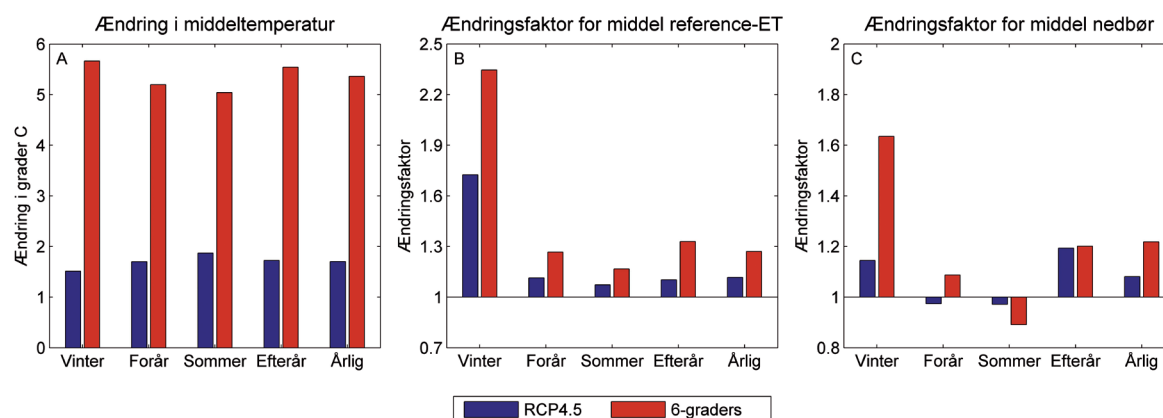
De klimaresultater, som anvendes i dette studie, er baseret på den globale klimamodel EC-Earth 1/1. CO₂ koncentrationen er specificeret til at stige med 1 % om året, indtil den globale middeltemperatur er steget med

seks grader celsius. Herefter fastholdes CO₂-koncentrationen og den globale temperatur stabiliserer sig gradvist til en værdi, der ligger 6,5 grader celsius over den præ-industrielle temperatur. For at få en bedre rumlig beskriv-

else af klimaet er der efterfølgende lavet en beregning med den regionale klimamodel HIRHAM5, som dækker Europa og den nordligste del af Afrika. Denne model har en rumlig opløsning på ca. 25 km og kan dermed



Figur 1 Opland på Fyn som er beskrevet af den hydrologiske model.



Figur 2 Ændringer i temperatur, reference-fordampning og nedbør for RCP4.5 og 6 graders scenarierne for Fyn.

beskrive de geografiske karakteristika for eksempelvis Danmark. Fremtidsscenariet svarer ikke til en bestemt tidsperiode, men til en mulig tilstand en gang i fremtiden, som i værste fald allerede kan indtræffe i dette århundrede, hvis de varmeste klimamodeller har ret /2/. Til sammenligning er resultater for emissionsscenariet RCP4.5 for perioden 2080-2099 også medtaget.

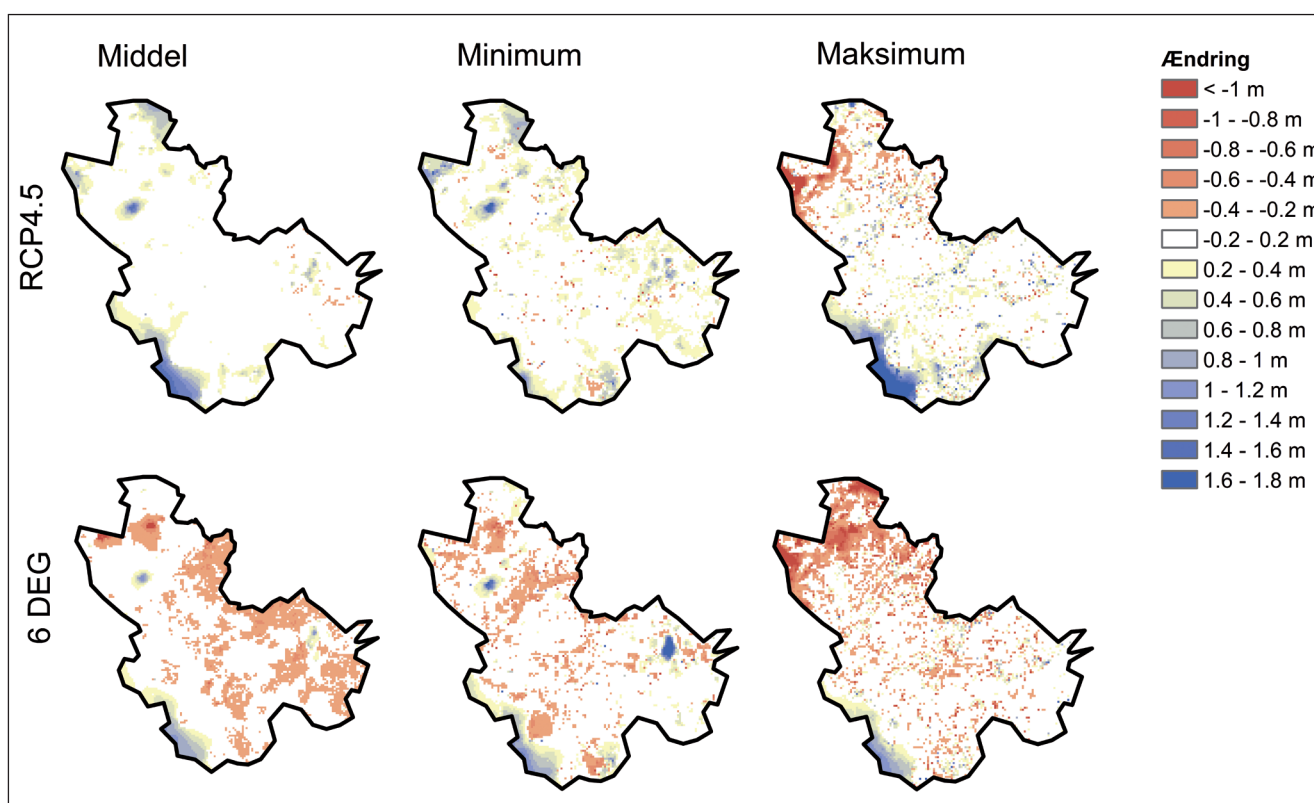
Resultaterne fra HIRHAM5 er trukket ud for et opland midt på Fyn (Figur 1). Klimamodelens resultater er herefter blevet fejlkorrigeret, således at der er overensstemmelse mellem målte og beregnede værdier af nedbør, fordampning og temperatur for perioden 1991-2005. I Figur 2 ses, hvordan de to klimascenarier påvirker temperatur, fordampning og nedbør for fremtidsperioden 2080-2099. Tem-

peraturen stiger ikke overraskende markant i 6-graders scenariet, hvor der findes stigninger på ca. 5,5 grader det meste af året. Der er tale om betydeligt større temperaturstigninger end der findes i RCP4.5 scenariet. For referencefordampningen (Figur 2b) findes der ændringsfaktorer på næsten 1,3 på årsbasis for 6-graders scenariet, dvs. referencefordampningen stiger med ca. 30% om året. I de tre vintermåneder optræder der en betydelig større relativ stigning, op til en faktor 2,4, men det skal bemærkes, at fordampningen i vinterhalvåret under nuværende klima er relativ beskedent, så selv med en stigning på en faktor 2,4 vil referencefordampningen stadig være relativ lav. Til gengæld kan stigningerne i sommerhalvåret med en faktor 1.2-1.3 have en betydelig effekt på, hvor meget vand der tabes til at-

mosfæren. I Figur 2c ses ændringerne i nedbør. For 6-graders scenariet sker den største ændring om vinteren, hvor der findes en stigning på 60%. Ændringerne i den resterende del af året er forholdsvis begrænsede, men det bemærkes, at sommernedbøren falder med ca. 10%.

Effekter på vandressourcer

Klimaændringernes effekt på vandressourcerne er blevet bestemt for hhv. vandløbsafstrømning, grundvandsstand og vandindhold i rodzonen. Til det formål er der anvendt en hydrologisk model. Modellen er baseret på MIKE SHE systemet og er opsat på baggrund af Danmarksmodellen /3/, som er opbygget under anvendelse af så mange informationer som muligt fra oplandet, f.eks. geologiske



Figur 3 Ændringer i middel, minimums og maksimums grundvandsstand for hhv. RCP4.5 og 6 graders scenarierne.

Boks 1 Definition af tørkeindekset SMDI

Jordvands-deficit-indeks /4/, SMDI, bestemmes på baggrund af ugentlige værdier for vandindholdet i rodzonen. Jordvands-deficitet, SD, for en bestemt uge j bestemmes som:

$$SD_j = \frac{SW_j - MSW_j}{MSW_j - MSW_j^{\min}} * 100, \quad SW_j \leq MSW_j$$

$$SD_j = \frac{SW_j - MSW_j}{SW_j^{\max} - MSW_j} * 100, \quad SW_j > MSW_j$$

hvor SW_j er vandindholdet i rodzonen (i mm) i uge j, og MSW_j er medianværdien af rodzonens vandindhold for den pågældende uge, f.eks. uge 25 (baseret på historiske data). $SW_j^{\max}$ og $SW_j^{\min}$ er hhv. det største og mindste vandindhold i den betragtede uge (baseret på historiske data). Jordvands-deficitet SD kan variere mellem værdier på -100 og +100, som repræsenterer meget tørre og meget våde betingelser. På basis af jordvands-deficitet defineres jordvands-deficit-indekset som

$$SMDI_j = \frac{SD_j}{50} + 0.5 * SMDI_{j-1}$$

hvor $SMDI_{j-1}$ repræsenterer jordvands-deficit-indekset i ugen før den, som evalueres. SMDI varierer mellem -4 og +4, hvor -4 svarer til den tørreste uge i den historiske data serie mens +4 svarer til den mest våde uge.

Når SMDI anvendes på fremtidige perioder er det valgt at bestemme MSW , $SW_j^{\max}$ og $SW_j^{\min}$ på basis af de historiske data. Herved kan indekset umiddelbart sammenlignes med nutidens forhold. I det aktuelle tilfælde findes værdier for SMDI næsten helt ned til -8 for den fremtidige periode.

Fordampnings-deficit-indekset, ETDI, er baseret på en tilsvarende algoritme, hvor der i stedet for vandindholdet i rodzonen er defineret et vand-stress givet ved $WS = (PET - AET)/PET$, hvor PET er den potentielle fordampning og AET er den aktuelle fordampning. ETDI varierer også mellem -4 og +4 for den historiske periode, mens der for den fremtidige periode kan findes indeks-værdier uden for dette interval.

borehulsbeskrivelser til etablering af en geologisk model, jordtyper i rodzonens A, B og C horisonter, samt vandløbsplacering og -geometri. Modellens parametre er justeret på plads ved at kalibrere mod observationer af grundvandsstand og vandløbsafstrømning (se figur 1 for placering).

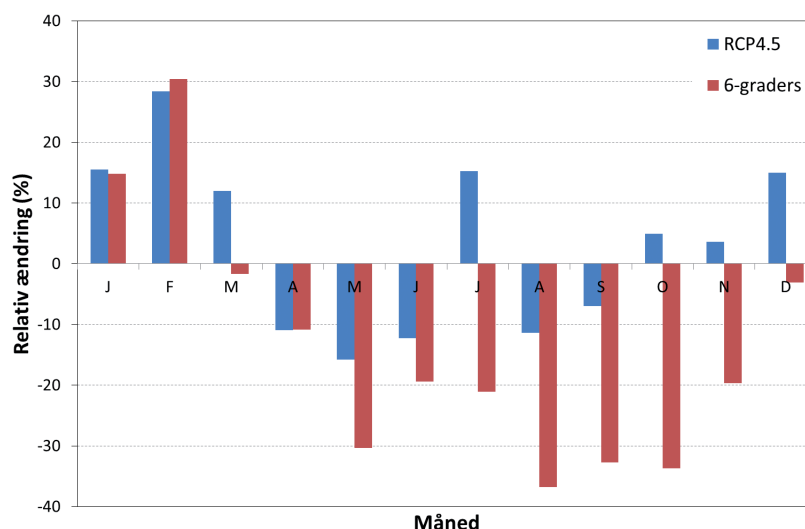
Figur 3 viser påvirkningen på middel-, minimum- og maksimumsgrundvandstand i de to scenarier. For 6-graders scenariet sker de største fald i grundvandsstanden i den østlige og nordlige del af oplandet, men på de fleste steder er ændringerne forholdsvis begrænsede. Stigningen i vinternedbør resulterer i en større grundvandsdannelse i vinterhalvåret som delvist opvejer reduktionen i nedbør og stigningen i referencefordampning gennem sommerperioden. Den samme tendens ses for vandløbsafstrømningen, Figur 4, som er vist for udløbet fra oplandet. Her ses, at vandløbsafstrømningen stiger betydeligt (op til 30 %) i januar og februar. Til gengæld findes ganske markante fald i afstrømningen i perioden marts til november, hvor der observeres fald på over 35% i nogle måneder. Det ses, at udtørringen er betydeligt større i 6-graders sce-

narier i forhold til RCP4.5 scenariet.

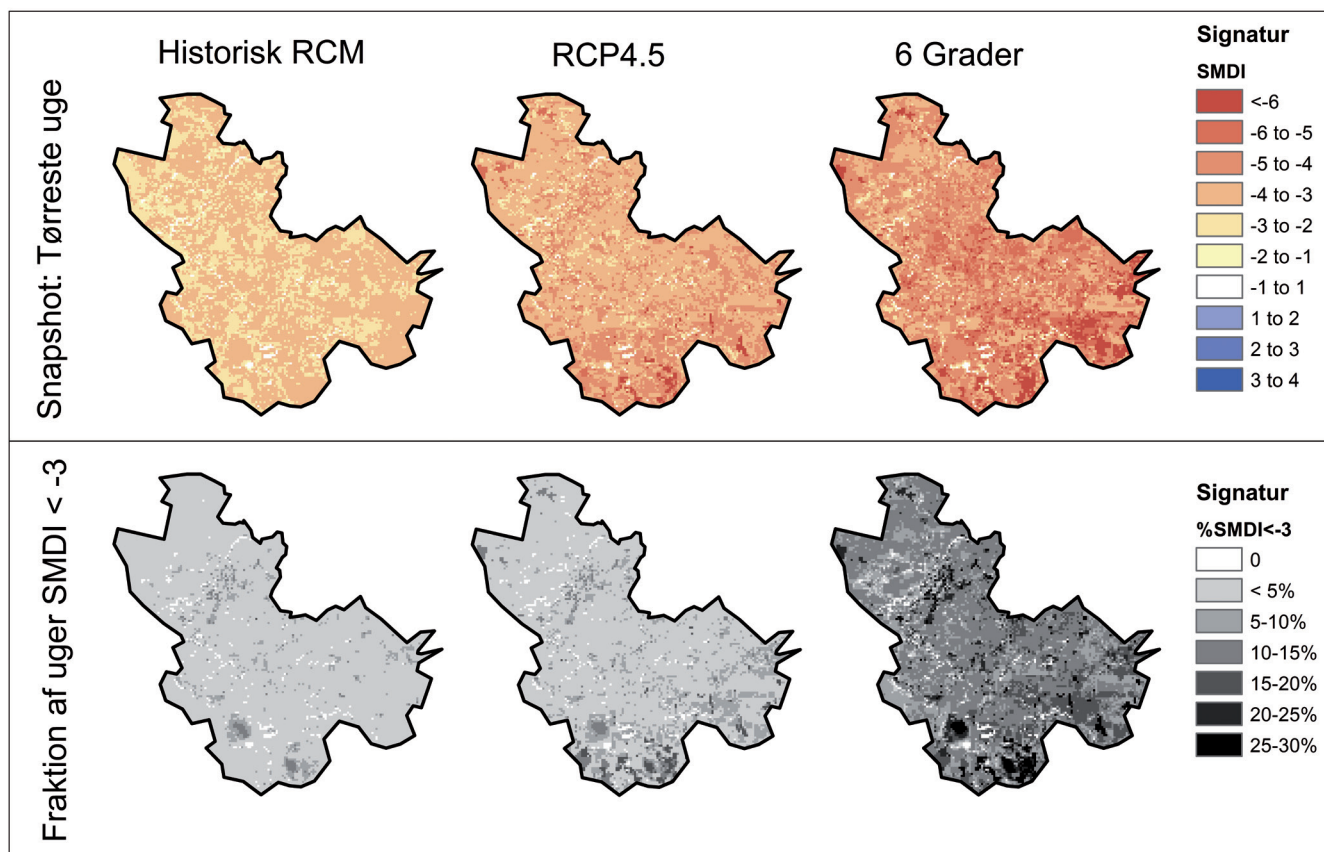
Effekten af klimaændringerne på rodzonen er beskrevet vha. indekset SMDI (Soil Moisture Deficit Index – se Box 1. Her vil en værdi på -4 svare til den værste tørkesituation (laveste vandindhold), som der har været oplevet i "kontrol"-perioden 1991-2005. En værdi på +4

vil omvendt svare til den vådeste situation, som der er oplevet historisk. Værdien 0 svarer til, at vandindholdet er lig medianværdien af vandindholdet i den historiske periode.

På Figur 5 ses værdier for SMDI, hvor den øverste række viser den tørreste uge i hhv. det historiske klima (1991-2005), RCP4.5 scenariet



Figur 4 Relativ ændring i middel månedlig vandløbsafstrømning for hhv. RCP4.5 og 6-graders scenarierne.



Figur 5 SMDI indeks i hhv. historisk periode, RCP4.5 scenariet og 6-graders scenariet. Øverst ses den tørreste uge i de tre scenarier, mens der nederst er vist, hvor stor en procentdel af tiden at SMDI < -3.

og 6-graders-scenariet. I perioden 1991-2005 findes generelt værdier på mellem -2 og -4, og i 62 % af området er SMDI-værdien på under -3. Situationen bliver forværret i RCP4.5, hvor 91% af arealet har en SMDI-værdi på under -3, men hvor der også findes SMDI-værdier ned til ca. -5. Det mest markante respons findes for 6-graders scenariet, hvor 96% af oplandet har SMDI-værdier på under -3 og hele 70% ligger på værdier under -4, svarende til den tørreste situation under de aktuelle klimaforhold. De laveste SMDI-værdier kommer helt ned under -7 og karakteriserer en meget markant tørkesituation. I den nederste række i figuren ses hvor stor en del af tiden, at SMDI er under -3. I den historiske periode er SMDI under -3 i under 5% i tiden i den største del af oplandet. Denne andel stiger moderat i RCP4.5 scenariet mens der i 6-graders scenariet findes en markant stigning. Her ligger store dele af oplandet med SMDI under -3, svarende til en kritisk tørkesituation.

Konklusioner

Mens effekten af det ekstreme 6-graders klimascenarie er forholdsvis begrænset, når det drejer sig om grundvand, så er effekten på vandløbsafstrømning og jordvandsindhold i sommerperioden markant. En reduktion af vandløbsafstrømningen i Odense Å på 30%

eller mere i perioden, hvor den laveste vandføring optræder under nuværende klima, må forventes at have signifikant negativ effekt på den økologiske tilstand i vandløbet. Det vil yderligere presse systemet, at vandløbsafstrømningen er lav i en relativ lang periode. En tilsvarende effekt ses på landbrugsarealerne, hvor der vil ske en markant udtørring af rodzonen sammenlignet med nuværende forhold. Ifølge /3/ er der god korrelation mellem SMDI indekset og afgrødernes udbytte. Alt andet lige må det derfor forventes at udbytterne falder drastisk i den situation. Motivationen for at benytte kunstvanding, baseret på oppumpning af grundvand, vil derfor stige markant. Det vil imidlertid være problematisk at indvinde vand fra grundvandsmagasinerne i et 6-graders scenarium. Dels vil der allerede uden en stigning i oppumpningen af grundvand ske et fald i grundvandsstanden, og det er derfor ikke usandsynligt at yderligere oppumpning vil resultere i en uholdbar situation. Især vil vandløbsafstrømningen, som specielt i sommerperioden er afhængig af grundvandtstilstrømning, være sårbar overfor grundvandsindvinding. Man kan derfor let forestille sig, at presset på grundvandsvandsressourcerne stiger markant i fremtiden.

Det skal bemærkes, at beregningerne foretaget i nærværende analyse er foretaget ud fra

en forudsætning om "alt andet lige". Det er med andre ord kun klimaet, som er specificeret til at ændre sig. Der er ikke taget forbehold for eksempelvis ændringer i befolkningsstørrelse med tilhørende vandbehov, ændringer i afgrødesammensætning eller ændringer i landbrugsarealets størrelse.

Referencer

- /1/ Christensen, J.H. et al. (2014), RCP scenarier, Vand & Jord, dette nummer.
- /2/ Christensen, J.H. et al. (2014), Usikkerhed på fremtidsscenarioer, Vand & Jord, dette nummer.
- /3/ Henriksen, H.J., L. Trolborg, P. Nyegaard, T.O. Sonnenborg, J.C. Refsgaard, and B. Madsen (2003), Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark, *Journal of Hydrology*, 280, 52-71.
- /4/ Narashimhan, B. & R. Srinivasan (2005), Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring, *Agricultural and Forest Meteorology*, 133, 69-88.

TORBJEN OBEL SONNENBORG (iso@geus.dk), IDA B. KARLSSON, og JENS CHRISTIAN REFSGAARD er hhv. senior forsker, phd-studerende og forskningsprofessor ved GEUS. KARSTEN HØGH JENSEN er professor ved Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet.

VAND

- mennesker, natur, produktion

DHI leverer løsninger, der kombinerer traditionel overvågning, online målinger, statistiske analyser, modeller, vandudsigt og webbaseret information

Afvanding
Indvinding
Virkemidler
Vådområder
Grødeskæring
Oversvømmelser
Hydraulisk kapacitet
Afstrømning fra byområder
Habitattilstand og -vurderin
Vandkvalitet i vandløb og søer

DHI er en selvejende, international rådgivnings- og forskningsorganisation, hvis mål er at fremme teknologisk udvikling og kompetenceopbygning inden for områderne vand, miljø og sundhed. Vi er godkendt som Teknologisk Serviceinstitut af Ministeriet for Forskning, Innovation og Videregående Uddannelser. DHI er en global organisation med kontorer i 30 lande, godt 1100 ansatte og gennemførte projekter i 150 lande. Vi tilbyder en lang række løsninger, avanceret IT-teknologi, laboratorieundersøgelser, forsøgsfaciliteter samt survey- og monitoringsprogrammer.

www.dhigroup.com

