

Klimaeffektens betydning for ekstremregn og dermed funktionen af afløbssystemer

- litteraturstudie

Karsten Arnbjerg-Nielsen

COWI A/S

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling.

Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Indhold

FORORD	5
SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER	7
SUMMARY AND CONCLUSIONS	9
1 INDLEDNING	11
1.1 BAGGRUND OG FORMÅL	11
1.2 MÅLGRUPPE	12
2 KLIMAÆNDRINGERS BETYDNING FOR AFLØBSSYSTEMER	13
3 FYSISKE EGENSKABER VED NEDBØR I DANMARK	16
3.1 VALG AF TEMPORAL OG SPATIAL SKALA	16
3.2 TYPER AF REGNVEJR I DANMARK	17
3.2.1 Konvektiv regn	17
3.2.2 Frontregn	17
3.3 OPSAMLING	18
4 SKALERING AF REGN	19
4.1 METODER TIL SKALERING OVER TID	19
4.1.1 Markov-kæder	19
4.1.2 Stokastisk simulering	20
4.1.3 Kaos-teori/Kaskade-modeller	21
4.1.4 Neurale netværk	22
4.2 SKALERING AF REGN OVER AREAL	22
4.2.1 Areal Reduction Factor	23
4.2.2 Skalering af variable	25
4.2.3 Areal Reduction Factor kombineret med kaos-teori	25
4.3 SKALERING AF REGN OVER TID OG AREAL	25
5 METODER TIL GENERERING AF FREMTIDIGE EKSTREMREGN PÅVIRKET AF KLIMAÆNDRINGER	27
5.1 DIREKTE KORRELATION TIL PARAMETRE I REGIONALE KLIMAMODELLER	27
5.2 CASE: ANALYSE AF KLIMAEFFEKTER PÅ EKSTREMVÆRDIER	27
5.3 CASE: ANALYSE AF KLIMAEFFEKTER PÅ REGNSERIER	29
5.4 DISKUSION AF METODER TIL GENERERING AF FREMTIDIGE KUNSTIGE HISTORISKE REGNSERIER OG/ELLER DIMENSIONERINGS-REGN I HØJ OPLØSNING	32
6 KONKLUSION	35
7 REFERENCER	37

Bilag A Neyman-Scott/Bartlett Lewis Rectangular Pulses model

Forord

Nærværende rapport belyser hvilke metoder der kan forventes at være effektive når man skal forudsige ændringer i ekstremregn på baggrund af aktuelle målinger og beregninger med regionale klimamodeller.

Et centralt problem i den forbindelse er at output fra beregninger med regionale klimamodeller er i form af gennemsnitsværdier over 1-24 timer over et område på 100 - 2500 km². De typer af regnvejr der producerer de højeste regnintensiteter har en effektiv levetid på 20-40 minutter og en udbredelse på nogle få km². Der er derfor behov for at finde metoder der kan skalere outputtet fra klimamodeller til højere opløsning i tid og sted. Dette er særligt vigtigt for analyser og beregninger af konsekvenser for afstrømning fra byområder. Det skyldes at eksisterende metoder til analyse og dimensionering af afløbssystemer og bynære vandløb er baseret på brug af ekstremregn målt i høj tidsopløsning på en enkelt regnmåler.

Rapporten er udarbejdet af Karsten Arnbjerg-Nielsen, COWI. Arne B Hasling, COWI, har bidraget med kvalitetskontrol.

Projektet har været udført i perioden december 2004 - september 2005. Der har været nedsat følgende følgegruppe:

Mogens Kaasgaard, Miljøstyrelsen (formand)
Ditte Holse, Miljøstyrelsen
Povl Frich, Miljøstyrelsen
Karsten Arnbjerg, COWI (sekretær)
Kristian Friis, DANVA
Niels Bent Johansen, Københavns Energi, Regnudvalget
Jens Hesselbjerg Christensen, DMI
Henrik Madsen, IMM, DTU
Jens Jørgen Linde, M&R, DTU

Der har i løbet af projektet været afholdt et møde i følgegruppen, hvor rapportens udformning og indhold har været diskuteret. Projektet er finansieret af Miljøstyrelsen.

Sammenfatning og konklusioner

Klimaændringer har allerede medført ændringer i nedbørsstrukturen. Denne udvikling må forventes at fortsætte. Der vil komme færre regnhændelser, men de ekstreme regnhændelser vil blive væsentligt kraftigere. Det er påvist, at de allerede observerede ændringer er statistisk signifikante.

Ændringer i nedbørsstrukturen har afgørende betydning for kloaksystemernes funktion. Indledende undersøgelser tyder på, at kloaksystemerne nogle steder skal have fordoblet kapaciteten for at undgå voldsomme skader i byområderne i fremtiden.

Nedbørsdata fra DMIs overordnede klimamodeller kan ikke anvendes direkte til beregning af belastningen af afløbssystemer. Derfor må klimamodellernes samlede nedbørsdata viderebearbejdes for en mere detaljeret beskrivelse af fremtidens forventelige nedbørsmønstre. Herefter kan konsekvenserne af den øgede belastning af afløbssystemerne beregnes.

Hovedformålet med projektet er at foretage et litteraturstudie for at identificere de nyeste metoder til at beskrive nedbørs "skalerings"-egenskaber. En oversigt over skalerings-egenskaber af nedbør giver mulighed for at opstille metoder til beregning af fremtidens nedbørsmønstre i høj opløsning i tid og sted, hvilket er nødvendigt for at kunne kvantificere effekterne af klimaændringerne på kloaksystemer.

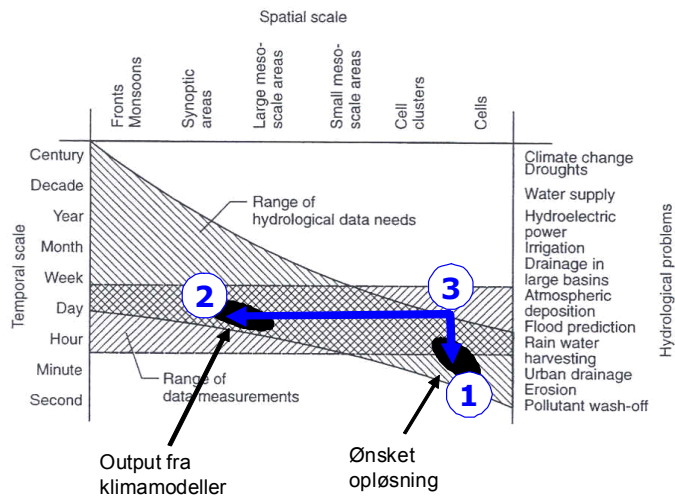
Der er som led i nærværende litteraturstudie identificeret tre metoder til at skalere resultater fra klimamodellerne så det er muligt at vurdere effekterne på funktionen af afløbssystemer. Alle metoderne benytter følgende fremgangsmåde:

1. Karakteriser nedbøren i punktmålingerne på baggrund af en historisk regnserie
2. Karakteriser forskellen i en tilsvarende egenskab ved en regional klimamodel der dækker det relevante område og kvantificer forskellen mellem "status" og "fremtid".
3. Etabler en entydig og dækkende sammenhæng mellem den historiske regnserie og klimamodellens "status"-simulering. Den bijektive sammenhæng benyttes til at beskrive punktmålinger af nedbør i et fremtidsscenario.

De tre trin er illustreret i Figur 1.

De tre metoder kan kort karakteriseres som følger:

- Empirisk bearbejdning af ekstremværdier for forskellige gentagelsesperioder og varigheder. Sammenhængen mellem regnserie og klimamodel etableres i form af et fast forhold mellem punktmåling og arealnedbør, den såkaldte Areal Reduktions Faktor. Denne metode er anvendt på danske data i et eksamensprojekt.



Figur 1 De nødvendige tre trin ved beskrivelse af klimarelaterede ændringer i ekstremregn til brug for analyse af afløbssystemer.

- Parametrisk bearbejdning af ekstremværdier for forskellige varigheder. Dette er en standard metode for bearbejdning af ekstremregn i Danmark og der er også fundet en anvendelse på døgnnedbør fra klimamodeller. Sammenhængen mellem regnserie og klimamodel etableres ved at korrelere parametre i modellerne. Der er ikke fundet eksempler på anvendelse af denne metode.
- Parametrisk bearbejdning af regnserier i lav tidsmæssig opløsning kombineret med metoder til at skalere nedbør til højere tidsmæssig opløsning. Sammenhængen mellem regnserie og klimamodel etableres ved at korrelere parametre i modellerne. Metoden er anvendt i Storbritannien.

Den første metode er anvendt i Danmark i et eksamensprojekt på DTU. Resultatet var at ændringerne i ekstremregn var ganske alvorlige for funktionen af afløbssystemerne. Det er samtidigt den metode som forventes at have størst usikkerhed. Det anbefales derfor som minimum at iværksætte en undersøgelse der er baseret på en af de andre to metoder og/eller at undersøge betydningen af antagelserne i den metode der er anvendt. Hvis to af metoderne er undersøgt giver det mulighed for at sammenligne usikkerheden ved skaleringen med de andre væsentlige usikkerheder i forbindelse med at forudsige ændringer i ekstremregn. Endvidere er det vigtigt at få fastlagt forløbet af ændringerne over tid, for eksempel ved at skønne de forventede klimaændringer for ekstremregn i år 2060.

Først når ovennævnte undersøgelser er gennemført er der mulighed for at vurdere om der skal en større indsats til for at kvantificere ændringer i ekstremregn.

Summary and conclusions

Significant changes in precipitation patterns have been observed within the last few decades. This development is expected to continue. The number of precipitation events will decrease. Extreme precipitation will, however, occur more frequently.

Changes in the precipitation structure have a significant influence on the performance of sewer systems. Preliminary assessment indicates that, at some locations, the capacity of urban sewerage systems must be doubled to avoid severe damage to urban areas.

Precipitation data from global and regional climate change models are not immediately applicable for calculation of urban runoff because the resolution is too coarse; design and analysis of urban runoff are most often based on point rainfall in a high temporal resolution. The data must therefore be processed further before the consequences for urban runoff can be evaluated.

The objective of the project is to identify methods that are suitable for deriving the scaling properties of precipitation. An overview of methods used to describe the scaling properties of precipitation enables the selection of suitable methods to use the results from climate change models when predicting future occurrences of extreme rainfall and the impact on urban areas.

Three methods have been identified. The three methods all apply the following procedure:

1. Characterize precipitation in point measurements based on historical rainfall series.
2. Characterize a similar property in a regional climate change model covering the region in question and quantify the difference between "status" and "future".
3. Establish an unambiguous relationship between the historic precipitation series and the "status" simulation of the climate model. The unambiguous relationship is used to describe the properties of point precipitation in a future scenario.

The three steps are presented in Figur 2.

The three methods can be summarized as follows:

- Empirical processing of extreme values for different return periods and durations. The relationship between the point precipitation data and the climate change model data is established as a fixed ratio, the so-called Areal Reduction Factor. This method has been applied in Denmark.
- Parametric modelling of extreme values by means of the Partial Duration Series (or Generalized Extreme Value) approach. The relationship between the point precipitation series and the climate change model is established by correlating parameters in the models for each duration in question.

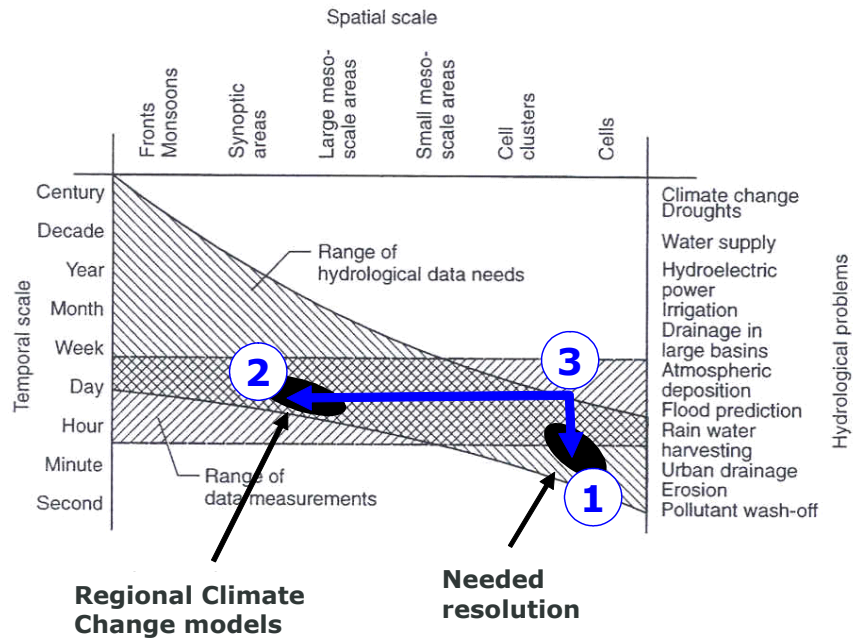


Figure 2 The steps needed in order to transform predicted changes in extreme precipitation from Regional Climate Change models to a resolution needed in urban drainage.

- Parametric modelling of precipitation series in a coarse temporal resolution combined with methods for scaling of precipitation in higher temporal resolutions. The relation between precipitation series and climate model is established by correlating parameters in the models. The method has been applied in Great Britain.

The first of the above mentioned methods has been tested on Danish data as part of a Master thesis at the Technical University of Denmark. The results were quite alarming in the sense that the predicted future extreme precipitation was much more intense than today. The first method is, however, expected to be the most uncertain method. Therefore it is recommended to initiate a project with an assessment based on one of the two other methods and/or to evaluate the importance of the assumptions in the applied method. By evaluating at least two methods, it is possible to assess the degree of certainty with which the predictions are made. The uncertainty of the scaling can then be compared with other uncertainties in connection with predicting changes in extreme precipitation. Finally, it is important to determine the speed of the predicted changes, for example by estimating the expected climate changes for extreme precipitation in year 2060.

1 Indledning

1.1 Baggrund og formål

Klimaændringer har allerede medført ændringer i nedbørsstrukturen. Denne udvikling må forventes at fortsætte. Der vil komme færre regnhændelser, men de ekstreme regnhændelser vil blive væsentligt kraftigere. Det er påvist, at de allerede observerede ændringer er statistisk signifikante.

Ændringer i nedbørsstrukturen har afgørende betydning for kloaksystemernes funktion. Indledende undersøgelser tyder på, at kloaksystemerne nogle steder skal have fordoblet kapaciteten for at undgå voldsomme skader i byområderne i fremtiden.

Nedbørsdata fra DMIs overordnede klimamodeller kan ikke anvendes direkte til beregning af belastningen af afløbssystemer. Derfor må klimamodellernes samlede nedbørsdata viderebearbejdes for en mere detaljeret beskrivelse af fremtidens forventelige nedbørsmønstre. Herefter kan konsekvenserne af den øgede belastning af afløbssystemerne beregnes.

Hovedformålet med projektet er at foretage et litteraturstudie for at identificere de nyeste metoder til at beskrive nedbørs "skalerings"-egenskaber. En oversigt over skalerings-egenskaber af nedbør giver mulighed for at opstille metoder til beregning af fremtidens nedbørsmønstre i høj opløsning i tid og sted, hvilket er nødvendigt for at kunne kvantificere effekterne af klimaændringerne på kloaksystemer.

Litteraturstudiet vil udgøre en nødvendig basis for det langsigtede mål: at opstille en konkret vejledning til de analyser kommunerne bør foretage for at undersøge om afløbssystemet kan håndtere den øgede belastning samt at opstille en vejledning med forslag til hvilke typer af indgreb der anbefales for at imødegå effekter af klimaændringer.

Der menes at være tre hovedkilder til usikkerheder i forbindelse med at skønne fremtidige ekstremregn i høj tids- og arealmæssig opløsning:

- Scenarier for samfundsudvikling, ikke blot udledning af drivhusgasser, men også udviklingen i ressourceforbruget i øvrigt
- Metoder til at beskrive hvordan samfundsudviklingen sammen med CO₂-emissionerne vil medføre generelle og ekstreme ændringer i klimaet i Danmark. Forskellige metoder til parametrisering af klimamodeller giver i dag ganske væsentlige forskelle i de beregnede klimaeffekter
- Metoder til at skalere beregnede ændringer i klimamodeller til brug for højere tids- og arealmæssige opløsning til brug for analyse af påvirkning af f.eks. afløbssystemer

Hver af disse kilder til usikkerheder vurderes at være væsentlig. Rapportens formål er at belyse den sidste kilde til usikkerhed i form af et indledende litteraturstudie. Der afrapporteres forskellige metoder og det vurderes kvalitativt hvorvidt disse metoder kan anses for egnede til at indgå i en samlet

procedure for konvertering af output fra klimamodeller til dimensionering og analyse af kloaksystemer. En praktisk anvendelse af metoderne ligger udenfor nærværende opdrag.

1.2 Målgruppe

Denne rapport er skrevet til ingeniører og andre med en vis indsigt i afløbsteknik og matematik. Der er i videst muligt omfang undgået matematiske symboler og fokuseret på modellernes evne til at modellere egenskaber. Metoder til estimation af parametre i modellerne er ikke diskuteret.

2 Klimaændringers betydning for afløbssystemer

Studier af klimaændringer i fremtiden fokuserer især på overordnede gennemsnitsbetragtninger som f.eks. den gennemsnitlige årlige temperaturstigning over en periode på 100 år. Sådanne betragtninger kan være væsentlige i mange sammenhænge, men for infrastrukturen i et samfund er det mere relevant at studere ekstreme vejrphænomener.

Det stiller store krav til de modeller der benyttes til at vurdere klimaændringerne og derfor er der først i de senere år begyndt at være resultater der fokuserer på ekstremværdier. Christensen og Christensen (2001) offentliggjorde et resultat der påpegede at der var væsentlig risiko for at klimaændringerne ville medføre væsentlige ændringer af ekstremregns forekomst og størrelse. For Danmarks vedkommende er der tegn på, at ekstremregn vil være mere ekstreme og mere hyppige. Dette understøttes af undersøgelser af historiske regnsrækker i Europa, hvor det er påvist at der allerede er sket væsentlige ændringer af ekstremregn (Tank *et al.* 2002; Arnbjerg-Nielsen, 2002).

Afløbssystemer er dimensioneret til at håndtere en given mængde vand hurtigt, effektivt og uden væsentlige skader på omgivelserne. Såfremt der kommer mere vand end det der er dimensioneret for store dele af det overskydende vand blive på byens overflader og her strømme mod de naturlige lavpunkter. Det kan være grønne områder, men vejnavne som Åboulevarden, Åmosevej, Sønderengen m.fl. giver en tydelig indikation af at nogle af disse lavpunkter i dag er udnyttet til veje og boliger. Disse veje og boliger har en væsentlig risiko for at blive oversvømmet med kloakvand når afløbssystemet overbelastes. Derfor vil selv mindre ændringer af ekstremregns egenskaber få ret stor betydning for hvor ofte afløbssystemerne overbelastes og dermed hvor store udgifter samfundet pålægges ved overskridelse af afløbssystemernes kapacitet.

Den lange levetid af afløbssystemer gør at det er nødvendigt at tænke langsigtet ved planlægning af afløbssystemer. Hovedkloaksystemet ligger i mange byer stort set som da det oprindelige system blev projekteret for 100-150 år siden og der er ikke plads til at ændre væsentligt på ledningssystemet i bycentrene. Det skyldes at de offentlige arealer også anvendes til anden infrastruktur, f.eks. forsyning med drikkevand, el, varme og telefon. Ved planlægning af ændringer i hovedkloaksystemets ledningsføring er det derfor nødvendigt at indtænke klimaændringer også på langt sigt. Samtidigt kan man ved at tænke langsigtet sikre sig en vifte af muligheder i form af lokale tiltag, fleksible arealanvendelser mv. hvorved det sikres at der er andre muligheder end en justering på afløbssystemets kapacitet.

Klimaændringer er ikke den eneste variabel der er væsentlig når fremtidens afvanding af byer skal fastlægges. Samfundet udvikler sig generelt og det påvirker i høj grad borgernes syn på den service der skal leveres af det offentlige afløbssystem. I flere generationer har det været normen at kommunale afløbskontorer leverede en service uden at inddrage borgerne ret meget i overvejelser omkring kvaliteten af ydelsen.

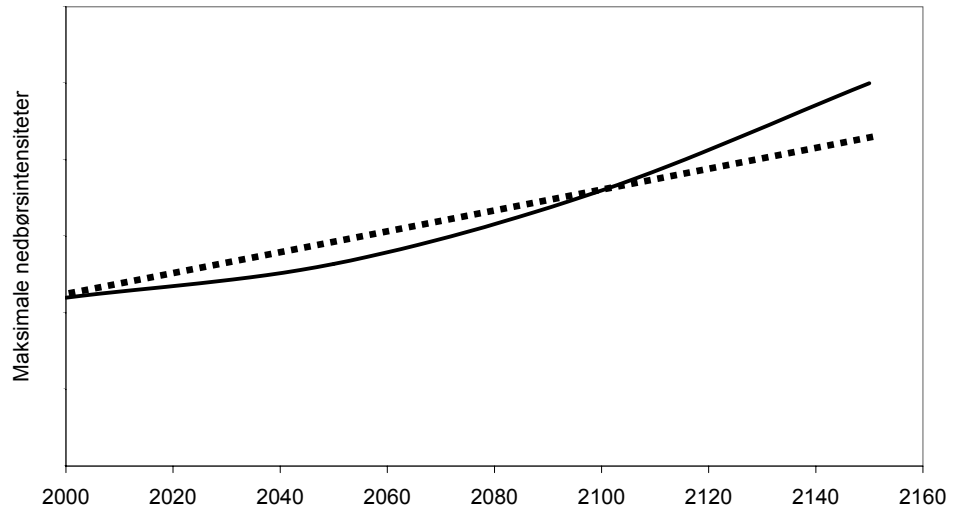
Klimaændringer kan være med til at sætte fokus på en debat om serviceniveau for afvanding af byer med regn- og spildevand. Hvis afløbssystemet skal ændres markant vil det være nødvendigt at gentænke systemet igen for at finde ud af hvilket serviceniveau man bør tilstræbe og hvordan det sikres. I den proces vil det være naturligt at se på borgernes behov og betalingsvillighed i forhold til forskellige serviceniveauer. I Tabel 1 er angivet et forslag til tre niveauer af borgerinddragelse og et forslag til hvor store klimaændringerne skal være før det er nødvendigt at inddrage andre aktører i problemstillingen. Der kan være mange grunde til at man ønsker at inddrage borgerne. Tabellen skal derfor tolkes som et forslag til "minimums-niveau" af borgerinddragelse - ikke et forslag til aktuelt niveau af borgerinddragelse.

Tabel 1 Grov inddeling af de muligheder man kan anvende når afløbssystemer skal dimensioneres og analyseres. Det skal understreges at selv om tabellen tager udgangspunkt i et "minimums-niveau" for inddragelse af borger og andre interessenter er det ikke udtryk for at dette er ønskeligt.

Forventet ekstra belastning af afløbssystemers	Metode til at indtænke forventede klimaændringer i forbindelse med dimensionering og analyse af afløbssystemer
Mindre effekt	Konsekvenserne er på niveau med usikkerheden på andre væsentlige variables åsom udstykning af nye boligområder, ændringer i anvendelser af haver mv.
Mellem effekt	Konsekvenserne er væsentlige og vil i nogle tilfælde få væsentlig indflydelse på valg af løsning og pris for udførelse og vedligeholdelse. Som minimum skal det politiske niveau inddrages.
Væsentlig effekt	Konsekvenserne er så store at det får konsekvenser for indretningen af afløbssystemer generelt. Der bør udføres analyser af betalingsvillighed som led i diskussion af serviceniveau, metoder til at gøre byområder mere robuste undersøges mv.

I Tabel 1 er angivet den forventede ekstra belastning af afløbssystemets komponenter som følge af klimaændringer i løbet af komponentens levetid. Forskellige komponenter har meget forskellige levetider og derfor vil de blive klassificeret forskelligt. Som yderpunkter kan angives at ledningstrace med ret stor sikkerhed vil være i det niveau hvor der er de største konsekvenser mens f.eks. pumpestationer og SRO-udstyr vil være i det niveau hvor der ikke er behov for at indtænke klimaændringer i designet. Der bør dog som tænkes langsigtet med hensyn til at sikre, at der er plads til fremtidige anlæg.

Hastighed i ændring i ekstreme regnintensiteter



Figur 3 Skitse af muligt forløb af klimaeffekten på ekstremregn. Det må forventes at der i de første år vil ske en langsommere udvikling end senere. Endvidere forventes det at klimaændringerne vil fortsætte også efter år 2100.

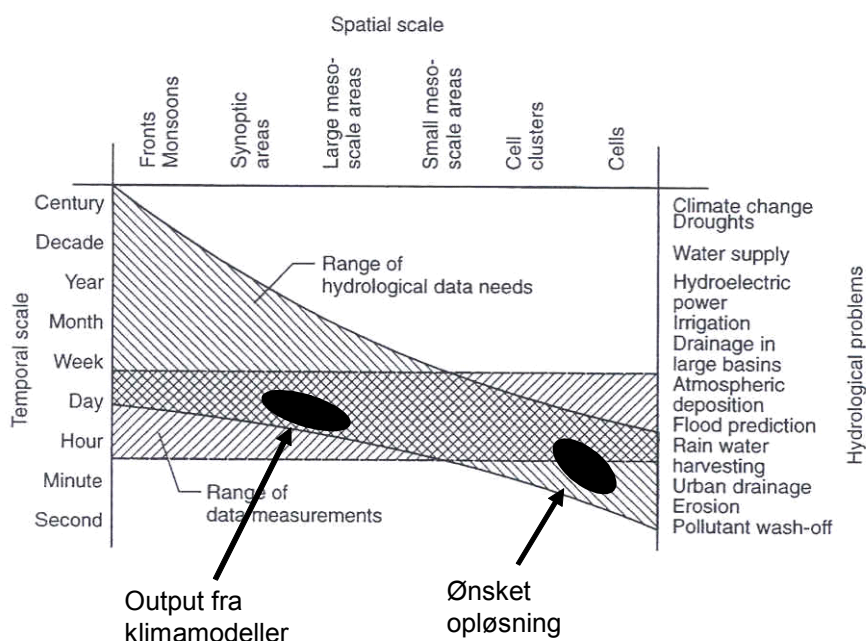
Det vil også være vigtigt at identificere hvor hurtigt ændringerne sker. Det skyldes både de forskellige levetider af de forskellige komponenter og ønsket om at vide hvor hurtigt det er nødvendigt at implementere ændringerne i at håndtere ekstremregn i byområder. På Figur 3 er angivet forskellige mulige forløb af klimaændringerne. Det vil være væsentligt at få et 3. punkt på kurven så man kan identificere kurvens forløb bedre.

3 Fysiske egenskaber ved nedbør i Danmark

Både samfundets og naturens udnyttelse af vandkredsløbet er optimeret til den aktuelle nedbør. Selv mindre forskydninger i nedbørens egenskaber og dermed vandkredsløbet kan derfor få væsentlig betydning for flora, fauna og vores samfund..

3.1 Valg af temporal og spatial skala

På Figur 4 er angivet de skalaer for nedbør der er relevant i denne rapport. Det fremgår at der er stor forskel på de data der aktuelt kan ekstraheres fra klimamodeller og de data der er behov for ved analyse og dimensionering af afløbssystemer. Målet med nærværende litteraturstudie er at finde metoder der entydigt og med mindst mulig usikkerhed kan oversætte egenskaber fra det ene markerede område til det andet.



Figur 4 Temporal og spatial skala for forskellige typer af processer der er relevante i forbindelse med regnvejr. Området hvor klimamodeller producerer estimater af strukturen af nedbør er angivet i figuren sammen med den opløsning af data som er nødvendig for at kunne analysere påvirkningen på oversvømmelses- og forureningsproblematikken i byer. Figuren er taget fra Arnbjerg-Nielsen (1996).

I de regionale og globale klimamodeller er generering af nedbør som oftest beskrevet ud fra grundlæggende fysiske processer og tilstande, såsom fordampning og vandindhold i luften. Den "overskydende" del af vandindholdet registreres herefter som nedbør.

Afhængigt af tidsmæssig og spatial opløsning af modellen kan der simuleres vidt forskellige mængder nedbør. I Christensen og Christensen (2001) er der lavet en sammenligning mellem daglig nedbør over Danmark hvor der er benyttet samme beskrivelse af generering af nedbør, men med forskellig tidsmæssig og spatial opløsning af klimamodellerne. De finder at der er væsentlig forskel på de ekstreme nedbørsmængder også selv om resultaterne fra modeller med høj opløsning aggregeres til samme opløsning som de grove modeller benytter. De tolker resultatet således at alene forskellen i opløsning medfører mulighed for en hyppigere og kraftigere aktivitet i nedbørsgenereringen ligesom lokale effekter beskrives bedre.

3.2 Typer af regnvejr i Danmark

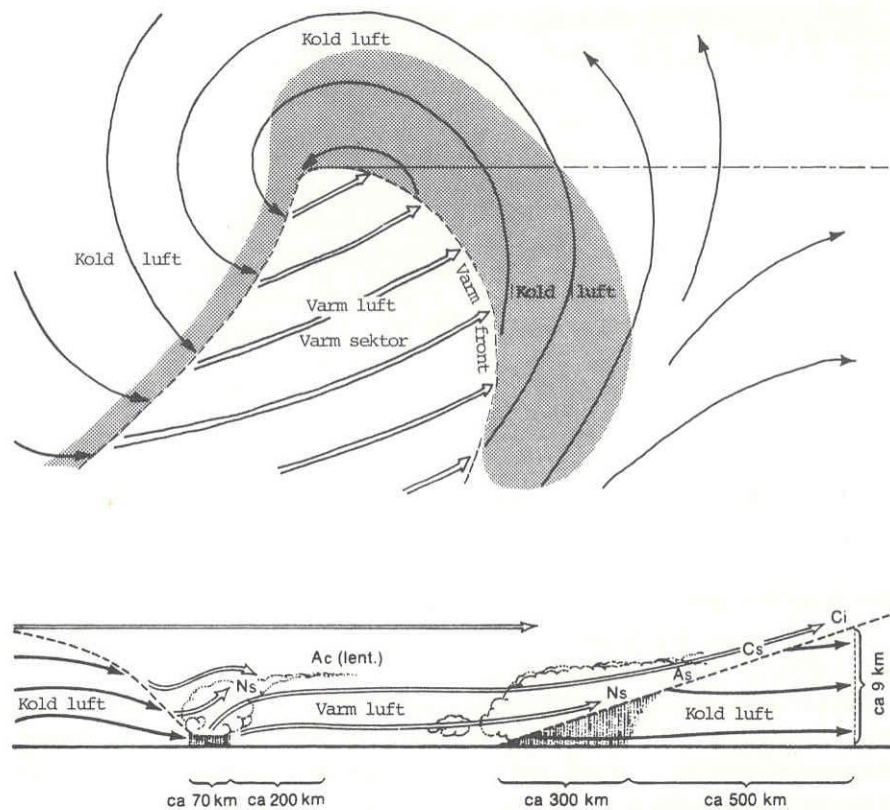
Der er to hovedtyper af regnvejr i Danmark, konvektiv regn og frontregn. De to typer kan forefindes i rene former eller i form af blandet nedbør, hvor begge typer af nedbør kan forekomme.

3.2.1 Konvektiv regn

Konvektiv regn opstår ved lokal opvarmning af en luftmasse. Luftmassen stiger hurtigt til vejrs, hvorved den afkøles og bliver overmættet med vand. Den overmættede luftmasse bliver herved ustabil, hvorved der kan forekomme kortvarige perioder med kraftig nedbør. Konvektiv regn består af klynger af nedbørsceller. Hver enkelt celle har typisk en levetid på 20-40 minutter og en udbredelse på få km². Cellerne optræder ofte sammen i klynger som totalt kan have en levetid på en times tid og have en udbredelse på op til 100 km². Niemczynowicz (1990) har ved studier af regnhændelser i Lund beregnet den gennemsnitlige hastighed for celler til ca. 10 m/s. Et bestemt punkt på jordoverfladen passerer dermed af en celle i løbet af få minutter.

3.2.2 Frontregn

Frontregn optræder når varm luft fra troperne møder kold luft fra polerne. Den varme luft presses op over den kolde luft, hvorved den afkøles. Derved bliver luften overmættet med vand, der udfælder i form af nedbør. Almindeligvis opstår fronterne i et bælte mellem det nordlige Frankrig i syd og det sydlige Norge i nord. Danmark er derfor midt i bæltet og en væsentlig del af den danske nedbør er frontregn. Typisk optræder der både en varmfront og en koldfront sammen, se Figur 5. Varmfronten medfører ofte stille dagsregn, mens koldfronten typisk består af byger med højere intensiteter. Der optræder jævnligt konvektiv nedbørsaktivitet i båndlignende strukturer, primært i koldfronterne.



Figur 5 Strukturen af et vandrende lavtryk med fronter og skyformer. Figuren er fra Jensen *et al* (1984).

3.3 Opsamling

Klimamodeller er baseret på globale eller regionale vejrmodeller. Deres temporale og spatiale opløsning er væsentligt dårligere end det der er behov for når klimaændringernes betydning for forekomst af ekstremregn i høj tidsmæssig og spatial opløsning skal vurderes.

Man skal ved vurderingen af metoderne være specielt opmærksom på, at de konvektive processer, der vurderes at være afgørende for ekstreme hændelser, ikke optræder direkte i klimamodellerne.

4 Skalering af regn

I nærværende kapitel fokuseres på metoder der med succes er blevet anvendt til at skalere nedbør over tid og/eller areal. Der er fokuseret på en overordnet beskrivelse af metoderne svarende til det stadiet de aktuelt er på.

4.1 Metoder til skalering over tid

Formålet er generelt at kunne udnytte egenskaber ved regn til at udtale sig om regndata i høj opløsning på baggrund af målinger i lav opløsning. Der er i afsnittet fokuseret på metoder der er testet på baggrund af målinger af ca. 1 times varighed ned til 2-10 minutter.

4.1.1 Markov-kæder

Markov-kæder benyttes ofte til at beskrive stokastiske processer der skifter mellem en række diskrete tilstande. Der er mange eksempler på anvendelse til at beskrive skift mellem regnvejrsdage og tørvejrskdage. Man estimerer for hver tilstand sandsynligheden for at blive i tilstanden eller at skifte til en anden tilstand givet det nuværende og tidligere tidsskridt.

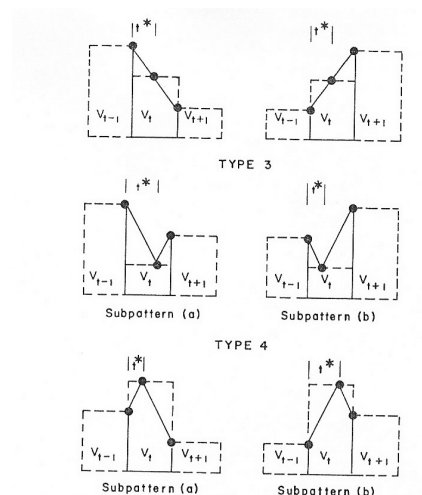
Srikantahan og McMahon (1983) genererer lange kunstige regnrækker ved hjælp af tre markov-kæde modeller. Den første markov-kæde model beskriver sandsynligheden for at skifte mellem tørre, våde og meget våde dage. Den anden markov-kæde model simulerer 24 time-værdier givet årstiden, lokaliteten samt værdien af den første markov-kæde. Den tredje markov-kæde model genererer data i 6 minutters opløsning. Der er fire markov-kæder, afhængigt af hvor stort regnvolumen der er den pågældende time. For hver af disse fire kæder er der mulighed for at skifte mellem 7 tilstande, der hver især repræsenterer en regnintensitet for de pågældende 6 minutter. For hver time justeres voluminet af de 10 6 minutters intervaller lineært så der er overensstemmelse mellem regnvoluminet på 6 minutters skala og 1 times skala.

Arnbjerg-Nielsen (1996) beskriver en metode til generering af regnserier i Danmark ved hjælp af Markov-kæder. Metoden kan med god tilnærmelse generere lange regnserier med samme opløsning som en målt regnserie. Metoden er ikke færdigudviklet, hvilket betyder at det kun er muligt at generere en regnserie til forlængelse af en allerede målt historisk regnserie.

Markov-kæder kan også bestå i modeller med flere lag, f.eks. ved at Markov-kæden består af spring imellem tilstande i en Poisson-proces. Dermed kan processen i en vippekarsmåler modelleres direkte. Onof et al (2002) beskriver et eksempel på en sådan model, hvor "ankomsten" af 0,2 mm regn modelleres direkte som en Poisson-proces med tre diskrete tilstande. Der er ikke fundet litteratur der beskriver hvordan sådanne modeller kan generaliseres.

4.1.2 Stokastisk simulering

Ormsbee (1989) evaluerer en række metoder til at disaggregere regn, fra deterministiske metoder til flere typer af stokastiske metoder. Han ender med at anbefale en metode hvor den målte mængde regn pr time opdeles i en række små regnpulser på f.eks. 0,25 mm. Endvidere opdeles hver time i et antal ens intervaller af f.eks. 5 minutters varighed. Afhængigt af mængden af regn i den pågældende time, timen før og timen efter defineres herefter en tidsvarierende fordelingsfunktion, der angiver sandsynligheden for at hver af de små regnpulser falder i det pågældende interval. Princippet er illustreret i nedenstående figur. Der udtrækkes herefter tilfældigt et antal små regnpulser svarende til det totale volumen. Hver af disse små regnpulser placeres tilfældigt i et af intervallerne på baggrund af den tidsvarierende fordelingsfunktion. Ormsbee tester metoden på flere regnserier i Kentucky og West Virginia i USA og påviser at metoden giver en væsentlig forbedring ved simulering af ekstremregn, om end metoden stadig underestimerer de kraftigste regn. Metoden er anvendt i den engelske softwarepakke STORMPAC (WRc, 1996).



Figur 6 Visualisering af ændringen i fordelingsfunktion i løbet af en tidsenhed som funktion af "nabo-tidsenheder". Figuren er fra Ormsbee (1989).

Koutsoyiannis (1994) udvikler dimensioneringsregn ved at disaggregere en regnrække. På baggrund af et konkret opland fastlægges den kritiske koncentrationstid og det tilhørende dimensionsgivende volumen. Herefter konstrueres flere dimensioneringsregn (hyetografer) der alle har den korrekte varighed og volumen. Hans grundlæggende model for regnvejr er en proces, hvor en intensitet beregnes som en procentdel af intensiteten i det foregående tidsskridt (en AR(1)-proces) samt en ny regnintensitet, V_i :

$$X_i = aX_{i-1} + V_i$$

hvor V_i følger en to-parameter gamma-fordeling. Der simuleres et måletidsskridt af gangen og for hvert måletidsskridt skaleres voluminet så det passer med det målte. Koutsoyiannis diskuterer at der er problemer med stringensen af den matematisk-statistiske formulering af metoden og argumenterer for at metoden i praksis har vist sig at være god.

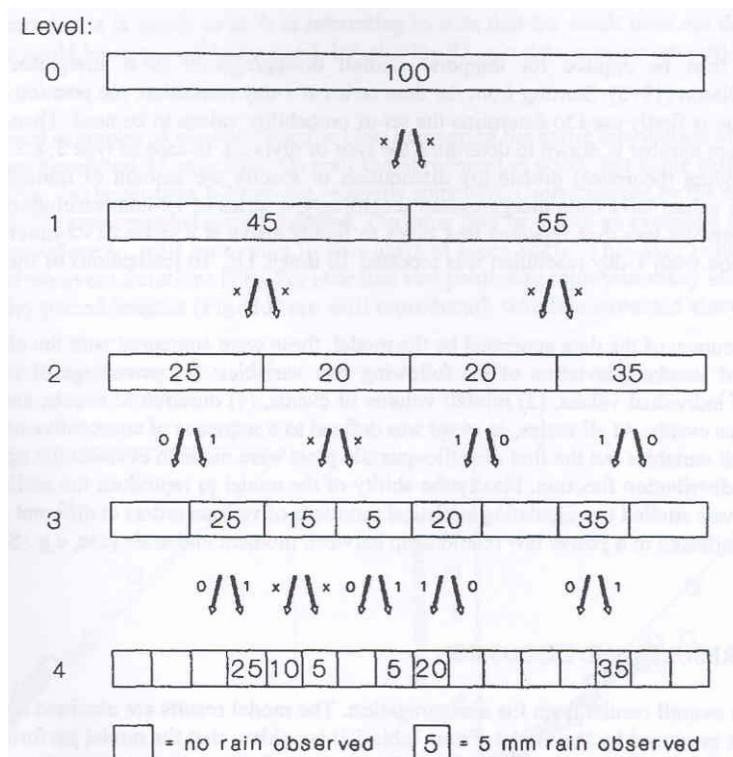
Koutsoyiannis og Onof (2001) beskriver en metode til stokastisk simulering der er baseret på Bartlett-Lewis modellen (Se bilag A). Metoden beskrives som egnet til at nedskalere fra f.eks. dagsregn til timeværdier. Metoden består i at tage udgangspunkt i en serie af punktmålinger af dagsregn. For hver

sekvens af våde dage foretages flere simuleringer med Bartlett-Lewis modellen indtil der er en sekvens af dagsregn der minder om den faktisk registrerede dagsregn. Herefter skaleres simuleringen proportionalt så simuleringen passer med det registrerede volumen idet der tages hensyn til tørvejrperioder.

4.1.3 Kaos-teori/Kaskade-modeller

Skalering er baseret på kaos-teori, altså at nogle processer har den egenskab at de over mange skalaer har samme egenskaber. Flere undersøgelser har sandsynliggjort at regnvejr kan beskrives ved hjælp af kaos-teori. Den matematiske beskrivelse af kaos-teori vil ikke blive gennemgået her.

En særlig form for kaos-model er kaskade-modeller. Olsson og Berndtsson (1988) undersøger en kaskade-model til at disaggregere regnhændelser. Modellen tager udgangspunkt i den målte nedbør pr. tidsskridt, f.eks. en time. Dernæst deles dette tidsskridt op i to lige store intervaller, altså 30 minutter. Nedbøren kan herefter placeres i det første interval (benævnes (0,1)), det andet interval (benævnes (1,0)) eller fordeles mellem intervallerne (benævnes (x,x)). Sandsynligheden for hvilken af metoderne nedbøren fordeles på estimeres på baggrund af de tidsskridt som man kan aggegere målinger på i den region der ønskes data fra. Metoden med at opdele hvert interval i to sub-intervaller fortsættes indtil den ønskede tidsmæssige opløsning er opnået. Princippet er illustreret i nedenstående figur. Metoden testes ved sammenligning af middelværdi og spredning med faktiske regnhændelser med hensyn til fordelingen mellem regnvejr og tørvejr, volumen pr. tidsskridt og pr. hændelse samt hændelsers varighed. Endelig sammenlignes fraktal-plots for de samme variable. Der påvises en god overensstemmelse mellem den faktisk observerede regnserie og den simulerede regnserie.



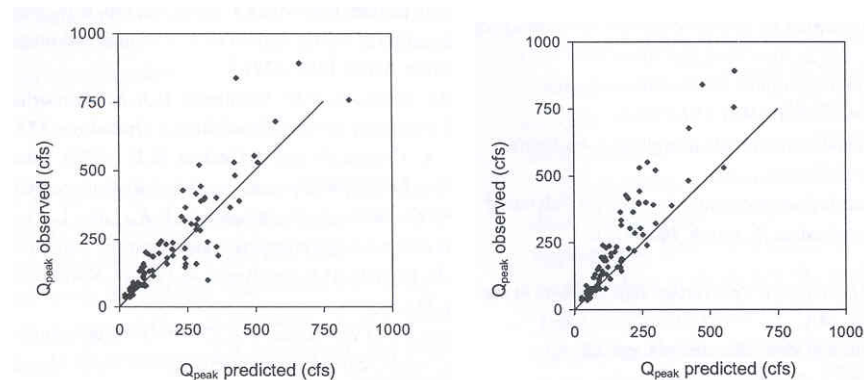
Figur 7 Principel struktur af kaskade-modellen fra Olsson og Berndtsson (1998). Hver kasse i niveau 4 svarer til 3,75 minutter, der så kan integreres til 5 minutters tidsskridt.

Onof *et al* (2005) beskriver en alternativ kaskade-model der kun benytter en enkelt opdelingsfunktion. Mængden af nedbør fordeles i de to intervaller pr. opdelingsniveau efter en log-Poisson fordeling med middelværdi 1. Efter at have skaleret ned fra 1 time til 3,75 minutter interpoleres til 5 minutters intervaller, hvorefter nedbøren filtreres som om den var målt med en vippekars-regnmåler med et volumen på 0,2 mm.

Onof *et al* sammenligner metoden med metoden beskrevet i Ormsbee (1989) og konkluderer at kaskade-modellen er overlegen såvel med hensyn til at genskabe regnens tidsmæssige forløb som med hensyn til at genskabe de ekstrem-statistiske egenskaber for korte varigheder. Metoden indgår i TSRSim, et kommercielt tilgængeligt software der kan benyttes til at generere kunstige regndata i Storbritannien i høj opløsning under hensyntagen til forskellige klimaeffekter (Wallingford, 2005).

4.1.4 Neurale netværk

Burian og Durrans (2002) undersøger hvorvidt et feed-forward neuralt netværk er i stand til at disaggregere fra 1 time til 15 minutter på baggrund af en række data fra det sydøstlige USA. Input til det neurale netværk er den akkumulerede nedbør i den time der skal aggregeres og den registrerede nedbør i timen før og timen efter. Output er de 4 intensiteter svarende til et tidsskridt på 15 minutter. Burian og Durrans sammenligner med to andre deterministiske metoder til disaggregering og konkluderer at metoden har en relativt lille systematisk underestimering af de maksimale vandføringer. På figur (nedenfor) er angivet faktiske og simulerede værdier for maksimal afstrømning fra et hypotetisk opland. Det fremgår af figuren at der er en tendens til at underestimere kraftige vandføringer.



Figur 8 Skatterplot af maksimal afstrømning efter disaggregering som angivet i Burian og Durrans (2002) og efterfølgende simulering via en afstrømningsmodel for afløbssystemer på et hypotetisk opland på 200 hektar. Figuren til venstre er simuleret med neurale netværk mens figuren til højre er disaggregeret med en geometrisk på baggrund af en metode beskrevet i Ormsbee (1989). Det ses at de neurale netværk har en mindre tendens til at underestimere de væsentlige hændelser.

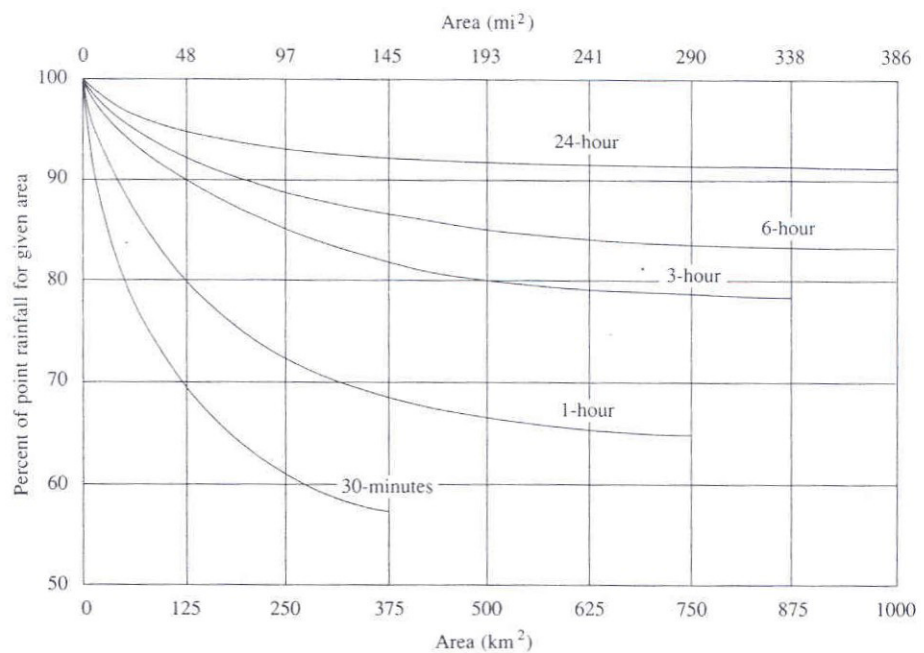
Wending and James (2002) undersøgte to typer af neurale netværks evne til at disaggregere data fra 1 time til 5 minutter. Ingen af de to metoder var bedre egnet til disaggregeringen end Ormsbees metode (Ormsbee, 1989).

4.2 Skalering af regn over areal

4.2.1 Areal Reduction Factor

Der er historisk benyttet regnmålere til at dimensionere afstrømning fra meget store områder. I den forbindelse har man søgt at etablere sammenhæng mellem punktmålinger og fladenedbør. Denne sammenhæng består i en faktor der ganges på den dimensionsgivende regnintensitet.

Den første store bearbejdning af areal-reduktions-faktorer er afrapporteret i US Weather Bureau (1957) og er baseret på netværk af regnmålere i det østlige UDA. Metoden og de udarbejdede sammenhænge benyttes stadig ved dimensionering og såvel World Meteorological Organisation som anerkendte lærebøger (Chow *et al.* 1988) henviser til de kurver som er udarbejdet i den forbindelse.



Figur 9 Sammenhæng mellem punkt-måling og flademåling. Figuren er taget fra Chow *et al.*(1988)

I et britisk studie (NERC, 1975) blev der også estimeret ARF-kurver. Der blev i dette studie fundet en væsentlig afhængighed af den dimensionsgivende varighed. Dette er også bekræftet af en dansk bearbejdning af ekstremregn (Mikkelsen *et al.* 1999).

Tabel 2 Anbefalede ARF for Storbritannien, baseret på NERC 1975. Tabellen er fra Wilson (1990).

Duration <i>D</i>	Area <i>A</i> (km ²)									
	1	5	10	30	100	300	1000	3000	10 000	30 000
1 min	0.76	0.61	0.52	0.40	0.27	–	–	–	–	–
2 min	0.84	0.72	0.65	0.53	0.39	–	–	–	–	–
5 min	0.90	0.82	0.76	0.65	0.51	0.38	–	–	–	–
10 min	0.93	0.87	0.83	0.73	0.59	0.47	0.32	–	–	–
15 min	0.94	0.89	0.85	0.77	0.64	0.53	0.39	0.29	–	–
30 min	0.95	0.91	0.89	0.82	0.72	0.62	0.51	0.41	0.31	–
60 min	0.96	0.93	0.91	0.86	0.79	0.71	0.62	0.53	0.44	0.35
2 h	0.97	0.95	0.93	0.90	0.84	0.79	0.73	0.65	0.55	0.47
3 h	0.97	0.96	0.94	0.91	0.87	0.83	0.78	0.71	0.62	0.54
6 h	0.98	0.97	0.96	0.93	0.90	0.87	0.83	0.79	0.73	0.67
24 h	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.92	0.89	0.86	0.83	0.80
48 h	–	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.91	0.88	0.86	0.82
96 h	–	–	0.99	0.98	0.97	0.96	0.93	0.91	0.88	0.85
192 h	–	–	–	0.99	0.98	0.97	0.95	0.92	0.90	0.87
25 days	–	–	–	–	0.99	0.98	0.97	0.95	0.93	0.91

Sivapalan og Blöschl (1998) udvikler en ARF-metode baseret på en analyse af korrelationsstrukturen mellem netværk af regnmålere. Metoden er udviklet specielt til brug for ekstremregn. De definerer en spatial korrelationsafstand (et mål for hvor hurtigt korrelationen mellem regnmålere falder som funktion af afstand) som en eksponentielt aftagende funktion der har værdien 1 i afstanden 0. På baggrund af de teoretiske egenskaber ved modellen samt en analyse af data fra Østrig konkluderer de at ARF varierer også som funktion af gentagelsesperioden. De argumenterer endvidere for, at den spatiale korrelationsafstand er en mere grundlæggende egenskab ved regnvejr end tidsafhængigheden som defineret i f.eks. NERC (1975) fordi den spatiale korrelation kan relateres til vejrtypen.

Asquith og Famiglietti (2000) udarbejder en metode til at estimere ARF på baggrund af empiriske korrelationer mellem regnmålere i et netværk. De tager udgangspunkt i en ekstremhændelse for en konkret regnmåler og søger derefter at estimere den arealmæssige udbredelse. Deres resultater understøtter Sivapalan og Blöschls antagelse om ARF's afhængighed af gentagelsesperiode. De sammenligner endvidere deres arbejde med andre undersøgelser, se Tabel 3.

Tabel 3 Sammenligning af forskellige metoder til bestemmelse af ARF baseret på regnmålinger i hhv. USA, USA og Østrig. Adapteret fra Asquith og Famiglietti (2000).

Area for Houston (km ²)	Annual-maxima centered 2-year or greater ARF	TP-29 (US Weather Bureau, 1958)	ARF from Sivapalan and Blöschl (1998)	
			Spatial correlation length, $\lambda = 16$ km, and $T = 1.5$ years	Spatial correlation length, $\lambda = 8$ km, and $T = 1.5$ years
2.59	0.96	1.0	0.96	0.95
25.9	0.88	0.99	0.93	0.87
259.0	0.77	0.94	0.80	0.68
2590.0	0.61	0.91	0.58	0.45

Jørgensen og Johansen (2002) estimerer ekstremværdier for gennemsnitlig nedbør over et kvadratisk opland på 625 km² i København og den tilsvarende gennemsnitlige ekstremregn som punktmåling. På den baggrund kan ARF-kurver for Københavnsområdet beregnes. ARF-værdier for varigheden 1 og 3

timer og gentagelsesperioderne 1 og 10 år stemmer meget fint overens med de anbefalede ARF-værdier fra Storbritannien angivet i Tabel 2.

4.2.2 Skalering af variable

Onof et al (2002) estimerer en Bartlett-Lewis model (Se Bilag A) for regnserier på regnserier fra regnmålere og fra klimamodeller med en arealmæssig opløsning på 50x50 km for 7 lokaliteter i Storbritannien. Parameterværdierne varierer dog ganske kraftigt mellem de enkelte lokaliteter og der gøres ikke noget forsøg på at beskrive parametervariationen. Studiet er yderligere omtalt i afsnit 5.3.

4.2.3 Areal Reduction Factor kombineret med kaos-teori

Michele et al (2001, 2002) arbejder videre på grundlaget i Sivapalan og Blöschl (1998) i en kaos-teoretisk ramme. Ud fra en antagelse om en sammenhæng mellem skaleringssegenskaber for regn mellem tidsskalaen og areal-skalaen og en antagelse om at ekstremregn følger en log-normal fordeling udvikles både regnrækker (sammenhæng mellem intensitet, varighed og frekvens for punktmålinger) samt regnrækker for områder med en arealmæssig udbredelse. På den baggrund estimeres ARF-funktioner analytisk som funktion af varighed og areal. Ved anvendelse af modellen på data fra Milan og Storbritannien (NERC, 1975) konkluderes det at der er god overensstemmelse mellem observationerne og modellens teoretiske værdier.

4.3 Skalering af regn over tid og areal

Der har de sidste 25 år været megen forskning i de fysiske mekanismer der genererer regnvejr ved jordoverfladen. Metoderne omfatter en række af de mest avancerede og nye matematiske metoder som er blevet anvendt indenfor hydrologien de seneste år, herunder stokastiske modeller, geospatiale modeller, neurale netværk og brug af kaos-teori.

For nogle af metoderne begynder der at være resultater og det indebærer typisk at der opnås en ny indsigt som kan anvendes til at forstå de komplicerede processer omkring generering af nedbør. Nedenfor angives kort resultater fra de områder hvor der begynder at være operationelle resultater.

Cowpewart *et al* (2002, 2004) udvikler en Neymann-Scott model for regn med spatial udbredelse. De analyserer modellen og validerer den ved at estimere parametrene i modellen på baggrund af timeværdier af målinger fra et netværk af regnmålere og sammenligne med de målte værdier med en tidsopløsning på 5 minutter. Sammenligningen sker dels ved at sammenligne egenskaber ved målt og simuleret regn for hver regnmåler samt ved at simulere afstrømning og overløb fra det fælleskloakerede afløbssystem i oplandet. Der er generelt en god overensstemmelse imellem modellens resultater og observationerne.

Umakhanthan og Ball (2002) undersøger nedbørsfelters udbredelse ved hjælp af geospatiale metoder. På baggrund af semi-variogrammer opdeles hændelser i 4 forskellige typer af hændelser på baggrund af den spatiale og temporale variation. Det er dog ikke angivet hvordan informationen kan udnyttes til at skalere hændelser mere præcist.

Skalering ved hjælp af en udvidelse af kaos-teorien beskrevet i afsnit 4.1.3 er beskrevet teoretisk. Der er dog ikke fundet anvendelser hvor nedbør er skaleret i tid og areal ved brug af af kaos-teori bortset fra de metoder der blev beskrevet i afsnit 4.2.3.

Det skal bemærkes at manglen på gode anvendelser og en hurtig udvikling af en passende teoretisk ramme for at skalere nedbør i tid og areal også er relateret til mangel af gode målinger af den faktiske nedbør i tid og sted i en passende opløsning. Et netværk af regnmålere er sjældent stort nok og med passende høj densitet. Målinger med vejrradar giver en god information om den tidsmæssige og spatiale udbredelse af regnen, men desværre kun en ringe information om nedbørsintensiteterne og ofte i en opløsning der er for grov til formålet.

5 Metoder til generering af fremtidige ekstremregn påvirket af klimaændringer

5.1 Direkte korrelation til parametre i regionale klimamodeller

Nedbør er ikke en af de parametre der benyttes ved kalibrering af globale og regionale klimamodeller. Derfor kan der være store forskelle mellem simulerede og faktiske værdier i "status"-simuleringerne. Det har medført at nogle har undersøgt muligheden for at korrelere til forskellige parametre i klimamodellerne i stedet for at arbejde på de tidsserier af regn som modellerne producerer. Det er muligt at sådanne hybrid-modeller aldrig vil blive relevante ved modellering af klimaeffektens betydning for ekstremnedbør i høj opløsning. Det bør dog nævnes at der findes sådanne metoder og at urbanhydrologer undersøger potentialet. Nedenfor er refereret de to anvendelser som er fundet i litteraturen.

I Olsson *et al* (2004) beskrives en anvendelse af neurale netværk der direkte korrelerer nedbør direkte med klimamodeller ved at korrelere til vindhastigheden og vandindholdet i gridpunkterne i bestemte niveauer. Der mangler dog stadig meget arbejde før studiet kan anvendes operationelt.

Bechmann og Buishand (2002) benytter den relative fugtighed ved 700 hPa til at bestemme dels andelen af våde dage og dels mængden af nedbør pr. dag givet at det er en våd dage. Forskellige sæsoner analyseres separat.

5.2 CASE: Analyse af klimaeffekter på ekstremværdier

Jørgensen og Johansen (2004) har på baggrund af DMIs regionale klimamodel undersøgt hvorledes ekstremregn påvirkes af klimaeffekter i Danmark. Som input til analysen har de dels benyttet simulerede regndata fra klimamodellen (opløsning 1 time og 25x25 km) for fire lokaliteter og dels regndata fra Spildevandskomiteens regnmålersystem (opløsning 1 minut og punktmåling). Sidstnævnte data har den nødvendige og tilstrækkelige opløsning til at dimensionere afløbssystemer med.

Jørgensen og Johansen har som formål at transformere output fra DMIs regionale klimamodel så de er egnede til dimensionering og analyse af afløbssystemer. Resultatet af projektet er en sammenhæng mellem intensitet og gentagelsesperioder op til 15 år for punktmålinger i København for varighederne 1, 3, 6, 12 og 24 timer for nutiden og i slutningen af det 21. århundrede. På den baggrund kan der genereres regnrækker til dimensionering og analyse af afløbssystemer. De forventede ændringer af ekstremregn i Storkøbenhavn er angivet i Tabel 4.

Tabel 4 Forventede øgede nedbørsmængder for punktregn i Københavnsområdet som funktion af tid og gentagelsesperiode. Data fra Jørgensen og Johansen (2004)

	1 time	3 timer	12 timer
2 år	21 %	22 %	21 %
5 år	81 %	65 %	18%
10 år	83 %	65 %	36 %

Der arbejdes direkte på de ekstreme regnintensiteter som observeret/modelleret i hver af modellerne. Derved kommer metoden til at bestå af 3 trin:

1. Sammenhængen mellem punktmåling og flademåling for ekstremregn estimeres for forskellige varigheder og gentagelsesperioder på baggrund af data fra 16 regnmålere i Københavnsområdet fra Spildevandskomiteens regnmålersystem.
2. Ændringerne i ekstremregn i den beregningspixel der dækker det tilsvarende område i DMI's regionale klimamodel estimeres for forskellige varigheder og gentagelsesperioder.
3. Sammenhængen mellem flademåling og punktmåling for ekstremregn estimeres for forskellige varigheder og gentagelsesperioder på baggrund af data fra regnmålere i Københavnsområdet fra Spildevandskomiteens regnmålersystem.

Trinene er skitseret i Figur 10. Hvert af trinene gennemgås nedenfor:

ad 1.

Den valgte metode består af en empirisk bearbejdning af aktuelle regnserier fra 16 Københavnske målere med henblik på at beregne et fladeestimat for varighederne 1, 3, 6, 12 og 24 timer for alle regnhændelser. På den baggrund fastlægges ekstremstatistikken.

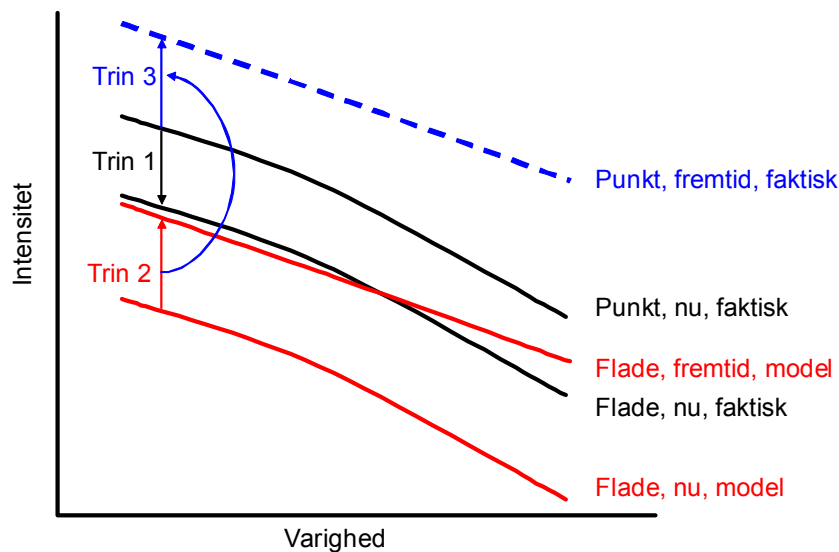
ad 2.

Klimaændringernes effekt på ekstremregn beregnes som en procentvis ændring for hver varighed og gentagelsesperiode. Den procentvise ændring benyttes til at beregne fremtidige fladeestimer for hver varighed og hver gentagelsesperiode.

ad 3.

Forholdet mellem punktnedbør og arealnedbør beregnes for hver varighed og gentagelsesperiode på baggrund af de aktuelle målinger fra Spildevandskomiteen. Som estimat på ekstreme punktregn benyttes den gennemsnitlige ekstremværdi af de 16 regnmålere der indgår i undersøgelsen. Der er i analysen i praksis tale om beregning af en arealreduktionsfaktor.

Regnrække for gentagelsesperiode T



Figur 10 Skitse der illustrerer den metode der anvendes af Jørgensen og Johansen (2004). Som pilene illustrerer foregår beregningen for given varighed og gentagelsesperiode.

Der er en række elementer i analysen som bør fremhæves:

- Der argumenteres ikke for hvorfor der benyttes proportionale forskydninger i trin 2 og 3. Ved trin 2 argumenterer forfatterne for at der er proportionalitet mellem logaritmerede værdier, hvorefter der regnes med proportionalitet mellem ikke-transformerede værdier.
- Der er en meget stor forskel på ekstreme værdier af fladenedbør beregnet i den regionale klimaregn og observeret empirisk. Forskellen er mindst af samme størrelsesorden som den klimaeffekt der beregnes. Det betyder at der er stor usikkerhed på beregningen i trin 3.
- Klimaeffekterne kvantificeres i København. Det er det sted hvor klimaændringerne formodes at være størst. Endvidere er klimaeffekterne baseret på et scenarium med relativt kraftige klimaændringer (A2).

Med disse forbehold in mente skal det pointeres, at arbejdet fremstår som et sammenhængende bud på en kvantificering af klimaeffekter på ekstremregn til analyse og dimensionering af afløbssystemer i Danmark. Ændringen af intensiteterne forårsaget af klimaændringer estimeres til 25 - 80% for Københavnsområdet for 1 times varighed af ekstremregnen. Det svarer til at en intensitet der i gennemsnit aktuelt overskrides 1 gang hvert 10. år i slutningen af århundredet forventes at blive overskredet ca. 1 gang hvert 3.4 år.

5.3 CASE: Analyse af klimaeffekter på regnserier

Der har i mere end 20 år været et værktøj til generering af kunstige regnserier for vilkårlige lokaliteter i Storbritannien. Formuleringen af dette værktøj er beskrevet i Bilag A. Der tages naturligt udgangspunkt i denne metode når effekten af klimaændringer skal kvantificeres i Storbritannien. Det er tidligere påvist at de modeller som anvendes til at generere kunstige regnserier med ikke kan bruges direkte til at simulere regn i højere tidsopløsning end 1 time.

Højere tidsopløsning opnås ved disaggregering af de genererede kunstige regnserier ved hjælp af metoderne beskrevet i afsnit 4.1.

Den regionale model for regnserier i Storbritannien beskriver ikke alle områder lige godt. Derfor defineres det aktuelle formål med projektet til at vurdere klimaeffekter for de lokaliteter der har en lokal regnmåler. Dermed benyttes egenskaberne ved den (punkt) målte regn direkte når klimaeffekterne vurderes. Derved undgås den udjævning som altid sker i en regional model.

For at kunne genere en kunstig regnserie skal der derfor skabes en sammenhæng mellem faktiske punktmålinger i høj times opløsning og den regionale klimamodel for Storbritannien med opløsning på 6 timer og 50x50 km. Det gøres stort set analogt til Jørgensen og Johansen (2004), blot på de variable der beskriver regnserierne i stedet for ekstremværdierne selv:

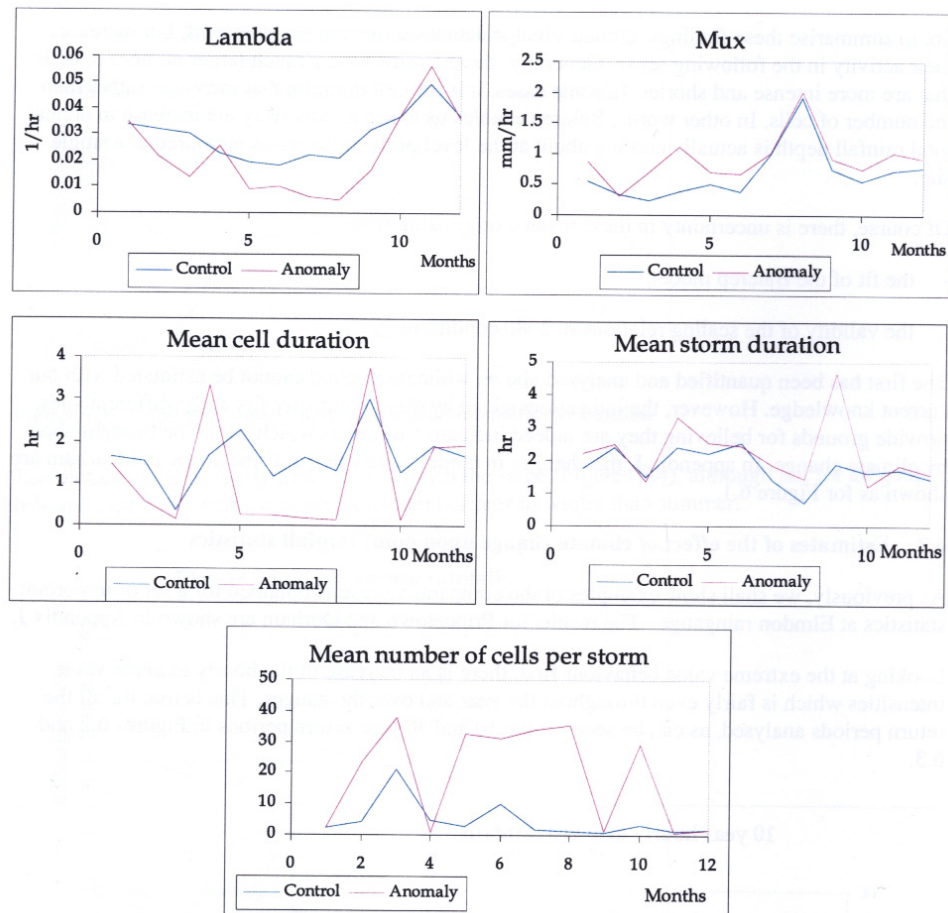
1. De 72 parametre der benyttes til at beskrive en regnserie i et punkt estimeres (6 parametre pr. måned). Parametrene estimeres på baggrund af aktuelle regnserier i 6 timers opløsning.
2. De 72 parametre estimeres for regnserien fra klimamodellen der beskriver det aktuelle klima. Forholdet mellem de punktmæssige og de arealmæssige parameterestimer beregnes for hver af de 72 parametre
3. De 72 parametre estimeres for regnserien fra klimamodellen der beskriver det fremtidige klima. Forholdet mellem de punktmæssige og de arealmæssige parameterestimer benyttes til at beregne fremtidige parameterestimer for den kommende regnserie som punktmåling.
4. Der simuleres en regnserie på op til 200 års varighed med 1 times opløsning på baggrund af de fremtidige estimer. Regnserien disaggregeres vha. metoden beskrevet i Onof *et al* (2005).

Specielt trin 2 er illustreret i Figur 11 for at illustrere forskellen til metoden anvendt i Jørgensen og Johansen (2004). Der er en række elementer i analysen som bør fremhæves

- Der benyttes også i denne undersøgelse en simpel skalering af parameterestimerne og heller ikke her argumenteres der for den. Den er dog mere rimelig i dette tilfælde såfremt de enkelte parametre faktisk kan godtgøres at have en vis fysisk tolkning.
- Der er 6 parametre i den valgte Bartlett-Lewis model, der estimeres måned for måned, svarende til 72 parametre til at beskrive en regnserie. Parametrene estimeres som regel på baggrund af målinger i 1 times opløsning. Det påpeges i undersøgelsen at det giver en systematisk underestimation af ekstreme værdier i 1 times opløsning når der benyttes input data i 6 timers opløsning. Ved at analysere de opgivne parameterestimer er det tydeligt at det især er den konvektive regn i sommermånederne modellen har vanskeligheder ved at beskrive.
- Ved at vurdere parametervariationerne fra måned til måned er der noget der tyder på at det ikke altid er den optimale løsning der findes hvor parametrene kan gives den fysiske betydning der er tilsigtet, se Figur 11. Det burde undersøges hvorvidt alle 72 parametre kan estimeres på én gang med henblik på at undgå vilkårlige variationer i estimerne.
- Det havde været oplagt at undersøge om disaggregeringen vha. kaos-teori havde været bedre til at beskrive de ekstreme regnintensiteter helt fra 6 timer til 5 minutter end blot at fastholde det sædvanlige interval for disaggregering (fra 1 time til 5 minutter). Det bør generelt

undersøges hvor det optimale "skel" er mellem at benytte højere tidsopløsning i klimamodellen og at benytte disaggregering.

- Undersøgelsen bærer præg af at være udført under stort tidspres. Som eksempel kan nævnes at der er undersøgt tre metoder til at estimere parametrene der beskriver tidsserien af punktnedbør. Det er dog ikke den bedste metode der er anvendt i rapporten, angiveligt af tidsmæssige årsager.



Figur 11 Parameterestimer baseret på tidsrækkerne af nedbør i klimamodellen i aktuelt klima (Control) og fremtidigt klima (Anomaly) i Bogner et al (2002). Der tages udgangspunkt i den generelle tendens til ændringer i nedbør i modsætning til metoden angivet i Figur 10. Det bemærkes at estimerne for april og oktober for "mean cell duration" og "mean number of cells per storm" afviger meget fra de øvrige måneder og tilsyneladende er kraftigt korreleret.

I rapporten angives betydningen for ekstremhændelser med varighederne 1 og 6 timer for gentagelsesperioderne 10 og 30 år for 1-3 stationer. For varigheden 1 time og gentagelsesperioden beregnes det, at belastningen i slutningen af århundredet bliver 20-40 % højere end i dag, afhængigt af hvilket lokalitet der betragtes. Der er altså tale om mindre ændringer end beregnet i Jørgensen og Johansen (2004) på trods af at scenariet for klimaændringer er af samme størrelsesorden som det der er anvendt i Jørgensen og Johansen (2004).

I slutningen af Bogner *et al* (2002) gennemgås kort muligheden for at skalere dimensioneringsregn hvor der ikke er passende regneserier i området. Metoden

er ret simpel og baseret på en udnyttelse af et omfattende kortmateriale over ekstremregns karakteristika i Storbritannien (NERC, 1975, 2000). Det er derfor ikke relevant i en dansk sammenhæng.

5.4 Diskussion af metoder til generering af fremtidige kunstige historiske regnserier og/eller dimensioneringsregn i høj opløsning

Udviklingen af computere med større beregningskraft og bedre forståelse af de fysiske processer betyder at det i fremtiden vil være muligt at genere klimamodeller med højere tidsmæssig og spatial opløsning. Dermed vil afstanden i Figur 4 mellem klimamodeller og den ønskede opløsning blive mindre i fremtiden. Tilsvarende arbejder man inden for afløbsbranchen med at udvikle metoder til at anvende fladenedbør som input til dimensionering og analyse af afløbssystemers funktion. Inden for overskuelig tid vil det dog være nødvendigt at supplere beregningerne i klimamodellerne med skalering i tid og sted for at opnå resultater der er egnede til at vurdere klimaændringernes effekter på afløbssystemers funktion.

Der er ingen tvivl om at det er nødvendigt at anvende hovedprincippet fra de to cases benytter ved kvantificering af klimaændringernes effekter på afløbssystemers funktion:

1. Karakteriser nedbøren i punktmålingerne på baggrund af en historisk regnserie (ekstremværdier, parametre for ekstremværdier eller parametre for regnserien)
2. Karakteriser forskellen i en tilsvarende egenskab ved en regional klimamodel der dækker det relevante område og kvantificer forskellen mellem "status" og "fremtid".
3. Etabler en entydig og dækkende (bijektiv) sammenhæng mellem den historiske regnserie og klimamodellens "status"-simulering. Den bijektive sammenhæng beskriver skalering i tid og sted som angivet i Figur 4. Det antages at den bijektive sammenhæng er uændret af klimaændringerne og derfor kan benyttes til at beskrive punktmålinger af nedbør i et fremtidsscenario (ekstremværdier, parametre for ekstremværdier eller parametre for regnserien).

Der kan ikke på baggrund af litteraturstudiet peges entydigt på en metode der med sikkerhed vil give et godt resultat. Det er dog muligt at knytte følgende mere generelle kommentarer til den generelle metode:

ad 1.

De to cases har valgt hver sin metode til at karakterisere ekstremregns egenskaber. En tredje metode kunne være en parametriseret model for ekstremregn såsom den PDS-model der er anvendt f.eks. i Spildevandskomiteens Skrift 26 (Mikkelsen et al, 1999). Den metode er anvendt på klimadata for at prediktere ændringer i 30 års gentagelsesperioden på daglig nedbør i May *et al* (2005). Det vigtige er at finde en metode hvor der er en så logisk og enkel sammenhæng mellem punktegenskaber og fladeegenskaber som muligt.

ad 2.

Formuleringen af ændringerne ved den regionale model bør være overensstemmende med beskrivelsen i trin 1. Der er i begge cases valgt at fokusere på at beskrive ændringen som proportional med "status" simuleringen. Formodningen kunne måske testes ved at lave simuleringer på baggrund af udviklingen af ekstremregn i det 20. århundrede. Det er

dog tvivlsomt om ændringerne er tilstrækkeligt tydelige til at man kan teste forskellige metoder til at beskrive ændringerne.

ad 3.

Et vigtigt krav til metoderne er at de skal passe til hinanden så man ikke blander metoder til dimensioneringsregning med metoder til historiske regnserier. ARF-metoder hører sammen med dimensioneringsregning mens skalering af variable kan anvendes mere generelt.

Begge cases anvender rå estimater på relationen mellem punkttestimat og fladestimat. Det stiller store krav til præcisionen af den regionale klimamodel.

De to cases har begge kvaler med at den tidsmæssige opløsning er for dårlig. Den succesfulde anvendelse af kaskade-modeller til disaggregering og regionale klimamodeller med bedre tidsmæssig opløsning gør at det nu primært er den spatiale struktur af ekstremnedbør der er relevant at være opmærksom på ved opstilling af den bijkjektive sammenhæng mellem punktmodel i høj tidsopløsning og flademodel i lavere tidsopløsning.

De beregnede ændringer af egenskaberne for ekstremregning i Jørgensen og Johansen (2004) er ganske alvorlige. Samtidigt er usikkerheden på resultatet ganske betydelig, også i forhold til de øvrige usikkerheder i relation til beregning af klimaeffekter. Det vil derfor være rimeligt at undersøge hvorvidt resultaterne er middelværdier eller konservative. Det kan ske ved at anvende en af de to andre metoder der er foreslået ovenfor eller ved at teste følsomheden af resultatet som funktion af de centrale antagelser i Jørgensen og Johansen.

6 Konklusion

Ekstremregn vil blive kraftigere i fremtiden - og fremtiden er begyndt. Det første forsøg på at kvantificere ændringerne tyder på, at ændringerne for punktregn i høj tidsopløsning vil være meget voldsomme. Bearbejdningen tyder på, at den dimensionsgivende regnintensitet for små og mellemstore afløbssystemer fordobles. Kvantificeringen er forbundet med stor usikkerhed og er formentlig konservativ.

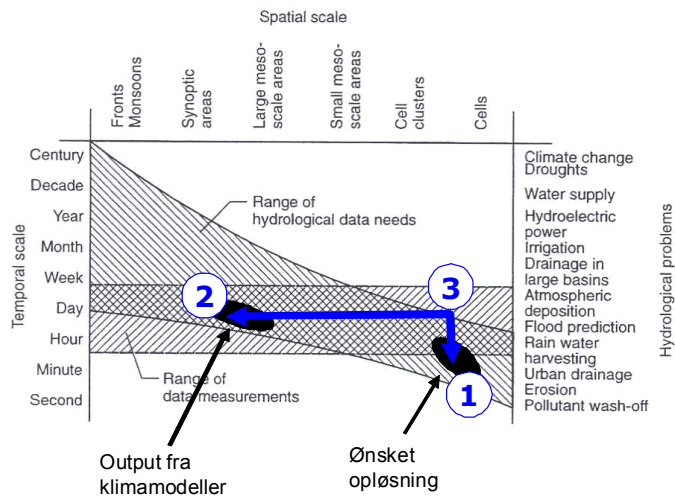
Der er tre væsentlige kilder til usikkerhed i forbindelse med kvantificeringen af klimaændringers påvirkning af afløbssystemer. Den ene kilde er "drivkraften" af klimaændringerne, altså hvordan både vores samfundsudvikling og den naturlige udvikling i klimaet vil forløbe. Den anden kilde er hvordan vi beskriver disse processer i klimamodeller. Den sidste kilde er hvordan vi "oversætter" klimamodellernes forudsigelser til brugbar information om ekstremregn i høj tidsmæssig og arealmæssig opløsning. Nærværende litteraturstudie undersøger den sidste kilde til usikkerhed.

Der er sket en ganske betydelig udvikling i mulighederne for at skalere nedbørs egenskaber over tid og sted. Det skyldes ikke mindst anvendelsen af kaos-teori som har givet mulighed for mere præcist at skalere nedbør. Især må fremhæves at det er muligt med god tilnærmelse at beskrive nedbørs statistiske egenskaber i høj tidsmæssig opløsning ud fra en dårligere tidsmæssig opløsning.

Der er identificeret tre metoder til at skalere resultater fra klimamodellerne så det er muligt at vurdere effekterne på funktionen af afløbssystemer. Alle metoderne benytter følgende fremgangsmåde:

4. Karakteriser nedbøren i punktmålingerne på baggrund af en historisk regnserie
5. Karakteriser forskellen i en tilsvarende egenskab ved en regional klimamodel der dækker det relevante område og kvantificer forskellen mellem "status" og "fremtid".
6. Etabler en entydig og dækkende sammenhæng mellem den historiske regnserie og klimamodellens "status"-simulering. Den bijektive sammenhæng benyttes til at beskrive punktmålinger af nedbør i et fremtidsscenario.

De tre trin er illustreret i Figur 12.



Figur 12 De nødvendige trin ved beskrivelse af klimarelaterede ændringer i ekstremregn til brug for analyse af afløbssystemer

De tre metoder kan kort karakteriseres som følger:

- Empirisk bearbejdning af ekstremværdier for forskellige gentagelsesperioder og varigheder. Sammenhængen mellem regnserie og klimamodel etableres i form af et fast forhold mellem punktmåling og arealnedbør, den såkaldte Areal Reduktions Faktor. Denne metode er anvendt på danske data i et eksamensprojekt.
- Parametrisk bearbejdning af ekstremværdier for forskellige varigheder. Dette er en standard metode for bearbejdning af ekstremregn i Danmark og der er også fundet en anvendelse på døgnnedbør fra klimamodeller. Sammenhængen mellem regnserie og klimamodel etableres ved at korrelere parametre i modellerne. Der er ikke fundet eksempler på anvendelse af denne metode.
- Parametrisk bearbejdning af regnserier i lav tidsmæssig opløsning kombineret med metoder til at skalere nedbør til højere tidsmæssig opløsning. Sammenhængen mellem regnserie og klimamodel etableres ved at korrelere parametre i modellerne. Metoden er anvendt i Storbritannien.

Den første metode er anvendt i Danmark og resultatet var at ændringerne i ekstremregn var ganske alvorlige for funktionen af afløbssystemerne. Det er samtidigt den metode som forventes at være mest sårbar i koblingen mellem regnserie og klimamodel. Det anbefales derfor som minimum at iværksætte en undersøgelse der er baseret på en af de andre to metoder og/eller at undersøge betydningen af beskrivelsen af koblingen mellem regnserie og klimamodel. Endvidere er det vigtigt at få fastlagt forløbet af ændringerne over tid, for eksempel ved at skønne de forventede klimaændringer for ekstremregn i år 2060.

Først når ovennævnte undersøgelser er gennemført er der mulighed for at vurdere om der skal en større indsats til for at kvantificere ændringer i ekstremregn.

7 Referencer

Arnbjerg-Nielsen, K (1996): Statistical analysis of urban hydrology with special emphasis on rainfall modelling. PhD-thesis. Department of Environmental Science and Engineering, Technical University of Denmark. ISBN 87-89220-31-5.

Arnbjerg-Nielsen, K (2002): Trend i Ekstremregn. Rapport til Styregruppen for Regnmålersystemet, Spildevandskomiteen. COWI, Lyngby.

Asquith, WH og Famiglietti, JS (2000): Precipitation areal-reduction factor estimation using an annual-maxima centered approach. *Journal of Hydrology*, 230, 1-2, 55-69

Bechmann og Buishand (2002): Statistical downscaling relationships for precipitation in the Netherlands and North Germany. *International Journal of Climatology*, 22, 2002, 15-32

Bogner, K, Onof, C og Townsend, J (2002): Climate change and the Hydraulic Design of Sewerage Systems Volume IIA - Time Series and Design Event Update. Report 03/CL/10/4. UK Water Industry Research Limited, London. ISBN 1 84057 329 5.

Burian, SJ og Durrans, SR (2002): Evaluation of an artificial neural network rainfall disaggregation model. *Water Science and Technology*, 45, 2, 99-104

Chow, VT, Maidment, DR og Mays, LW (1988): *Applied Hydrology*. International Edition. McGraw-Hill, New York. ISBN 0-07-100174-3.

Christensen, JH og Christensen, OB (2001): Regional Climate Scenarios - A study on precipitation. In: Jørgensen, AM, Fengler, J, og Halsnæs, K: *Climate Change Research - Danish Contributions*. Danish Meteorological Institute and GADS forlag, Copenhagen. ISBN: 87-12-03775-3

Cowpertwait, PSP, Metcalfe, AV, O'Connell, PE, Mawdsley, JA, Threlfall, JL (1991): *Stochastic Generation of Rainfall Time Series*. Report FR0217, Foundation for Water Research.

Cowpertwait, PSP (1995): A generalized spatial-temporal model of rainfall based on a clustered point process. *Proceedings of the Royal Society, London, A*, 450, 163-175.

Cowpertwait, PSP, Kilsby, CG, O'Connell, PE (2002): A space-time Neyman-Scott model of rainfall: Empirical analysis of extremes. *Water Resources Research*, 38, 8, p 6-1 - 6-14

Cowpertwait, PSP, Lockie, T. og Davis, MD (2004): A stochastic spatial-temporal disaggregation model for rainfall. *Res. Lett. Inf. Math. Sci.*, 2004, Vol.6, pp109-122 Available online at <http://iims.massey.ac.nz/research/letters/>

- Cowpertwait, PSP, O'Connell, PE, Metcalfe, AV og Mawdsley. JA (1996a): Stochastic Point Process Modelling of Rainfall. I. Single-site fitting and validation. *Journal of Hydrology*. 175(1-4), 17-46.
- Cowpertwait, PSP, O'Connell, PE, Metcalfe, AV og Mawdsley. JA (1996b): Stochastic Point Process Modelling of Rainfall. II. Regionalisation and Disaggregation. *Journal of Hydrology*. 175(1-4): 47-65.
- Jensen, M, Rattenborg, M, Prismo, M og Poulsen, P (1984): Maksimalafstrømninger og bassinvoluminer fra historiske regnserier. Skrift 18. Spildevandskomiteen, Ingeniørforeningen i Danmark. ISBN 87-88671-00-3.
- Christensen, J.H. and Christensen, O.B. (2003): Severe summertime flooding in Europe: Even as summers become drier, the incidence of severe precipitation could increase. *Nature*, 421, 805-806
- Jørgensen, AT og Johansen, RM (2004): Klimaændringernes betydning for afløbssystemerne. Eksamensprojekt efteråret 2003, Diplomingeniørstudiet (B). Miljø & Ressourcer, DTU.
- Koutsoyiannis (1994): A stochastic disaggregation method for design storm and flood synthesis. *Journal of Hydrology*, 156, 193-225.
- Koutsoyiannis, D og Onof, C(2001): Rainfall disaggregation using adjusting procedures on a Poisson cluster model, *Journal of Hydrology*, 246, 109-122.
- May, W, Christensen, BO og Christensen, J.H. (2005): Potential future changes in heavy rainfall events in Europe simulated by the HIRHAM regional climate model. Draft paper presented at 10th International Conference on Urban Drainage, 21-26 August 2005, Copenhagen, Denmark.
- Michele, CD, Kottegoda, NT og Rosso, R (2001): The derivation of areal reduction factor of storm rainfall from its scaling properties. *Water Resources Research*, 37, 12, 3247-3252.
- Michele, CD, Kottegoda, NT og Rosso, R (2002): IDAF (intensity-duration-area frequency) curves of extreme storm rainfall: a scaling approach. *Water Science and Technology*, 45, 2, 83-90.
- Mikkelsen, PS, Madsen, H, Arnbjerg-Nielsen, K, Jørgensen, HK, Rosbjerg, D og Harremoës, P (1999): Regional variation af ekstremregn i Danmark. Skrift 26. Spildevandskomiteen, Ingeniørforeningen i Danmark. ISBN 87-89220-49-8.
- NERC (1975): Flood Studies Report, Volumes I-V, National Environmental research Council, London.
- NERC (2000): Flood estimation handbook, Handbook and Volumes I-V. Center for Ecology & Hydrology, National Environmental research Council, London.
- Niemczynowicz, J (1990): Necessary level of accuracy in rainfall input for runoff modelling. In Iwasa, U og Sueishi, T (Ed): Proc. of the 5th Int. Conf. on Urban Storm Drainage. July 23-27. pp 593-602. Osaka University, Japan.

- Olsson, J og Berndtsson, R (1998): Temporal rainfall disaggregation based on scaling properties. *Water Science and Technology*, 37, 11, 73-79.
- Olsson, J, Uvo, CB, Jinno, K, Kawamura, A, Nishiyama, K, Koreeda, N, Nakashima, T, og Morita, O (2004): Neural networks for rainfall forecasting by atmospheric downscaling. *Journal of Hydrologic Engineering*, 9, 1, 1-12
- Onof, C (2002): Climate change and the Hydraulic Design of Sewerage Systems Volume IIB - Time Series Rainfall: Disaggregation. Report 03/CL/10/5. UK Water Industry Research Limited, London. ISBN 1 84057 330 7.
- Onof, C, Yameundjeu, B, Paoli, J-P og Ramesh, N (2002): A Markov modulated Poisson process model for rainfall increments. *Water Science and Technology*, 45, 2, 91-97.
- Onof, C, Townsend, J og Kee, R (2005): Comparison of two hourly-to-5-minute rainfall disaggregators. *Atmospheric Reseach*. In Press.
- Ormsbee, LE (1989): Rainfall Disaggregation Model for Continuous Hydrologic Modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*. 115, 4, 507-525.
- Sivapalan, M og Blöschl, G (1998): Transformation of point rainfall to areal rainfall: Intensity-duration-frequency curves. *Journal of Hydrology*, 204, 1-4, 150-167.
- Srikanthan, R og McMahon, TA (1983): Sequential Generation of Short Time-Interval Rainfall Data. *Nordic Hydrology*, 14, 5, 277-306.
- Tank, A.K., Wijngaard, J., and Engelen, A. van (2002): Climate of Europe. Assessment of observed daily temperature and precipitation extremes. European Climate Assessment. ISBN 90-396-2208-9.
- Umakhanthan, K og Ball, JE (2002): Estimation of rainfall heterogeneity across space and time scale. *Global Solutions for Urban Drainage*, 2002, p 1-16
- US Weather Bureau (1958): Rainfall-intensity-frequency regime. Part 2 - Southeastern United States. Technical Report no. 29.
- Wallingford, HR (2005): TSRSim: a new rainfall generation tool. Press release from HR Wallingford, 6 May 2005. Downloaded from <http://www.hrwallingford.co.uk/news/#> den 27. juli 2005.
- Wending, I og James, W (2002): Two neural networks for generation of high-resolution long-term storm rainfall compared to Ormsbee's method - Case study for Toronto. *Global Solutions for Urban Drainage*, 2002, 1-16.
- Wilson, EM (1990): *Engineering Hydrology*. 4th Edition. MacMillan Education Ltd, Hampshire. ISBN 0-333-51717-2.
- WRc. (1996): STORMPAC User Guide - Version 2.0. Software documentation manual. Report UC2680. Water Research Center, Swindon

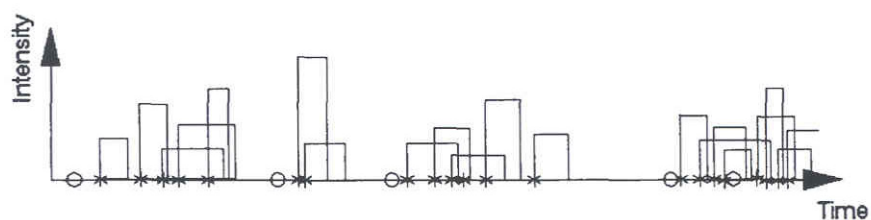
Neyman-Scott/Bartlett-Lewis rectangular pulses model

I løbet af 1980'erne blev der udviklet en matematisk ramme til beskrivelse af historiske regnserier med en tidsopløsning i størrelsesordenen 1 time. I Storbritannien blev metoder til at estimere modellens parametre identificeret og modellen blev herefter brugt til at kunne generere stokastiske regnserier for et vilkårligt punkt i Storbritannien. Modellen er også anvendt andre steder, primært ved at de engelske forskere har benyttet metoden og udviklet regionale regnserier for andre lokaliteter.

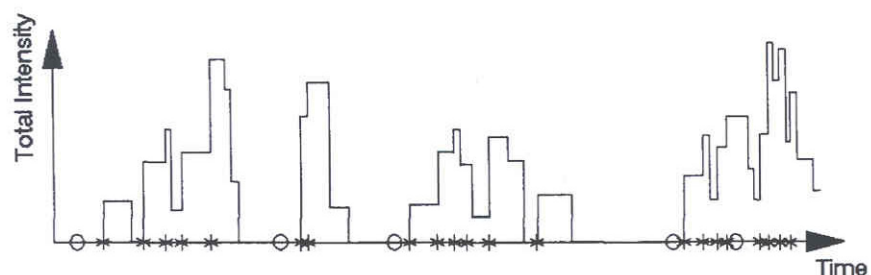
A.1 Punktmodel

Metoden er beskrevet i Cowpertwait *et al* (1996a, 1996b). For hver enkelt lokalitet beskrives "ankomsten" af regnhændelser som en Poisson-proces. Givet at en regnhændelse er ankommet simuleres der et antal regnceller som bidrager til den konkrete hændelse. Hver af disse regnceller er karakteriseret ved et start-tidspunkt efter hændelsens start, en varighed og en (konstant) regnintensitet. En lidt anden modelformulering med samme basale struktur benævnes Bartlett-Lewis Rectangular Pulses model. Modellerne er undersøgt og anvendt i flere tilfælde og med flere modifikationer af den præcise formulering og estimationsmetode.

A rectangular pulse is associated with each rain cell



The total intensity at any point in time is the sum of the intensities of all active rain cells at that point



Figur A.1 Metode til generering af regnhændelser i en Neymann-Scott Rectangular Pulses model. Fra Cowpertwait *et al* (1996a).

Neymann-Scott modellen er anvendt i den oprindelige regionale model for generering af kunstige regnserier (Cowpertwait *et al*, 1991). Bartlett-Lewis modellen er benyttet i de engelske studier af klimaeffekter (Bogner *et al*,

2002; Onof, 2002). Modellerne benytter 5-7 parametre afhængigt af formuleringen og estimeres på baggrund af egenskaber ved den målte regn såsom midelværdi, spredning, skævhed og autokorrelation på regndybde pr. hændelse, andel og gennemsnitlig længde af tørvejrperioder.

Når parametrene er estimerede kan modellen anvendes til at generere kunstige regnserier ved hjælp af en generator der trækker tilfældige starttidspunkter og regnhændelser i en lang serie. Metoden er beskrevet i f.eks. Cowpertwait *et al* (1991).

Modellerne er ikke egnede til at simulere regnserier i høj tidsopløsning og har vanskeligt ved at skifte mellem regnhændelser domineret af frontregn og hændelser domineret af konvektiv regn. Der er undersøgt forskellige metoder til at forbedre modellerne og har i Storbritannien valgt følgende pragmatiske metode til at undgå problemerne:

- Der genereres regnserier i tidsopløsning på 1 time. Herefter disaggregeres regnserierne til den ønskede opløsning
- Modellens parametre estimeres separat måned for måned. Herved domineres visse måneder af frontregn mens andre måneder domineres af konvektiv regn.

A.2 Flademodel

Cowpertwait (1995) videreudviklede punktmodellen til en flademodel ved at lade de enkelte regnceller i Neyman-Scott modellen være cirkulære. Forskellige celletyper simuleres ved at lade intensitet og varighed af hver regncelle være korrelerede. Bortset fra disse udvidelser er modellen identisk med modellen for punkt-målinger. Det bemærkes specielt, at regncellerne ikke bevæger sig hen over x - y -planet. Modellen er i Cowpertwait *et al* (2002, 2004) anvendt på et netværk af regnmålere i Italien og Australien hvor det er vist at modellen giver en god beskrivelse af flade-ekstremregn.