

Regional variation af ekstremregn i Danmark

1999

IDA Spildevandskomitéen

Ingeniørforeningen i Danmark - IDA
Spildevandskomitéen
Skrift nr. 26

Regional variation af ekstremregn i Danmark

Regional variation af ekstremregn i Danmark - Spildevandskomitéen, skrift nr. 26

© IDA Spildevandskomitéen 1999

Forfattere: Peter Steen Mikkelsen; Henrik Madsen; Karsten Arnbjerg-Nielsen;
Hanne Kjær Jørgensen; Dan Rosbjerg og Poul Harremoës

Tegninger: Birte Brejl

Tryk: Tekst og Tryk A/S

ISBN: 87-89220-49-8

Indholdsfortegnelse

Indholdsfortegnelse	3
Rekommandation	5
Forord	9
1 Indledning	11
1.1 Baggrund	11
1.2 Formål	14
1.3 Læsevejledning	14
2 Målesystemet, data og kvalitetskontrol	17
2.1 Målesystemets opbygning	17
2.2 Måleprincip og data	17
2.3 DMI's automatiske og manuelle kvalitetskontrol	20
2.4 Udvalgelse af data og supplerende kvalitetskontrol	21
3 Anvendelse af regninformation indenfor afløbsteknik	23
3.1 Fordeling af nedbør i tid og sted	23
3.2 Fladeregn og punktregn	25
3.3 Nedbørsvariable af afløbsteknisk relevans	25
3.4 Statistisk beskrivelse af ekstremhændelser	26
3.5 Grundlæggende typer af regndata	28
3.6 Anvendelse af tidsserier med høj opløsning	31
3.7 Anvendelse af dimensioneringsregn	33
4 Statistiske begreber og værktøjer	37
4.1 Estimation af T -års hændelser på baggrund af lokale data	37
4.2 Regional modellering af punktregn	39
4.3 Estimation af T -års hændelser på baggrund af regionale regndata	41
4.4 Fastsættelse af sikkerhedsniveau for dimensionsgivende regndata	42

5	Standardiseret regional databearbejdning	47
5.1	Udvælgelse af stationer og test for stationaritet	47
5.2	Analyserede nedbørsvariable.....	47
5.3	Valg af ekstremværdimodel	50
5.4	Regional analyse af PDS-parametre	52
5.5	Regional modellering af PDS-parametre.....	55
6	Udvælgelse af repræsentative historiske regnserier	63
6.1	Teoretisk princip	63
6.2	Bearbejdningens systematik	65
6.3	Brug af tabellerne	66
6.4	Outlier-stationer og stationer med kort observationsperiode.....	67
7	Eksempler og sammenligning med ældre datagrundlag.....	69
7.1	Regional estimation af T -års hændelser af nedbørsvariable	69
7.2	Regional variation af T -års estimater af nedbørsvariable	72
7.3	Variationsområde for regionale regnkurver	74
7.4	Sammenligning med landsregnrækkerne	74
7.5	Sammenligning med Odense-regnserien, 33 helår 1933-80.....	76
7.6	Generering af CDS-regn.....	79
8	Afslutning	83
8.1	Konklusioner	83
8.2	Perspektivering.....	83
9	Referencer	85
	Ordliste	89
	Bilag A Supplerende materiale.....	93
	Bilag B Stationer tilknyttet DMI's net af automatiske regnmålere...	95
	Bilag C Beregning af regionalt T -års estimat	99
	Bilag D Generering af CDS-regn.....	103
	Bilag E Klassificering af stationer.....	107

Rekommandation

Dimensionering og analyse af afløbssystemer samt de dertil knyttede renseanlæg og recipienter fordrer anvendelse af et bredt spektrum af ingeniørmæssige beregningsmetoder og -værktøjer samt regndata tilpasset efter formålet. Det er i skriftet valgt at klassificere forskellige typer af regndata efter deres væsentligste egenskaber som vist i nedenstående oversigt.

	Tidsserier med høj opløsning	Dimensioneringsregn
Lokale data	• Historiske regnserier • Syntetiske regnserier	• Kasseregn • CDS-regn
Regionale data	• Repræsentative hist. regnserier • Syntetiske regnserier	• Kasseregn • CDS-regn

Klassificering af regndata anvendt i forb. med dimensionering og analyse af afløbssystemer.

Lokale regndata er målt på lokaliteter, der er placeret indenfor eller tæt ved et aktuelt kloakopland. *Regionalisering* gør det muligt at forstå og tage højde for regionale (geografiske) variationer og derved forbedre grundlaget for at vælge *repræsentative* historiske regnserier på lokaliteter uden målestationer eller med kortvarige måleperioder. Desuden gør regionalisering det muligt at inddrage regndata fra flere målestationer og på denne måde forbedre grundlaget for at estimere ekstremhændelser for store gentagelsesperioder, der overstiger observationsperiodens længde.

Dimensioneringsregn er konstruerede, *syntetiske* ekstremhændelser for en på forhånd defineret gentagelsesperiode (T), der benyttes som dimensionsgivende input til beregninger. Når *tidsserier* med høj opløsning derimod benyttes som input til simuleringsmodeller, kan statistikken for skadevoldende effekter bestemmes direkte på grundlag af simuleringsresultater for en lang periode. Ved dimensionering anvendes typisk dimensioneringsregn, og ofte benyttes ved detailanalyser regnserier med høj tidsmæssig opløsning. *Syntetiske* regndata udtrykker regnens statistiske egenskaber og tilnærmer gennemsnitligt formen af

virkelige, *historiske*, regnhændelsers hyetografer. Alle former for dimensioneringsregn er syntetiske regndata og giver et forenklet, filtreret billede af regnens egenskaber.

Der er påvist statistisk signifikante og i afløbsteknisk sammenhæng væsentlige regionale (geografiske) variationer at ekstremregn i Danmark. På baggrund heraf er der opbygget en model til beskrivelse af de regionale variationer og estimation af regionale T -års hændelser som funktion af årsmiddelnedbøren på den enkelte lokalitet samt placeringen i én af sub-regionerne *Danmark udenfor København, København vest og København øst*. En model til generering af syntetiske regnserier, der genskaber regnens statistiske egenskaber (korttidsvariationer, sæsonvariationer etc.) med tilstrækkelig nøjagtighed, foreligger endnu ikke.

Prediktionsusikkerheden forbundet med regionalt bestemte dimensionsgivende regndata skyldes en kombination af (1) stikprøveusikkerhed grundet en begrænset observationsperiode og et begrænset antal målestationer samt (2) residual usikkerhed i den regionale models beskrivelse af de regionale variationer. Valg af regndata bør i enhver situation tage udgangspunkt i den ønskede nøjagtighed af beregningsresultatet, og prediktionsusikkerheden bør ses i sammenhæng med andre betydende usikkerheder samt beregningsmetodens nøjagtighed. Sikkerhedsniveauet for dimensionsgivende regndata på stedet s , $\hat{\theta}_{DIM}(s)$ fastsættes på baggrund af prediktionsvariansen $\hat{\sigma}_{PRED}^2(s)$, vha. af en *sikkerhedsfaktor*, f

$$\hat{\theta}_{DIM}(s) = \hat{\theta}_{REG}(s) + f \hat{\sigma}_{PRED}(s)$$

hvor $\hat{\theta}_{REG}(s)$ er et regionalt estimat af den betragtede nedbørsvariabel, afhængigt af årsmiddelnedbøren og den subregionale placering af den pågældende lokalitet. Sikkerhedsfaktoren f svarer til en frekvensfaktor i den standardiserede normalfordeling, hvor $f=\pm 1$ svarer til et 16% og 84% sikkerhedsniveau (grænser for 68% konfidensintervallet), og $f=\pm 2$ svarer til et 2,5% og 97,5% sikkerhedsniveau (grænser 95% konfidensintervallet).

Anbefaling vedr. anvendelse af *lokale* og *repræsentative* regnserier

Der er opstillet et mål (U) for afvigelsen af historiske regnserier fra den regionale ekstremværdimodel, og U er beregnet for tre klasser af nedbørsvariable og tre grupper af gentagelsesperioder for samtlige de analyserede historiske regnserier. U kan gives en sandsynlighedsfortolkning svarende til sikkerhedsfak-

toren f ovenfor og kan dermed benyttes til at vurdere sikkerhedsniveauet ved anvendelse af en given historisk regnserie.

For $|U| \geq 2$ anbefales det at undersøge den pågældende station nærmere, for at afgøre, om den kan anvendes. Repræsentative regnserier udvælges med udgangspunkt i et ønsket sikkerhedsniveau samt årsmiddelnedbøren og den subregionale placering det pågældende sted blandt de historiske regnserier, hvor $|U| < 2$. I situationer, hvor en simuleringsmodel er kalibreret vha. samhørende lokale målinger af regn og afstrømning i afløbssystemet, kan den lokale regnserie benyttes, selv for store værdier af $|U|$, idet eventuelle afvigelser fra den regionale model vil opvejes af modelkalibreringen (f.eks. kan en forhøjet afløbskoefficient modvirke signifikant lave regnmålinger).

De historiske regnserier fra Spildevandskomitéens Regnmålersystem er relativt korte (max 18 år fra 1979-96) i forhold til visse anvendelser. Beregning af ekstremværdier af skadevoldende effekter på baggrund af rangordning af simuleringsresultater giver store usikkerheder for gentagelsesperioder større end ca. $\frac{1}{4}$ af observationsperioden (4-5 år), og for gentagelsesperioder herover må man derfor benytte sig af parametrisk estimation ved analyse af beregnede ekstremværdier, f.eks. PDS modellen med GP-fordelte overskridelser, som er benyttet i skriftet. For gentagelsesperioder, der overstiger observationsperiodens længde, anbefales det at benytte regionalt estimerede dimensioneringsregn, jf. nedenfor.

Anbefaling vedr. anvendelse af dimensioneringsregn

Dimensioneringsregn (både kasse- og CDS-regn) kan estimeres på baggrund af lokale eller repræsentative historiske regnserier. I de fleste tilfælde vil regionalt estimerede dimensioneringsregn imidlertid udgøre det mest nøjagtige beregningsgrundlag. Undtaget herfor er situationer, hvor en simuleringsmodel er kalibreret vha. samhørende lokale målinger af regn og afstrømning i afløbssystemet, jf. ovenfor. Dimensioneringsregn kan vha. metoder, der stilles til rådighed gennem skriftet, estimeres på enhver lokalitet i Danmark med udgangspunkt i et ønsket sikkerhedsniveau samt årsmiddelnedbøren og den subregionale placering.

Kasseregn og CDS-regn giver et forenklet billede af regnen, der relaterer sig direkte til problemstillingen *fuldtløbende ledningskapacitet*. Brug af CDS-regn i forbindelse med andre problemstillinger end denne bør i hvert enkelt tilfælde godtgøres ved en nøjere undersøgelse. Det anbefales generelt at sætte den usik-

kerhed, der introduceres ved at anvende dimensioneringsregn, i forhold til andre betydende usikkerheder samt den øgede nøjagtighed, der opnås ved inddragelse af regionale regndata, specielt ved vurdering af skaldevoldende effekter for store gentagelsesperioder.

Der gives ikke faste kriterier for, i hvilke situationer, der bør benyttes hhv. dimensioneringsregn og historiske regnserier. Generelt anbefales det imidlertid at benytte historiske regnserier ved vurdering af recipientforhold, hvor årstidsvariationer, døgnsvingninger mv. har betydning.

Anbefaling vedr. anvendelse af Spildevandskomitéens skrift nr. 16, 18 og 21

Landsregnrækkerne opstillet i Spildevandskomitéens skrift nr. 16 (SVK, 1974) giver systematisk for store maksimale middelintensiteter for små varigheder. Det anbefales derfor at opstille *regionale regnkurver* (og -rækker) på baggrund af regionalt estimerede *T*-års hændelser vha. de værktøjer, der stilles til rådighed med skriftet, frem for at benytte landsregnrækkerne.

Det er dokumenteret, at *Odense-regnserien* (33 helårs målinger i perioden 1933-79) systematisk underestimerer maksimale middelintensiteter for store varigheder og underestimerer bassin- og overløbsvolumener for små afløbstal. Det kan derfor *ikke* anbefales at anvende diagrammer og tabeller i Spildevandskomitéens skrift nr. 18 og 21 (SVK, 1984a,b) uden først at korrigere dem i forhold til den hér opstillede regionale model. Det anbefales tilsvarende at benytte *lokale* eller *repræsentative* historiske regnserier frem for Odense-regnserien (1933-79) som input til simuleringsmodeller.

Forord

Dette skrift indeholder den første officielle bearbejdning af ekstreme regndata fra Spildevandskomitéens Regnmålersystem, der blev etableret i 1979. Skriftet lægger op til kraftige ændringer på en række områder i forhold til praksis for dimensionering og analyse af afløbssystemer i Danmark, idet en betydelig geografisk variation dokumenteres.

Skriftets indhold er en syntese af 7 års systematisk indsats i samarbejde mellem Danmarks Tekniske Universitet (DTU), Spildevandskomitéen (SVK) og Danmarks Meteorologiske Institut (DMI). Arbejdsgruppen har bestået af følgende personer:

Peter Steen Mikkelsen, Institut for Miljøteknologi, DTU
Henrik Madsen, Institut for Strømningsmekanik og Vandressourcer, DTU
Karsten Arnbjerg-Nielsen, Institut for Miljøteknologi, DTU
Hanne Kjær Jørgensen, Danmarks Meteorologiske Institut
Dan Rosbjerg, Institut for Strømningsmekanik og Vandressourcer, DTU
Poul Harremoës, Institut for Miljøteknologi, DTU

Teksten til skriftet er forfattet af Peter Steen Mikkelsen og Henrik Madsen, DTU. Beregningsarbejdet er gennemført af Henrik Madsen, DTU, mens Hanne Kjær Jørgensen, DMI har stået for udtræk og forberedelse af data. Den samlede arbejdsgruppe har medvirket ved fastlæggelse af principperne for skriftets indhold. Det afsluttende arbejde i 1997-99 med databearbejdning og udarbejdelse af skriftet har været støttet økonomisk af Det Kommunale Momsfond, Spildevandskomitéen og Regnmålersystemets Styregruppe.

Principperne for nærværende skrift har løbende været forelagt og diskuteret i Spildevandskomitéens udvalg vedr. regnafledning i byer (Regnudvalget) samt på flere faglige møder arrangeret af Spildevandskomitéens udvalg vedr. Edb i vandmiljøteknikken (EVA). Et udkast til skriftet blev forelagt og godkendt med mindre rettelser på Spildevandskomitéens plenarmøde d. 23. marts 1999.

P. Jørgen Bayer
Tekniske vicedirektør
Formand for Spildevandskomitéen

Poul Harremoës
Professor
Formand for Spildevandskomitéens
udvalg vedr. regnafledning i byer

1 Indledning

1.1 Baggrund

Spildevandskomitéen (SVK) har siden 1979 i samarbejde med Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) og en række kommuner opstillet og drevet automatiske regnmålere med høj tidsopløsning i mere end 40 byområder forskellige steder i landet. Nogle af regnserierne har ved udgangen af 1996 nået en længde (op til 18 år), der gør dem velegnede i forbindelse med projektering og analyse af afløbssystemer, mens andre endnu er så korte, at de ikke umiddelbart kan anvendes.

Den første samlede bearbejdning af regndata fra Spildevandskomitéens Regnmålersystem blev gennemført på baggrund af de første 9 års målinger fra i alt 43 stationer (Bramslev et al., 1989). Princippet i undersøgelsen var, at en række standardiserede afløbssystemer med forskellige egenskaber blev opstillet. For hver af de 43 historiske regnserier blev alle disse systemer efterfølgende gennemregnet med en edb-model (SAMBA), og til sidst blev resultaterne statistisk bearbejdet. En betragtelig – men tilsyneladende ikke systematisk – variation i resultaterne fra forskellige regnserier blev observeret, se Figur 1. Den observerede variation mellem de enkelte dataserier er for en gentagelsesperiode på $T=1$ år illustreret i et normalfordelings plot på Figur 2. Det fremgår, at regndybden for enkelthændelser, der i gennemsnit overskrides én gang om året, kan ligge et sted mellem 21 og 33 mm – afhængigt af hvilken regnserie, der betragtes. I forhold til f.eks. dimensionering af bassiner er der tale om en betragtelig variation med betydelige økonomiske konsekvenser.

Efterfølgende blev dette arbejde uddybet på to punkter, idet variationerne blev statistisk kvantificeret (PH-consult, 1992), og det blev undersøgt, om variationerne kunne forklares ved regressionsanalyse (Harremoës et al., 1992; Dahl et al., 1992; Mikkelsen et al., 1992). Årsmiddelnedbøren blev valgt som forklarende parameter, fordi data er tilgængelige overalt i landet, og fordi det må forventes at denne parameter til en vis grad indeholder effekten af andre klimatiske parametre, for hvilke data ikke er umiddelbart tilgængelige. Konklusionen var, at variationerne til en vis grad kunne forklares, specielt for egenskaber ved regnen, der har relation til regnvolumen (f.eks. beregnede overløbs- og bassinvolumener), og specielt for små gentagelsesperioder. Forkla-

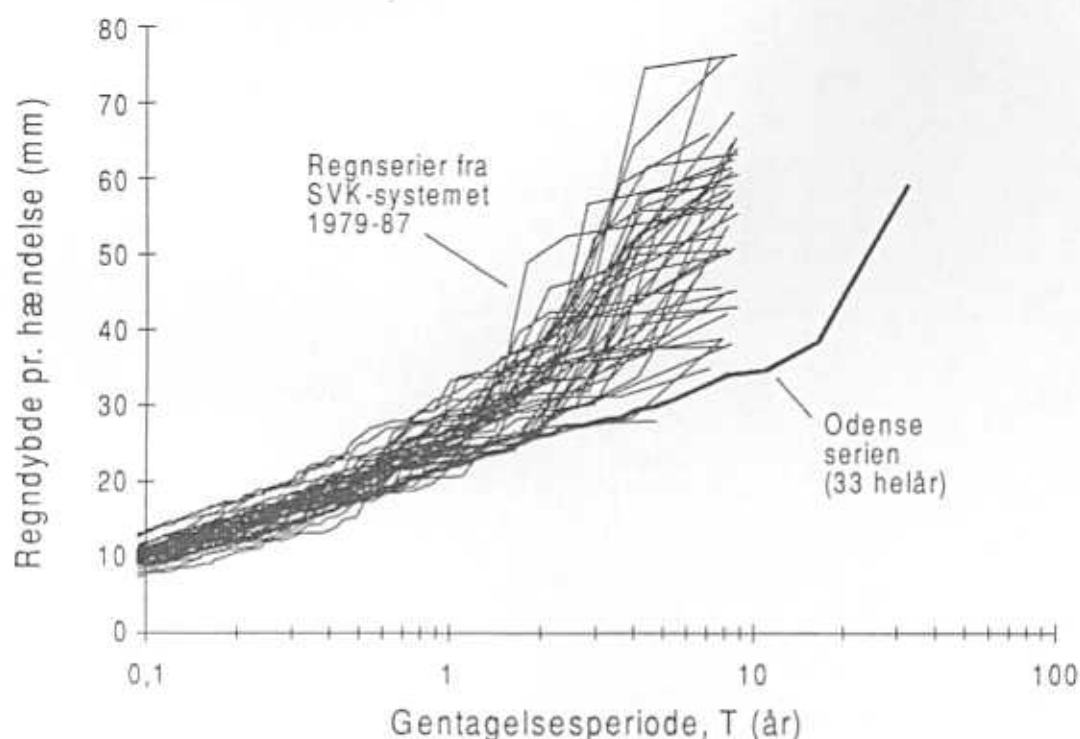
ringsgraden var imidlertid for det meste så lille, at den ikke umiddelbart kunne motivere nye beregningsmetoder baseret på lokale regndata, og dermed blev der skabt tvivl om grundlaget for at benytte "lokale" historiske regnserier.

Alternativt blev det foreslået at opfatte variationerne som statistisk usikkerhed og at håndtere de observerede forskelle som et usikkerhedsbidrag i afløbstekniske beregninger. Dette var helt nye toner indenfor afløbstechnik, idet man hidtil havde været vant til at benytte regndata fra én fælles lokalitet i landet (Odense, 33 helårs målinger). Som det ses på Figur 2 svarer punkternes fordeling meget godt til en normalfordeling. Dimensionering på basis af 84% fraktilen i fordelingen af regnmålere (middelværdien plus én gange standardafvigelsen) giver en regndybde på 28,4 mm, hvilket skal ses i forhold til middelværdien på 25,8 mm og Odense-regnseriens 22,0 mm, der svarer til 5% fraktilen i fordelingen af regnmålere.

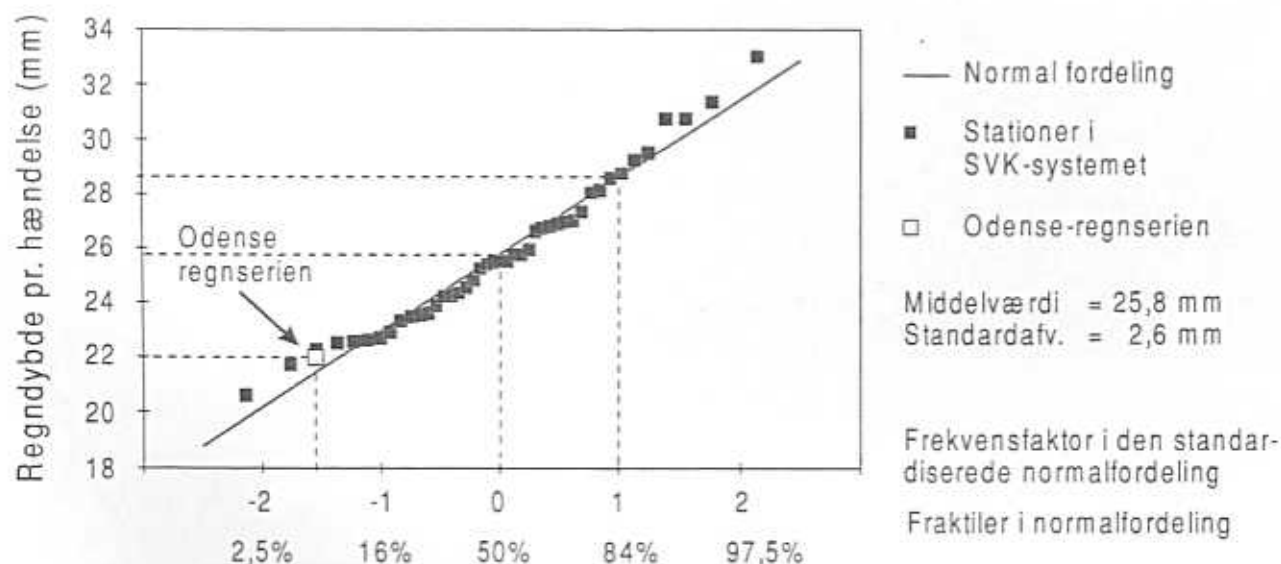
Som det ses på Figur 1 ligger Odense-regnserien for regndybde pr. hændelse generelt lavere end de fleste regnserier fra Spildevandskomitéens Regnmålersystem, og det foreslåede princip ville derfor føre til en voldsom forøgelse af f.eks. beregnede bassinvolumener. For ekstreme regnintensiteter med korte varigheder var konklusionen omvendt, at Odense-regnserien ligger lidt over gennemsnittet i forhold til de nye regnserier (Harremoës & Mikkelsen, 1995).

De indledende dataanalyser var alle baseret på traditionelle statistiske metoder til estimation af T -års hændelser (ekstremværdier, der overskrides med en gentagelsesperiode på T år). Disse metoder åbner imidlertid ikke mulighed for at vurdere, hvor sikker estimationen er. Der blev derfor efterladt mange åbne spørgsmål, og det kunne f.eks. ikke vides, om mangel på forklaringsgrad i regressionsanalysen skyldtes estimationsusikkerhed, og om den observerede regionale variation overhovedet var signifikant.

I forbindelse med to eksamensprojekter på Institut for Miljøteknologi og Institut for Strømningsmekanik og Vandressourcer, Danmarks Tekniske Universitet (Arnbjerg-Nielsen, 1993; Madsen, 1993) blev regndata frem til 1992 opsamlet, og en del senere analyser bygger derfor på ca. 14 års målinger. Efterfølgende blev der i 3 Ph.D.-projekter på DTU (Arnbjerg-Nielsen, 1996; Madsen, 1996; Mikkelsen, 1995) arbejdet videre med det teoretiske grundlag for analyse af ekstreme regndata. Flere forskellige metoder til estimation af T -års hændelser blev afprøvet, både ikke-parametriske og parametriske (Arnbjerg-Nielsen et al., 1994; Madsen et al., 1994), og der blev arbejdet meget med at udvikle grundlaget for regionalisering af regndata.



Figur 1. Ekstremværdier af regndybde pr. hændelse, plottet som funktion af gentagelsesperioden for hver af de 43 målte regnserier, der indgik i den første databearbejdning (1979-87) samt for Odense-regnserien med 33 helårs data fra perioden 1933-80.



Figur 2. Statistisk fordeling af de 43 beregnede stationsværdier af regndybde pr. hændelse svarende til $T=1$ år, jf. Figur 1. Den rette linie gennem punkterne svarer til en normalfordeling.

Det viste sig hurtigt, at estimationsusikkerheden for store gentagelsesperioder var meget betydelig grundet den begrænsede observationsperiode, og det blev godtgjort, at den regionale variation af T -års hændelser er statistisk signifikant for relativt små gentagelsesperioder. Det blev desuden vist, at der i Københavnsområdet er en tilsyneladende *storbyeffekt*, idet særligt volumenrige ekstremregn har tendens til at vare længere i Københavnsområdet end i andre egne af landet (Arnbjerg-Nielsen et al., 1996), og det viste sig, at data fra målere beliggende tæt ved hinanden er korrelerede, fordi regnbyger kan bevæge sig med vinden og dække så store områder, at den samme nedbørshændelse påvirker målingen ved flere stationer (Mikkelsen et al., 1996). Begge fænomener har stor betydning for, hvorledes den regionale variation kan beskrives, og på hvordan resultaterne fra regional modellering kan tolkes.

1.2 Formål

Som en naturlig opfølgning på det foregående arbejde tog Spildevandskomitéens udvalg vedr. regnafledning i byer (Regnudvalget) i foråret 1995 initiativ til at udarbejde et *skrift*. Der forestod et stort men nødvendigt arbejde mht. systematisering af den teoretiske viden og samlet bearbejdning af data frem til nutid. Herunder var der behov for opstilling af regnkurver og andre bearbejdede typer af regninformation samt udvikling af et grundlag for at kunne vurdere, under hvilke omstændigheder historiske regnserier fra Spildevandskomitéens Regnmålersystem kan anvendes. Desuden var der behov for en kortfattet og let forståelig fremstilling, der sigter mod direkte anvendelse i dansk ingeniørpraksis.

Det lykkedes i midten af 1996 at få bevilliget økonomiske midler fra Det Kommunale Momsfond, Spildevandskomitéen og Regnmålersystemets Styregruppe. Arbejdet blev igangsat i efteråret 1996 som et samarbejde mellem Spildevandskomitéen, Danmarks Meteorologiske Institut og Danmarks Teknisk Universitet, og det er resultaterne og konsekvenserne af dette projekt, der beskrives i det følgende.

1.3 Læsevejledning

Forståelse af de koncepter, der beskrives i nærværende skrift, og anvendelse af de værktøjer, der stilles til rådighed, forudsætter et godt kendskab til sædvanlig praksis indenfor afløbsteknik, og på den måde følger skriftet traditionen for Spildevandskomitéens øvrige skrifter. Skriftet introducerer imidlertid statistiske begreber og metoder, der delvist er nye, og som ikke før har været anvendt

indenfor afløbsteknik. Det er valgt kortfattet at introducere de statistiske begreber, så praktikere med lyst til at lære nyt vil kunne anvende skriftet ved valg af regndata uden i detaljer at kende de bagved liggende teorier og beregninger, men det kan ikke undgås, at der vil være specielle problemstillinger, der vil kræve inddragelse af statistisk ekspertise. Det detaljerede grundlag er dokumenteret i en teknisk baggrundsrapport (Madsen, 1998), samt i en række notater og internationale tidsskriftartikler, hvortil der henvises løbende i teksten.

I **kapitel 2** gives der en kortfattet status for de analyserede data og for Spildevandskomitéens Regnmålersystem, mens **kapitel 3** giver en oversigt over det begrebsapparatet, der knytter sig til anvendelse af regninformation indenfor afløbsteknik. Der lægges i systematikken op til en klar rekommandation for anvendelse af data fra Spildevandskomitéens Regnmålersystem.

Kapitel 4 giver en generel indføring i de statistiske begreber og værktøjer, der anvendes ved analyse af ekstreme regndata, herunder inddragelse af regional regninformation og fastlæggelse af sikkerhedsniveau ved beregninger. I **kapitel 5** beskrives de standardiserede beregninger, der i projektets forløb er gennemført ved den regionale analyse af data fra Spildevandskomitéens Regnmålersystem. Desuden opsummeres hovedkonklusionerne, der ligger til grund for kapitel 6 og 7.

De historiske regnserier fra SVK's regnmålersystem klassificeres i **kapitel 6** i forhold til den udviklede regionale model, og der redegøres for, hvordan denne klassificering kan benyttes til at udvælge *repræsentative* historiske regnserier for lokaliteter, hvor der ikke er regndata til rådighed. I **kapitel 7** beskrives det, hvorledes den regionale model benyttes til estimation af T -års hændelser for forskellige nedbørsvariable samt regnkurver og CDS-regn vilkårlige steder i landet, og der sammenlignes med det datagrundlag, der hidtil har været anvendt i Danmark.

Endelig resummeres de væsentligste konklusioner i **kapitel 8**, og et fremtidigt perspektiv for analyse af data fra Spildevandskomitéens Regnmålersystem trækkes op.

Spildevandskomitéens **rekommandation** vedr. anvendelse af data fra Spildevandskomitéens Regnmålersystem kan findes forrest i skriftet, umiddelbart efter indholdsfortegnelsen.

Som supplement til skriftet udgives en teknisk baggrundsrapport samt notater, beregningsværktøjer og data i forskellige bearbejdningsformer via **Internettet**. Det er

tanken, at Internet-hjemmesider hos hhv. DMI, IDA og IMT løbende skal udbygges med illustration af de principper, data og værktøjer, der stilles til rådighed. Materialet vil på denne måde løbende kunne afspejle praksis på området, der forventes at undergå store forandringer fremover, mens selve skriftet er koncentreret om de grundlæggende principper.

En samlet oversigt over det materiale, der stilles til rådighed ifm. udgivelsen af dette skrift, kan findes i **bilag A**. Øvrige bilag indeholder opslagstabeller og detaljerede beregningsanvisninger.

2 Målesystemet, data og kvalitetskontrol

2.1 Målesystemets opbygning

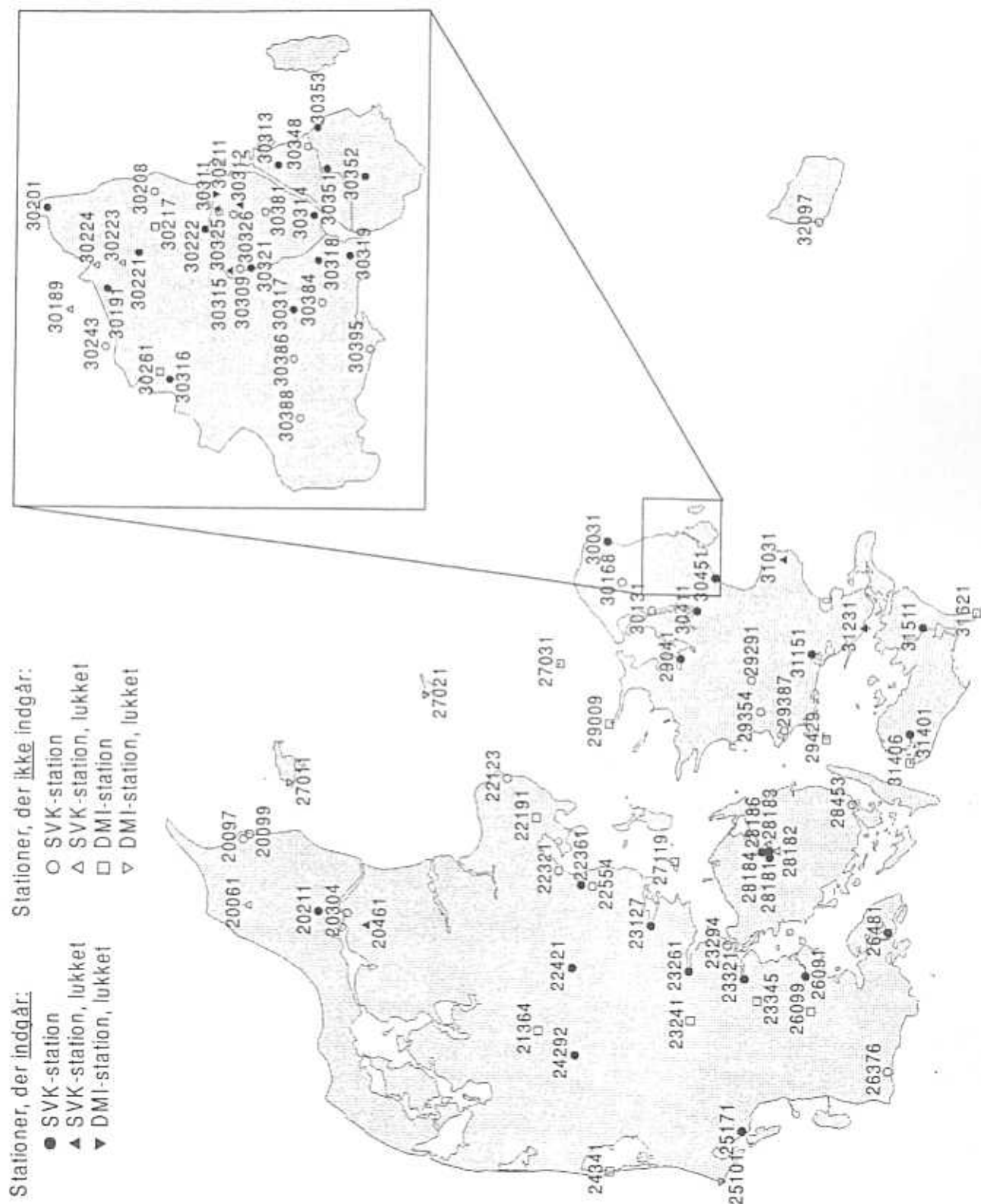
Spildevandskomitéens Regnmålersystem blev etableret d. 1. januar 1979 i samarbejde med en række kommuner, der finansierede opstillingen og senere driften af målere (SVK, 1980). I dag varetages systemets drift og tekniske vedligeholdelse samt oprettelse og nedtagning af målestationer af Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) efter aftale med Regnmålersystemets Styregruppe samt de tilsluttede kommuner og amter.

Frem til årsskiftet 1996/97 har der i alt været tilsluttet 90 målestationer. De fleste stationer, i alt 72, er ejet af kommuner og amter, mens de resterende 18 er ejet af DMI og indgår i DMI's generelle observationssystem. Både stationer i Spildevandskomitéens regi og DMI's egne stationer er tilsluttet DMI's database-system og drives efter enslydende principper. Stationernes placering i Danmark er vist på Figur 3.

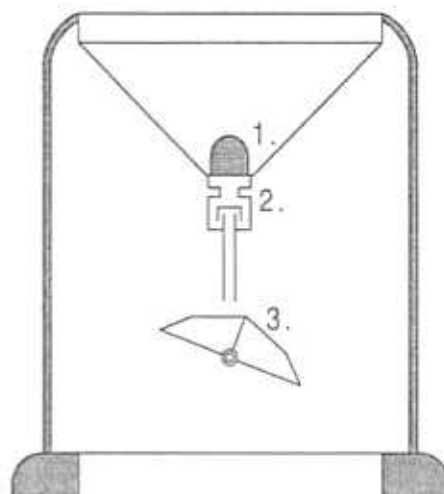
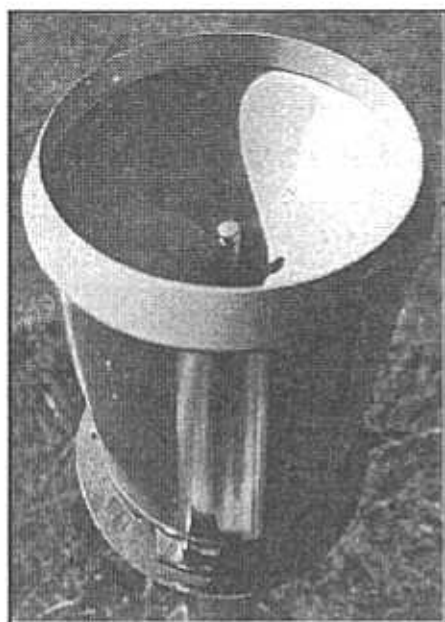
2.2 Måleprincip og data

Målerne tilknyttet DMI's net af automatiske nedbørsmålere er modificerede RIMCO vippekar målere med en opløsning på 0,2 mm nedbør pr. vip. Målernes udseende og opbygning fremgår af Figur 4. De enkelte vip registreres i måleren én gang pr. minut og transmitteres via telefonnettet til DMI. Fordelen ved RIMCO-målerne er den høje opløsning mht. tid og nedbørsvolumen samt den høje nøjagtighed ved måling af kraftige regnintensiteter. Til gengæld er nøjagtigheden mindre ved måling af lave intensiteter, og sne kan akkumuleres i tragten og først registreres som nedbør ved efterfølgende smeltning. Siden 1996 er der installeret forbedrede varmelegemer i målerens trage for at forhindre sidstnævnte problem.

De rå data omregnes automatisk til adskilte regnhændelser bestående af regnintensiteter i ét minuts intervaller, det såkaldte KMD-format (Cappelen, 1993). En nedbørshændelse er i denne forbindelse defineret som mindst to registreringer (bestående af ét eller flere vip), hvor tidsafstanden mellem to på hinanden følgende registreringer er mindre end 60 minutter. Formatet er i 1998 ændret for at kunne håndtere årstal efter år 2000, KM2-formatet (Nielsen, 1999).



Figur 3. Placering af de 90 automatiske nedbørsstationer, der ved årsskiftet 1996/97 har været tilsluttet DMI's databasesystem. Det fremgår af signaturerne, hvilke stationer, der indgår i bearbejdningen.



1. Filter
2. Hævert (syphon)
3. Vippearms med to kar

Figur 4. Foto og principskitse af en RIMCO-vippekar måler. Målerens diameter er ca. 20 cm.

DMI registrerer løbende perioder, hvor de enkelte målere har været ude af drift. Korte perioder uden målinger optræder hovedsagelig ifm. tekniske fejl på målerne eller i datatransmissionen, mens længere varende perioder uden målinger skyldes nedtagning af måleren ifm. ombygning og lignende. I bilag B er vist en oversigt over samtlige stationer, der har været tilsluttet systemet med angivelse af startdato, slutdato, samlet nedbrudsperiode og korregeret observationsperiode (samlet driftsperiode minus samlet nedbrudsperiode). Samlet set har målerne siden 1979 været ude af drift i 7,7% af tiden, iberegnet perioder hvor stationer har været midlertidigt lukket. Midlertidige lukninger medtages ikke ved beregning af fejlprocenten grundet stationsnedbrud. Denne har de senere år ligget helt nede omkring 1% af tiden, og langt de fleste målere har en optid på 100% (Cappelen & Jørgensen, 1997).

DMI's RIMCO-målere er ikke underlagt helt de samme krav mht. tilsyn og vedligeholdelse som SVK's, og nedbrudsperioderne kan derfor være længere for DMI's end for SVK's målere.

De i nærværende bearbejdning benyttede data blev udtrukket fra DMI's database d. 1. januar 1997, og de længste regnserier består således af 18 års observationer.

2.3 DMI's automatiske og manuelle kvalitetskontrol

De registrerede regnhændelser undergår både en automatisk og en manuel kvalitetskontrol på DMI. Den automatiske kvalitetskontrol og bitmarkering i databasen er gennemført fra starten i 1979 og indeholder information om tekniske fejl og manglende data samt intensiteter, der er så ekstreme ($\geq 2 \text{ mm/min} = 33,33 \text{ } \mu\text{m/s}$) at der er mistanke om målefejl. Den manuelle kvalitetskontrol af disse hændelser er først blevet gennemført systematisk fra d. 1. januar 1993 og omfatter følgende procedure for de målestationer, der er tilsluttet Spildevandskomitéens Regnmålersystem (Jørgensen et al., 1998):

- I første omgang betragtes vejrkort for at vurdere, om en ekstrem regn kan have forekommet på det pågældende tidspunkt. Det vurderes, om den betragtede hændelse er opstået ifm. et frontsystem eller som konvektiv nedbør (byger).
- Døgnnedbøren målt på RIMCO-måleren sammenholdes med døgnnedbøren målt på nærliggende manuelle målere (Hellmann-målere fra DMI's landsdækkende net).
- Formen af hyetografen betragtes. For realistiske ekstreme minutintensiteter vil der både før og efter det pågældende minut være registreret noget nedbør.
- Hvis hændelsen efter denne analyse virker mistænkelig, inddrages vejrkort på ny for at foretage en endelig vurdering af, om hændelsen skal forkastes.

Samlet fører den automatiske og manuelle kvalitetskontrol frem til, at nogle hændelser foreslås forkastet. Hændelserne slettes ikke fra databasen, men påføres følgende statusmarkeringer, afhængigt af årsagen til at de foreslås forkastet

- e)* Ekstrem nedbørsmåling i hændelsen
- d)* Afvigelse fra døgnnedbøren målt på nærliggende manuelle målere
- t)* Teknisk fejl under hændelsen
- a)* Hændelsen kan være afbrudt og er således ukomplet

Statusmarkeringerne *t)* og *a)* indføres automatisk i databasen og er således komplette. Statusmarkeringen *e)* indføres også automatisk, men vurderes det ved den efterfølgende manuelle kontrol, at der i den pågældende regn virkelig har optrådt en intensitet $\geq 2 \text{ mm/min} = 33,33 \text{ } \mu\text{m/s}$, så slettes *e)*-markeringen, fordi der ikke er tale om en fejlbehæftet registrering. Da den manuelle kvalitetskontrol først er indført i databasen fra d. 1. januar 1993 kan der optræde misvisende *e)*-markeringer før denne dato, og man skal derfor være forsigtig

med ukritisk at se bort fra disse regn. Tilsvarende er *d*)-markeringen først indført i databasen fra d. 1. januar 1993.

Den manuelle kvalitetskontrol blev ifm. to eksamensprojekter på DTU i efteråret 1992 gennemført for hændelser med ekstreme minutintensiteter for perioden 1. januar 1979 - 31. december 1992, men rettelser af *e*)-statusmarkeringen blev ikke indført i databasen.

2.4 Udvælgelse af data og supplerende kvalitetskontrol

I forbindelse med den systematiske databearbejdning, der ligger til grund for dette skrift, blev det vurderet, at afvigelser på døgnnedbøren ikke nødvendigvis er kritisk for analyse af egenskaber ved ekstremregn (Madsen, 1998). Desuden vil tekniske fejl og afbrydelser i målesignalet føre til underestimering af regnintensiteter og -dybder og aldrig til overestimering. For ikke at reducere datamængden unødigt blev det derfor besluttet at *medtage* samtlige hændelser, der i DMI's database har fået *d*), *t*) og *a*) statusmarkering.

For at sikre et ensartet og homogent datagrundlag i hele måleperioden blev samtlige hændelser med ekstreme minutintensiteter, i alt 538 hændelser, kontrolleret individuelt. Kontrollen blev foretaget ved undersøgelse af hyetografernes form, hvilket i langt de fleste tilfælde giver en klar indikation af, om hændelsen er realistisk eller bør forkastes. Den fornyede kontrol gav anledning til anderledes statusmarkeringer end dem, der forefindes i DMI's database samt naturligvis statusmarkeringer af data, der ikke tidligere var kontrolleret. En samlet oversigt over den yderligere kvalitetskontrol, der er gennemført i forbindelse med dette arbejde, kan findes i (Madsen, 1998). De fornyede statusmarkeringer er indført i den elektroniske database, der offentliggøres i tilknytning til dette skrift (se bilag A), men de er på udgivelsestidspunktet ikke indført i DMI's database.

3 Anvendelse af regninformation indenfor afløbsteknik

3.1 Fordeling af nedbør i tid og sted

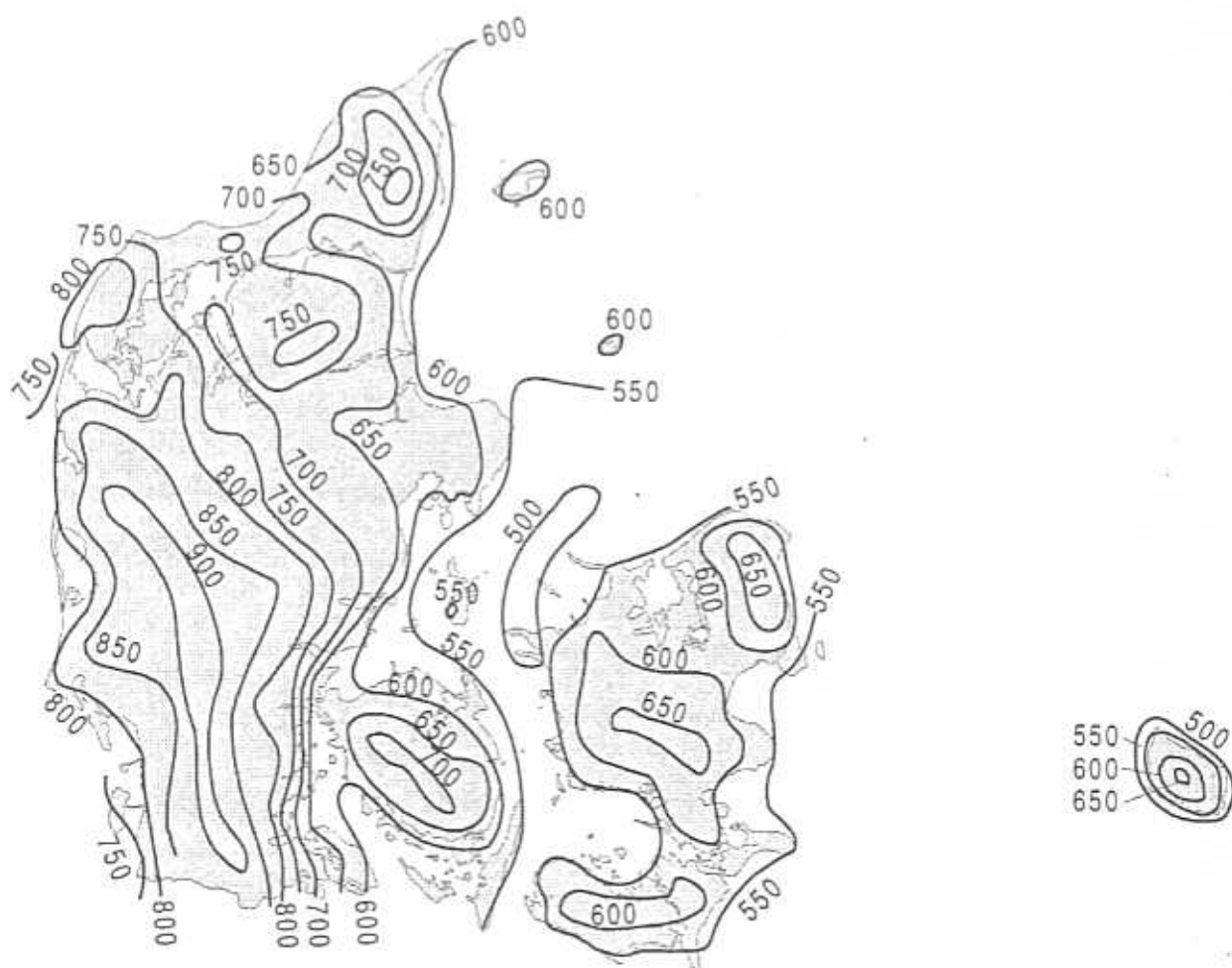
Nedbør kan falde som enten regn, sne eller is. Langt den overvejende del af årsnedbøren i Danmark falder som regn, og der er ikke erfaring for, at nedbør på fast form har afgørende betydning i afløbsteknisk sammenhæng. Der skelnes derfor i det følgende ikke mellem flydende og faste former af nedbør.

Den vigtigste nedbørsdannende mekanisme er kondensering i forbindelse med opstigning og efterfølgende afkøling af fugtig luft. Fænomenet optræder specielt i tre tilfælde, jf. nedenfor:

- Når frontsystemer mødes i forbindelse med vandrende lavtryk presses de varme luftmasser op over de kolde. De udviklede sky- og nedbørsmønstre kan dække store områder på op til flere hundrede til tusinde kvadratkilometer. Selvom regnintensiteten ved sådanne *frontregn* typisk er moderat, kan der falde store mængder nedbør i løbet af de timer til dage, regnen varer.
- I modsætning hertil optræder den *konvektive* regn ved lokal opvarmning nedefra og efterfølgende opstigning af ustabile luftmasser. Regnintensiteten kan være høj, og der kan i løbet af minutter eller få timer falde store mængder regn under sådanne hændelser, men de er normalt karakteriseret ved en langt mindre arealmæssig udbredelse end frontregn. Typisk dækker de kun fra nogle få kvadratkilometer og nedefter. Som eksempler på konvektive regn kan nævnes voldsomme tordenskyll samt mindre spredte og evt. "vandrende" regnbyger, der sommetider kan observeres på en dansk sommerdag.
- Den *orografiske* effekt opstår ved at fugtige luftmasser fra havet passerer kystlinier eller højderygge og derved presses opad. Effekten er i Danmark dokumenteret ved måling af nedbørssituationer i Susåens opland på Sjælland (Allerup et al., 1982), og som det ses af Figur 5 er det generelle nedbørsmønster klart påvirket af denne effekt. Årsmiddelnedbøren (ÅMN) varierer regionalt mellem 500 og 900 mm efter et mønster, der i det væsentlige styres af den dominerende vestlige vindretning, afstanden til kystlinier og højden over havniveau (elevationen). Således skyldes det relativt tørre område i

Nordjylland, at mange skysystemer allerede har mistet en væsentlig del af fugtindholdet ved passage af de sydnorske fjelde ca. 200 km mod nordvest, og tilsvarende får Fyn og Sjælland relativt lidt nedbør, efter skysystemerne har passeret den jyske højderyg.

Der optræder ofte kraftig konvektion og nedbørsdannelse midt i større områder med generel opstigning af fugtig luft i forbindelse med lavtryk. Tilsvarende afhænger den orografiske effekt af vindretningen, og regnceller, der udvikles i forbindelse med konvektion eller passage af frontsystemer, udvikles og aftager dynamisk, samtidig med at de transporteres med vinden. Det er derfor vanskeligt at skelne mellem egenskaber ved regnen, der hidrører fra de tre nævnte meteorologiske fænomener. F.eks. er der for enkeltstående regnhændelser ikke basis for at skelne klart mellem konvektive bygesystemer og frontregn.



Figur 5. Årsmiddelnedbørens fordeling i Danmark baseret på nedbørsnormaler fra perioden 1961-90. Optegnet efter (Frich et al., 1997).

Skysystemernes type og bevægelsesmønster har stor betydning for nedbørens dynamiske fordeling i tid og sted og dermed også for de resulterende skadevoldende effekter som f.eks. oversvømmelser og forureningsudledninger. Set over en længere tidsskala – f.eks. et år som i Figur 5 – er der imidlertid tale om en mere stationær, geografisk (eller regional) fordeling af nedbøren. Spørgsmålet er nu, om de ekstreme regnhændelser, der karakteriseres ved en tilhørende gentagelsesperiode for overskridelse (T), følger et tilsvarende mønster med regional variation, eller om de er så voldsomme, at de ikke i væsentlig grad styres af jordoverfladens egenskaber.

3.2 Fladeregn og punktregn

Det er ikke almindeligt – hvis overhovedet muligt – at måle den dynamiske udvikling i tid og sted af fladeregn, der falder over et opland. Muligvis vil radarmålinger i fremtiden kunne give detaljeret information om regnens arealmæssige udbredelse til brug i afløbsteknisk sammenhæng, men her og nu må afløbsteknikere stille sig tilfreds med regndata målt på faste lokaliteter – punktregn. I kapitel 2 redegøres der kortfattet for måleprincipperne i Spildevandskomitéens Regnmålersystem. I større byer råder man over flere regnmålere placeret indenfor samme opland, men i langt de fleste tilfælde må man klare sig med at ekstrapolere informationen fra én regnmåler til hele oplandets areal. Det siger sig selv, at denne ekstrapolation af regndata kan introducere en væsentlig usikkerhed i ingeniørmæssige beregninger. Den er dog ikke genstand for nærmere undersøgelser i nærværende skrift, der kun omhandler analyse af punktregn. For yderligere information henvises til speciallitteraturen, f.eks. (Niemczynowicz, 1984; Jensen, 1990; Andersen et al., 1991; Arnbjerg-Nielsen & Harremoës, 1996a,b).

3.3 Nedbørsvariable af afløbsteknisk relevans

På basis af målinger af nedbør i ét punkt kan forskellige variable udledes, der hver især beskriver egenskaber ved selve nedbørsprocessen eller ved de nedbørsgenererede, skadevoldende effekter.

- Sådanne nedbørsvariable kan f.eks. være enkelthændelsers *maksimale middelintensiteter* for forskellig varighed, der kan danne grundlag for de velkendte *regnkurver* og *regnrækker* (SVK, 1974). Den maksimale middelintensitet for varigheden 10 minutter benævnes kort *10 min. intensiteten*.

- Det kan også være *volumenbaserede variable* baseret på integration indenfor den enkelte nedbørshændelse eller indenfor et fast tidsinterval. Som eksempler herpå kan nævnes det totale nedbørsvolumen pr. hændelse (regndybden pr. hændelse, se Figur 1) eller f.eks. døgnnedbøren, der i Danmark måles af DMI på flere hundrede lokaliteter.
- Endelig kan det være *transformerede*, eller *aflødte* variable, defineret i forhold til et afløbssystems opbygning og indenfor en given belastningsperiode for afløbssystemet. Sådanne variable kan danne grundlag for afbildninger af nødvendige *bassinvolumener* og *overløbsvolumener* for historiske regnserier, som angivet i Spildevandskomiteéens skrift nr. 18 og 21 (SVK, 1984a,b).

3.4 Statistisk beskrivelse af ekstremhændelser

Grundlæggende benyttes betegnelsen ekstremhændelser om ekstreme værdier af de ovenfor definerede nedbørsvariable. Formålet med en statistisk beskrivelse er på baggrund af observerede data at fastlægge, hvor ofte ekstremhændelser af en given størrelse overskrides. *Gentagelsesperioden* (T) betegner længden af den periode, der i gennemsnit går mellem ekstremhændelser af samme størrelse, og disse hændelser betegnes derfor T -års hændelser.

I statistikens verden betragtes ekstremhændelserne som udfald af en stokastisk proces (en stikprøve), og formålet med den statistiske beskrivelse kan være at *estimere*, hvor ofte et givet niveau af den stokastiske proces overskrides. Alternativt kan man ønske at estimere en T -års hændelse svarende til en valgt gentagelsesperiode. Det antages grundlæggende, at den stokastiske proces er *stationær*, hvilket betyder at dens statistiske egenskaber ikke ændrer sig med tiden.

3.4.1 Ikke-parametrisk estimation - plotteformler

En simpel ikke-parametrisk metode til estimation af T -års hændelser består i at rangordne observationerne efter størrelse og tildele hver af dem en empirisk gentagelsesperiode vha. en *plotteformel*. Indenfor afløbsteknik anvendes ofte den simple *California*-plotteformel

$$T_m = \frac{t}{m} \quad (3.1)$$

hvor T_m er gentagelsesperioden for den enkelte observation med rang m , og t er længden af den samlede observationsperiode. På denne måde tildeler man den

største observation i observationsperioden på t år en gentagelsesperiode på $T_1=t$ år, den næststørste observation en gentagelsesperiode på $T_2=t/2$ år etc. Det er denne plotteformel, der er anvendt i Spildevandskomitéens tidligere skrifter om regndata (SVK, 1984a).

Mere generelt kan det vises, at gentagelsesperioden vil ligge i intervallet $t/m < T_m < t/(m-1)$. Den nedre grænse svarer til formel (3.1) og virker intuitivt rimelig, men der er stor sandsynlighed for, at den største observerede ekstremhændelse ($m=1$) har en gentagelsesperiode, der er større end observationsperiodens længde ($T_1=t$). Omvendt kan den største observation slet ikke plottes ved brug af $T_m=t/(m-1)$. Der eksisterer adskillige plotteformler baseret på forskellige statistiske principper, og en af de mest anerkendte er den såkaldte *median*-plotteformel (Rosbjerg et al., 1992)

$$T_m = \frac{t}{n} \frac{n+0,4}{m-0,3} \approx \frac{t}{m-0,3} \quad (3.2)$$

hvor n er antallet af observerede ekstremhændelser, og hvor det forenklede udtryk kan bruges i de tilfælde, hvor n er stor.

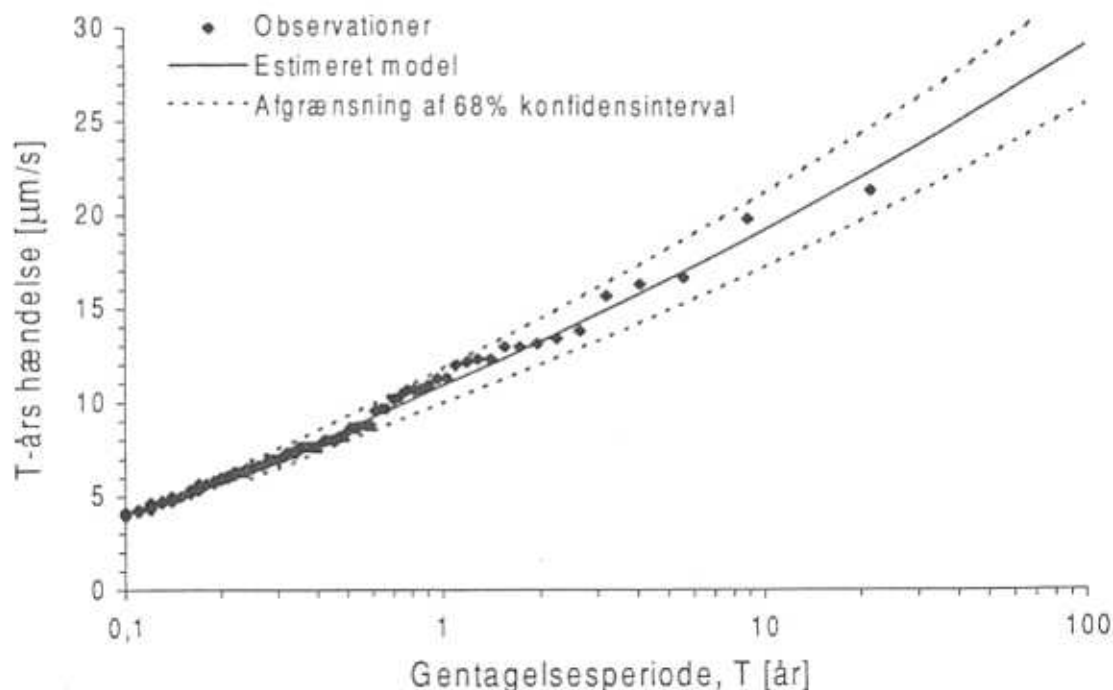
En afbildning af sammenhørende værdier af rangordnede observationer (en ekstremværdiserie) og estimerede gentagelsesperioder giver den empiriske fordeling af ekstremværdierne. Ekstremværdikurverne i Figur 1 er plottet med California-plotteformlen (3.1), hvilket ses af, at den højeste gentagelsesperiode svarer netop til observationsperiodens længde (ca. 9 år). Ekstremværdikurven i Figur 6 og de øvrige ekstremværdikurver i dette skrift er optegnet med den mere korrekte - median-plotteformel (3.2).

Det er muligt at bestemme et estimat af T -års hændelsen ved interpolation i den empiriske fordeling optegnet vha. en plotteformel. Ekstrapolation er derimod ikke umiddelbart mulig, og generelt giver den ikke-parametriske estimationsmetode store usikkerheder for gentagelsesperioder der er større end ca. $\frac{1}{4}$ af observationsperioden. De længste regnserier fra Spildevandskomitéens Regnmålersystem har ved udgangen af 1996 en observationsperiode på omkring 18 år, og det betyder, at man ikke med rimelig nøjagtighed kan bestemme T -års hændelser for gentagelsesperioder over ca. 4-5 år på grundlag af plotteformler.

3.4.2 Parametrisk estimation - modeller

For estimation af T -års hændelser med vilkårlig gentagelsesperiode er det nødvendigt at introducere parametriske estimationsmetoder, hvor en statistisk fordeling tilpasses de observerede ekstremværdier. Parametrisk modellering

muliggør desuden en eksplicit kvantificering af den tilhørende estimationsusikkerhed (stikprøveusikkerhed) for ekstremhændelser. Et eksempel på tilpasning af en parametrisk model med tilhørende usikkerhedsmål er vist i Figur 6. Den fuldtoptrukne kurve angiver den estimerede model (middelværdien for de estimerede T -års hændelser), mens de stiplede kurver angiver afgrænsningen af 68% konfidensintervallet (middelværdien $\pm$ én gange standardafvigelsen på T -års estimatet). Emnet uddybes nærmere i afsnit 4.1.



Figur 6. Eksempel på empirisk fordeling af ekstremhændelser (observationer) og estimeret ekstremværdimodel med tilhørende usikkerhedsmål (angivet som 68% konfidensintervallet for T -års estimatet). Den viste nedbørsvariabel er 10 min. intensiteten for en tilfældig station (data fra 1979-96).

3.5 Grundlæggende typer af regndata

Dimensionering og analyse af afløbssystemer samt de dertil knyttede renseanlæg og recipienter fordrer anvendelse af et bredt spektrum af ingeniørmæssige beregningsmetoder og -værktøjer samt regndata tilpasset efter formålet. Når man dimensionerer, udvælges dimensionsgivende regn svarende til en valgt gentagelsesperiode. Når man analyserer, kan man derimod anvende forskellige typer regndata, hvor gentagelsesperioden ikke nødvendigvis er kendt på forhånd, for at få indblik i, hvordan systemet fungerer i specielle situationer

eller generelt. Ofte vil man i en analyse situation benytte sig af regnserier med høj tidsmæssig opløsning.

Det er i skriftet valgt at klassificere forskellige typer af regndata efter deres væsentligste egenskaber som vist i Tabel 1. Grundlæggende skelnes der mellem *dimensioneringsregn* og *tidsserier* med høj opløsning, mellem *historiske* og *syntetiske* regndata, og mellem *lokale* og *regionale* regndata. I de efterfølgende afsnit knyttes en række uddybende kommentarer til de forskellige typer af regndata, der er nævnt i Tabel 1, til belysning af deres anvendelighed i forskellige sammenhænge.

Tabel 1. Klassificering af forskellige typer af regndata anvendt til dimensionering og analyse af afløbssystemer.

	Tidsserier med høj opløsning	Dimensioneringsregn
Lokale data	• Historiske regnserier • Syntetiske regnserier	• Kasseregn • CDS-regn
Regionale data	• Repræsentative hist. regnserier • Syntetiske regnserier	• Kasseregn • CDS-regn

3.5.1 Dimensioneringsregn og tidsserier med høj opløsning

Dimensioneringsregn (engelsk: *design storms*) er T -års hændelser, der benyttes som dimensionsgivende input til en beregning. Som eksempel kan nævnes *kasseregn* taget fra regnrækker eller -kurver publiceret af Spildevandskomitéen (SVK, 1974). Kasseregn egner sig f.eks. godt til dimensionering af ledningsanlæg med den rationelle metode.

Indtil begyndelsen af 1980'erne blev dimensionering og analyse af afløbssystemer gennemført udelukkende med dimensioneringsregn som input. Den grundlæggende antagelse ved dimensioneringsregn er, at den relevante skadevoldende effekt (f.eks. rørfyldning, oversvømmelse eller forureningsaflastning) har de samme statistiske egenskaber som regnen. Der er imidlertid ingen garanti for, at gentagelsesperioden for den skadevoldende effekt er den samme som for den valgte dimensioneringsregn. Afløbssystemer er komplicerede, ikke-lineære systemer, og der eksisterer ikke nogen simpel lineær transformation af statistik for regnens egenskaber til statistik for skadevoldende effekter.

Dette er årsagen til, at afløbstekniske beregninger efter den personlige computers fremkomst har ændret sig så kraftigt i retning af at benytte historiske regnserier med høj opløsning som input til simuleringsmodeller. På denne måde kan skadevoldende effekter beregnes for en lang periode, og statistikken kan laves direkte for tidsserier af beregningsresultaterne (SVK, 1984a). SAMBA-modellen, der i Danmark benyttes meget til beregning af forureningsaflastninger fra afløbssystemer, åbner med sit forenkede beregningsprincip netop denne mulighed. I takt med at billige, kraftige computere er kommet på markedet, er det først for nyligt blevet realistisk med MOUSE-modellen at gennemføre langtidssimulering af detaljerede hydrodynamiske forhold ifm. opstuvning i kloaksystemer.

I praksis kan forskellen mellem den dimensionerende og den analyserende situation i nogle tilfælde være uklar pga. den måde, ingeniørmæssige beregninger foretages på. Anvendelse af den rationelle metode ifm. dimensionering af ledningsanlæg er klart en dimensioneringssituation, mens den efterfølgende kontrol af ledningsdimensioner vha. en simuleringsmodel må betegnes som en analyserende situation, hvad enten der benyttes dimensioneringsregn, som f.eks. CDS-regn, eller historiske regnserier som input til beregningerne.

3.5.2 Historiske og syntetiske regndata

Der kan være specielle analyse-situationer, der går ud på at identificere forhold, der har haft betydning i forbindelse med en aktuel oversvømmelse eller forureningsudledning. I sådanne tilfælde er det vigtigt at kende til den pågældende regnhændelses detaljerede egenskaber. Tilsvarende kan det ifm. modelkalibrering være nødvendigt at lægge vægt på detaljerede tidsforløb af såvel regndata som f.eks. resulterende, målte afstrømningsdata.

I en konkret dimensioneringssituation ønsker man imidlertid typisk at udtale sig om, hvordan et afløbssystem vil opføre sig i lang tid fremover. Det er i den forbindelse regnens statistiske egenskaber, der har betydning, og ikke de historiske, målte regnhændelser. Historiske regndata vil netop *ikke* optræde igen i fremtiden, og man bør derfor i denne sammenhæng ikke lægge for stor vægt på enkelthændelsers detaljerede egenskaber. Specielt skal man være varsom med at lægge vægt på enkelte, meget store, ekstremhændelser, hvis gentagelsesperiode er usikkert bestemt.

Dimensioneringsregn er i sagens natur *syntetiske*, idet de udtrykker regnens statistiske egenskaber og kun gennemsnitligt tilnærmer formen af virkelige regnhændelsers hyetografer. Tilsvarende kan man (i princippet) også med en

stokastisk model generere syntetiske regnserier, der genskaber regnens statistiske egenskaber, uden at nogen af de syntetiske regnhændelser er identiske med de målte, historiske regnhændelser.

3.5.3 Lokale og regionale regndata

Det er blevet almindelig sprogbrug at omtale regndata målt på lokaliteter, der er placeret indenfor eller tæt ved et aktuelt kloakopland som *lokale* regndata. Det forekommer intuitivt rimeligt at anvende lokale regndata som input til beregninger, men i en lang række situationer, hvor lokale data ikke eksisterer eller ikke er umiddelbart tilgængelige, vil man være nødsaget til at ty til data målt på andre lokaliteter, f.eks. lokaliteter med tilsvarende fysiografiske og klimatiske forhold.

Ved *regionalisering* forstås opbygning af en model for den regionale (geografiske) variation samt for den resulterende statistiske usikkerhed. Typisk vil der være tale om en regressionsmodel, der sammenholder tydelige geografiske variationer af ekstreme nedbørsvariable med tilgængelig information om tilsvarende geografiske variationer af fysiografiske og klimatiske parametre. Som nævnt i afsnit 1.1 har årsmiddelnedbøren været anvendt som forklarende parameter, men mange andre kan i princippet komme på tale, se afsnit 5.4. Regionalisering kan også bestå i at opdele et område i subregioner, der hver især er mere homogene.

På den ene side kan regionalisering medvirke til at forstå og tage højde for de regionale variationer, og derved forbedres grundlaget for at vælge *repræsentative* regndata på lokaliteter uden målestationer. På den anden side gør regionalisering det muligt at inddrage information om ekstreme regnhændelser fra flere målestationer end den aktuelle. Dette er specielt en fordel, når ekstremhændelser for meget store gentagelsesperioder, der overstiger observationsperiodens længde, skal estimeres.

3.6 Anvendelse af tidsserier med høj opløsning

Tidsserier med høj opløsning anvendes i dag som direkte input til simuleringer ved analyse af komplekse hydrologiske og hydrauliske forhold, hvor skadevoldende effekter kan optræde på mange forskellige tidsskalaer. Fordelen ved at tage udgangspunkt i regnserien er, at den afspejler samtlige relevante egenskaber ved regnen, fra kraftige regnintensiteter med kort varighed til regnvolumen over længere tidsrum. Der er imidlertid også problemer knyttet til anvendelse af regnserier.

3.6.1 Historiske regnserier

Historiske regnserier som f.eks. regnserierne fra Spildevandskomitéens Regnmålersystem er almindeligt anvendt i afløbsteknisk praksis i dag og afspejler i princippet (når der ses bort fra målefejl og -usikkerheder) den sande, ufiltrerede nedbørsproces.

Målestationerne tilsluttet Spildevandskomitéens Regnmålersystem er som vist på Figur 3 ikke placeret systematisk rundt omkring i landet. Der er klar overvægt af stationer omkring de større byer, og der er ingen stationer netop i Midtjylland, hvor årsmiddelnedbøren er størst. Som vist på Figur 1 udviser de historiske regnserier store variationer, men det er ikke umiddelbart klart, hvilke stationer, der må betragtes som undtagelser, når data afviger fra det regionale mønster. Der kan f.eks. være systematiske målefejl forårsaget af specielle forhold i regnmålerens næromgivelser. Tilsvarende er det ikke klart, hvorledes man bør udvælge repræsentative historiske regnserier på lokaliteter, hvor en målestation ikke forefindes.

Et andet problem med data fra Spildevandskomitéens Regnmålersystem er, at de historiske regnserier er relativt korte (maksimalt 18 år fra 1979-96) i forhold til visse anvendelser. Som tidligere nævnt giver den ikke-parametriske estimationsmetode vha. plottetformler store usikkerheder for gentagelsesperioder større end ca. 4-5 år ($\frac{1}{4}$ af observationsperioden); for gentagelsesperioder herover må man benytte sig af parametrisk estimation. Den europæiske norm for offentlige afløbssystemer, der nu også er dansk standard (DS, 1999), foreslår en acceptabel gentagelsesperiode for oversvømmelse i centrumbebyggelser på $T=20-30$ år. Dette udelukker historiske regnserier som input til modelsimuleringer, idet skadevoldende effekter med gentagelsesperiode større end observationsperioden ikke vil kunne beregnes vha. historiske regnserier.

De to nævnte problemstillinger (geografisk variation samt korte historiske regnserier) understreger behovet for regionalisering af regndata i Danmark.

3.6.2 Syntetiske regnserier

Syntetiske regnserier genereret med en stokastisk model er i modsætning til historiske regnserier filtreret i forhold til den anvendte model, og man skal derfor være forsigtig med ukritisk at anvende syntetiske regnserier som input til simuleringer. En oversigt over de seneste års danske arbejde med udvikling af en regnserie-generator kan findes i (Arnbjerg-Nielsen, 1999). Allerede nu er der nået væsentlige resultater, men der er tendens til, at de genererede syntetiske regnserier underestimerer specielt langvarige og volumenrige ekstremregn.

Både historiske og syntetiske regnserier kan være lokale data. I så fald vil regnserie-generatoren være kalibreret vha. den lokale historiske regnserie, så den syntetiske regnserie har de samme statistiske egenskaber som den historiske regnserie. Dette kan f.eks. være tilfældet i en situation, hvor man ønsker en lang regnserie med de samme statistiske egenskaber som en kortere, lokal regnserie, der har været benyttet ved kalibrering af en simuleringsmodel.

Man kan også forestille sig regionale syntetiske regnserier, hvis der opbygges en regional model for parametrene i regnserie-generatoren. Dette har specielt interesse for lokaliteter, hvor ingen målinger foretages. Hvis den regionale model er tilstrækkelig god til at forklare de regionale variationer, og regnserie-generatoren samtidig tilstrækkeligt godt kan genskabe de historiske regnseriers statistiske egenskaber, vil de regionale syntetiske regnserier i teorien være mere nøjagtige og dermed formentlig mere anvendelige til afløbstekniske formål end både de historiske og syntetiske lokale regnserier. På sigt kan man derfor forestille sig, at syntetiske regnserier i nogen udtrækning vil erstatte historiske regnserier som input til afløbstekniske beregninger.

3.6.3 Repræsentative historiske regnserier

For nærværende er det teoretiske grundlag ikke til stede for generering af regionale syntetiske regnserier, og det er derfor nødvendigt at forholde sig til, hvilke principper der skal ligge til grund for valg af *repræsentative*, historiske regnserier i de situationer, hvor ingen lokal regnserie forefindes, eller hvor den lokale regnserie er for kort. Løsningen er for hver målestation at sammenholde lokale estimater af T -års hændelser for forskellige nedbørsvariable med de tilsvarende regionale estimater og udvælge stationer, der svarer godt til den regionale model. Derefter tages udgangspunkt i den eller de forklarende variable på den aktuelle lokalitet, og der udvælges en historisk regnserie fra en lokalitet med tilsvarende parametre.

3.7 Anvendelse af dimensioneringsregn

Kasseregnsregning anvendes i dag typisk kun til relativt simple dimensioneringsproblemer. Der eksisterer imidlertid mange andre typer af syntetiske dimensioneringsregn, hvor hyetografens form fastlægges efter empiriske principper. Én af disse - den såkaldte *Chicago Design Storm* (CDS), der blev udviklet i midten af dette århundrede i USA (Keifer og Chu, 1957) - har fundet bred anvendelse i mange danske ingeniørfirmaer, f.eks. ved analyse af den hydrauliske kapacitet af mindre opstrøms beliggende kloakoplande.

Motivationen for at anvende CDS-regn er ofte økonomisk, idet en del simuleringer og dataanalyser kan spares i forhold til anvendelse af historiske regnserier. Man bør imidlertid anvende CDS-regn - og alle andre typer dimensioneringsregn - med forsigtighed, fordi de kun giver et filtreret, begrænset billede af regnens egenskaber.

En enkelt CDS-regn indeholder for én valgt gentagelsesperiode information om maksimale middelintensiteter for et interval af varigheder og samler på denne måde information fra en hel regnkurve i én enkelt dimensioneringsregn. Det bør her understreges, at sammenhængen mellem maksimal middelintensitet og varighed er et forenklet billede af regnen, der relaterer sig direkte til problemstillingen *fuldtløbende ledningskapacitet*. Dette gælder uanset, om man dimensionerer ledningsnet vha. den rationelle metode, eller om man analyserer ledningsnet ved med CDS-regn som input til en simuleringsmodel at kontrollere ledningskapaciteter.

Det er tidligere fastslået, at brug af regnkurver eller -formler ifm. dimensionering af bassiner kan føre til betragtelig underdimensionering, fordi der ikke tages højde for regnhændelser, der følger umiddelbart efter hinanden, uden at bassinet når at tømmes (SVK, 1984a). Tilsvarende vil det formentlig i mange tilfælde ikke give rimelige resultater, hvis CDS-regn benyttes ifm. analyse af hydrauliske problemer i store komplekse afløbssystemer, hvor tilbagestuvning har betydning, ved beregning af bassinvolumener og forureningsafloadninger samt ifm. vurdering af potentialet for on-line styring af afløbssystemer. Brug af regnkurver eller CDS-regn til analyse af andre problemstillinger end *fuldtløbende ledningskapacitet* bør i hvert enkelt tilfælde godtgøres ved en nøjere undersøgelse.

Omvendt vil der uomtvisteligt være fordele ved at anvende CDS-regn, idet de allerede på nuværende tidspunkt, hvor syntetiske regnserier ikke er tilgængelige, åbner mulighed for at inddrage en regional beskrivelse af ekstremregn, hvilket bl.a. gør det muligt på enhver lokalitet i Danmark at estimere ekstremhændelser - selv for gentagelsesperioder, der overstiger de historiske regnseriers observationsperiode. I alle tilfælde bør man være opmærksom på at sætte den usikkerhed, der introduceres ved at anvende filtrerede regndata, i forhold til andre betydende usikkerheder samt den øgede nøjagtighed, der opnås ved inddragelse af regionale regndata, specielt ved vurdering af skadevoldende effekter for store gentagelsesperioder.

Dimensioneringsregn (både kasse- og CDS-regn) kan jf. Tabel 1 estimeres på baggrund af lokale historiske regnserier. Hvis der gennemføres en regionalise-

ring af de berørte nedbørsvariable udtrukket fra historiske regnserier, vil man imidlertid kunne estimere regionale dimensioneringsregn. Da disse formentlig vil udgøre det mest nøjagtige dimensioneringsgrundlag, vil der i sådanne tilfælde ikke længere være grund til at estimere dimensioneringsregn ud fra lokale regnserier.

4 Statistiske begreber og værktøjer

4.1 Estimation af T -års hændelser på baggrund af lokale data

Som omtalt i afsnit 3.4 betragtes ekstreme nedbørsvariable grundlæggende som udfald af en stokastisk proces, og parametrisk estimation af T -års hændelser foretages ved at tilpasse en statistisk fordeling til de observerede ekstremværdier. Nedenfor introduceres en metode, der er udviklet delvist i tilknytning til arbejdet med regndata fra Spildevandskomitéens Regnmålersystem, og som er velegnet til senere at indgå i regionalisering af regndata (Madsen & Rosbjerg, 1997a,b). Metoden er baseret på den såkaldte overskridelsesmodel (*Partial Duration Series* model, PDS-model), der inkluderer hændelser over et fastlagt afskæringsniveau, hvorved små, ubetydelige hændelser lades ude af betragtning.

PDS-modellen består af to elementer, dels modellering af forekomsten af overskridelser og dels modellering af overskridelsernes størrelse. Normalt antages, at forekomsten af overskridelserne kan beskrives ved en Poisson proces med konstant eller årlig periodisk varierende intensitet. Heraf følger, at antallet af overskridelser kan beskrives ved en Poisson-fordeling med intensitet, der er lig med det forventede antal årlige overskridelser. Til modellering af overskridelsernes størrelse benyttes en statistisk fordeling, der bestemmes på basis af overskridelsesserier (PDS-serier) for samtlige stationer i regionen. Flere forskellige statistiske fordelinger kan i princippet benyttes, men det er godtgjort, at den generaliserede Pareto-fordeling (GP-fordeling) for et bredt udvalg af nedbørsvariable kan beskrive overskridelserne for danske regndata. T -års hændelsen for den generaliserede Pareto-fordeling z_T er givet ved

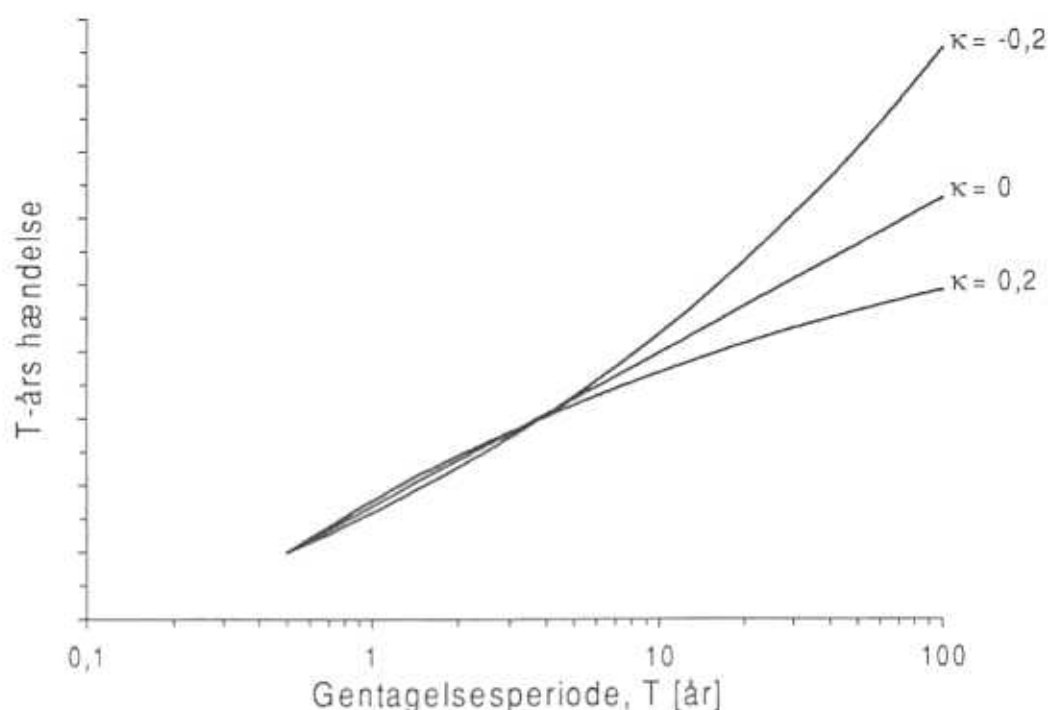
$$z_T = z_0 + \mu \frac{1 + \kappa}{\kappa} \left[1 - \left(\frac{1}{\lambda T} \right)^\kappa \right] \quad (4.1)$$

hvor z_0 er afskæringsniveauet,

λ er det gennemsnitlige antal overskridelser pr. år,

μ er middelværdien af overskridelsernes størrelse (i det følgende benævnt middelloverskridelsen), og

κ er formparameteren i GP-fordelingen.



Figur 7. T -års hændelsen for GP-fordelingen for forskellige værdier af formparameteren κ .

T -års hændelser beregnet af (4.1) er vist i Figur 7. Negative værdier af formparameteren κ giver den karakteristiske opadgående krumning af ekstremværdikurven, som ofte ses, når ekstremhændelser afbildes vha. plottelormlerne, se Figur 1 og Figur 6. Afskæringsniveauet z_0 ses i Figur 7 som den nedre grænse for T -års hændelser, og et højere afskæringsniveau vil umiddelbart give sig udslag i et lavere gennemsnitligt antal overskridelser pr. år, λ . Forskellige værdier af middelloverskridelsen μ vil afspejle sig i hældningen på ekstremværdikurverne (større μ giver større hældning).

I forbindelse med anvendelse af PDS-modellen skal afskæringsniveauet z_0 først fastlægges, og dernæst kan modellens tre parametre μ , λ og κ estimeres. Ved fastlæggelse af z_0 vil man skele til, at et rimeligt stort antal overskridelser er tilstede samt at modellens forudsætninger er opfyldt (Rosbjerg & Madsen, 1992). Modellens parametre samt usikkerheden herpå kan estimeres på baggrund af de observerede data vha. såkaldte L -momenter, der er særligt robuste overfor outliers i data. Herved fås T -års estimatet af (4.1) ved at indsætte de estimerede parametre (en "hat" indikerer et estimat af parameteren)

$$\hat{z}_T = z_0 + \hat{\mu} \frac{1 + \hat{\kappa}}{\hat{\kappa}} \left[1 - \left(\frac{1}{\hat{\lambda} T} \right)^{\hat{\kappa}} \right] \quad (4.2)$$

Usikkerheden på dette estimat kan bestemmes af

$$\text{Var}\{\hat{z}_T\} = B_1 \text{Var}\{\hat{\lambda}\} + B_2 \text{Var}\{\hat{\mu}\} + B_3 \text{Var}\{\hat{\kappa}\} \quad (4.3)$$

hvor $B_i, i=1,2,3$ er funktioner af de estimerede parametre, og $\text{Var}\{\cdot\}$ er estimationsvariansen på de estimerede PDS-parametre.

Estimationsusikkerheden (hér angivet som varians) skyldes, at modellens parametre er estimeret på baggrund af en begrænset observationsperiode (en begrænset stikprøvestørrelse). I Figur 6 er givet et eksempel på T -års hændelser estimeret vha. (4.2) samt tilhørende usikkerhedsmål angivet som T -års estimatet $\pm$ én gange standardafvigelsen beregnet vha. (4.3). For nærmere detaljer vedr. estimationen henvises til den tekniske baggrundsrapport (Madsen, 1998) samt den statistiske speciallitteratur.

4.2 Regional modellering af punktregrn

4.2.1 Generelle principper

En estimeret T -års hændelse (eller en estimeret parameterværdi i ekstremværdi-modellen) ved station nr. i kan skrives på følgende form

$$\hat{\theta}_i = \theta_i + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (4.4)$$

hvor θ_i er den sande, men ukendte værdi på en lokalitet, ε_i er en afvigelse fra den sande værdi grundet estimationsusikkerhed, og M er antallet af stationer i regionen.

For at fortolke de regionale variationer samt de tilknyttede usikkerheder kan man opstille en regional model for variationen af estimaterne. Med reference til (4.4) kan den regionale model opskrives

$$\hat{\theta}_i = \theta_i + \varepsilon_i = \hat{\theta}_{REG,i} + \delta_i + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (4.5)$$

hvor θ_i , ε_i og M har samme betydning som ovenfor, $\hat{\theta}_{REG,i}$ betegner et regionalt estimat af θ ved station nr. i , og δ_i betegner en afvigelse grundet residual modelusikkerhed.

Det regionale estimat $\hat{\theta}_{REG,i}$ tilvejebringes typisk vha. en regressionsmodel, hvor relevante fysiografiske og klimatiske parametre benyttes som regressorer (forklarende variable). Såfremt en region er så heterogen, at det ikke er muligt at beskrive den regionale variation som en jævn flade på denne måde, kan man forsøge at beskrive variationen ved opdeling af regionen i mindre enheder (sub-

regioner), der hver især udviser større grad af homogenitet end den samlede region. Den mest simple form for opdeling i subregioner baseres på stationernes geografiske placering, motiveret af at stationer der ligger tæt sammen generelt er mere ens end stationer der ligger langt fra hinanden. Det bør her bemærkes, at opdeling i subregioner giver skarpt afgrænsede regioner og derved skaber diskontinuiteter i ekstremværdikarakteristika.

Det er væsentligt at gøre sig forskellen mellem ε_i og δ_i klar. Hvor ε_i repræsenterer usikkerhed grundet et begrænset antal observationsår (en begrænset stikprøvestørrelse) ved station nr. i , repræsenterer δ_i usikkerhed grundet den regionale models manglende evne til beskrive den observerede regionale variation. δ_i kan desuden skyldes f.eks. systematiske målefejl eller mikroklimatiske forhold på en lille spatial skala sammenlignet med den kendte variation af regressorerne.

Begge typer usikkerhed er relateret til *estimation* af statistiske størrelser, men for at sikre en klar sprogbrug benævnes ε_i i dette skrift *stikprøveusikkerhed*, mens usikkerheden relateret til δ_i kaldes *residual modelusikkerhed*.

Ved opstilling og estimation af en regional model er det vigtigt at tage hensyn til den indbyrdes korrelation mellem stationerne, der skyldes at regnområder kan dække store arealer og bevæge sig, så den samme nedbør påvirker flere stationer, evt. tidsforskudt. Den samme information skal naturligvis kun medtages én gang i den stikprøve af data, der ligger til grund for estimationen. I Mikkelsen et al. (1996) og Madsen (1998) redegøres for, hvordan korrelation af denne type kan indarbejdes i ε -leddet i den ovennævnte model.

4.2.2 Regional GLS regressionsmodel

Til modellering af den regionale variation benyttes en model baseret på generaliseret mindste kvadraters (*generalized least squares*, GLS) regression. Metoden adskiller sig fra almindelig mindste kvadraters regression ved eksplicit at tage hensyn til stikprøveusikkerheden og korrelationen mellem data fra forskellige målestationer.

Med reference til (4.5) kan den betragtede regionale model beskrives ved

$$\hat{\theta}_i = \beta_0 + \sum_{k=1}^p \beta_k A_{ik} + \delta_i + \varepsilon_i \quad , \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (4.6)$$

hvor $\beta_k, k=0, \dots, p$ er regressionsparametrene,
 A_{ik} er de betragtede forklarende variable (regressorer), og
 ε_i, δ_i og M har samme betydning som ovenfor.

Ønskes alene den regionale middelværdi bestemt kan (4.6) formuleres uden medtagelse af regressorer, dvs. kun β_0 medtages i regressionsligningen (i det følgende benævnt den regionale middelværdi-model). En regional middelværdi-model kan benyttes til en indledende vurdering af den regionale variation. Såfremt analysen viser, at den observerede variation af de estimerede værdier $\hat{\theta}_i$ alene kan forklares af stikprøveusikkerhed (usikkerhed relateret til ε_i) kan regionen antages at være homogen, og den regionale middelværdi giver da et estimat for θ i hele regionen. Såfremt den regionale middelværdi-model udviser en signifikant regional variation, må regionen antages at være heterogen, og (4.6) benyttes da efterfølgende til at undersøge, hvorvidt denne variation kan forklares ud fra klimatiske og fysiografiske forhold. Evt. kan regressionsmodellen anvendes separat for forskellige subregioner efter opdeling af den samlede region.

4.3 Estimation af T -års hændelser på baggrund af regionale regndata

På baggrund af GLS regressionsmodellen (4.6) kan θ estimeres på en vilkårlig lokalitet vha.

$$\hat{\theta}_{REG}(s) = \hat{\beta}_0 + \sum_{k=1}^p \hat{\beta}_k A_k(s) \quad (4.7)$$

hvor (s) angiver et givet *sted* i regionen,

$\hat{\beta}_k, k=0, \dots, p$ er de estimerede regressionsparametre, og

$A_k(s)$ angiver værdierne af de valgte forklarende parametre (regressorer) på det pågældende sted.

GLS-modellen giver udover et estimat (eller en *prediktion*) af θ på en vilkårlig lokalitet et estimat af den tilhørende *prediktionsusikkerhed*, der er et udtryk for den samlede usikkerhed forbundet med regional estimation vha. (4.7). Prediktionsusikkerheden kan opsplittes i to bidrag, hhv. (1) stikprøveusikkerhed og (2) regional modelusikkerhed. Stikprøveusikkerheden (korrigeret for korrelationen mellem stationerne) hidrører fra estimation af parametrene i PDS-modellen ved de M stationer (pga. den begrænsede observationsperiode) samt fra estimation af parametrene i regressionsligningen (pga. det begrænsede antal stationer). Den residuale modelusikkerhed giver et mål for den del af den regionale variation, der ikke er beskrevet ved regressionsmodellen.

Generelt gælder, at den residuale modelusikkerhed formindskes ved inkludering af ekstra regressorer i den regionale model, men til gengæld fås en forøgelse af stikprøveusikkerheden, idet flere parametre skal estimeres på baggrund af et uforandret datasæt. Samlet kan dette i nogen tilfælde føre til en forøgelse af prediktionsusikkerheden, og man skal derfor ikke ukritisk inkludere flere regressorer for at forbedre modellens tilpasning til den observerede regionale variation.

I princippet kan θ symbolisere en T -års hændelse, men det er i forbindelse med regionalisering hensigtsmæssigt at benytte (4.6-7) udelukkende til modellering hhv. estimation af de tre PDS-parametre. På dette grundlag fås et regionalt estimat af T -års hændelsen på en lokalitet s af

$$\hat{z}_{T,REG}(s) = z_0 + \hat{\mu}_{REG} \frac{1 + \hat{\kappa}_{REG}}{\hat{\kappa}_{REG}} \left[1 - \left(\frac{1}{\hat{\lambda}_{REG} T} \right)^{\hat{\kappa}_{REG}} \right] \quad (4.8)$$

hvor $\hat{\lambda}_{REG}$, $\hat{\mu}_{REG}$ og $\hat{\kappa}_{REG}$ er regionale estimater af PDS-parametrene jf. (4.7), og z_0 er fastlagt som et konstant afskæringsniveau i regionen. Afhængigheden af stedet (s) er udeladt for PDS-parametrene i (4.8) for overskuelighedens skyld. Den tilhørende prediktionsvarians af dette estimat fås af

$$Var\{\hat{z}_{T,REG}\} = B_1 Var\{\hat{\lambda}_{REG}\} + B_2 Var\{\hat{\mu}_{REG}\} + B_3 Var\{\hat{\kappa}_{REG}\} \quad (4.9)$$

hvor B_i er funktioner af de regionalt estimerede parametre, og

$Var\{\cdot\}$ er prediktionsvariansen på de regionalt estimerede PDS parametre.

Udtrykkene (4.8-9) svarer til udtrykkene til beregning af T -års hændelser på baggrund af lokale regndata (4.2-3). Forskellen er, at der i (4.8-9) benyttes samtlige regndata i en region ved estimationen, hvorved usikkerheden på T -års estimatet mindskes, samt at (4.8-9) kan benyttes til at estimere T -års hændelser på lokaliteter, hvor der ikke er data til rådighed.

Der henvises til den tekniske baggrundsrapport mht. detaljer vedr. estimation af GLS-regressionsmodellen samt beregning af prediktionsvarianser.

4.4 Fastsættelse af sikkerhedsniveau for dimensionsgivende regndata

4.4.1 Dimensioneringsgrundlag med og uden hensyntagen til regressorer

I en dimensioneringssituation kan det dimensionsgivende regninput fastsættes med eller uden medtagelse af regressorer som hhv.

$$\hat{\theta}_{DIM}(s) = \hat{\theta}_{REG}(s) + f \hat{\sigma}_{PRED}(s) \quad (4.10)$$

og

$$\hat{\theta}_{DIM} = \hat{\theta}_{MID} + f \hat{\sigma}_{PRED} \quad (4.11)$$

hvor $\hat{\theta}_{REG}(s)$ er et regionalt estimat af θ på det pågældende sted,

$\hat{\theta}_{MID}$ er et estimat af den regionale middelværdi af θ .

$\hat{\sigma}_{PRED}(s)$ er et regionalt estimat af prediktionsusikkerheden, mens $\hat{\sigma}_{PRED}$ er et estimat af prediktionsusikkerheden under antagelse af, at middelværdi-modellen gælder (standardafvigelse), og

f er en sikkerhedsfaktor svarende til et fastsat sikkerhedsniveau.

Hvis $\hat{\theta}_{REG}$ og $\hat{\theta}_{MID}$ forudsættes normalfordelt, er f en frekvensfaktor i den standardiserede normalfordeling, dvs. $f=1$ og $f=2$ svarer til hhv. et 84% og et 97,5% sikkerhedsniveau (de øvre grænser for hhv. 68% og 95% konfidensintervallerne). Et estimat på prediktionsvariansen kan fås på baggrund af den regionale model, under behørig hensyntagen til de forskellige typer af usikkerhedsbidrag.

4.4.2 Usikkerhedsbidrag i den regionale model

Den totale prediktionsvarians (kvadratet på σ_{PRED}) af de estimerede T -års hændelser baseret på middelværdi-modellen (lign 4.11) kan opdeles i tre bidrag

- (1) Den del (Var_e), der skyldes stikprøveusikkerhed, korrigeret for korrelation mellem stationer,
- (2) Den del (Var_δ), der skyldes residual modelusikkerhed, og
- (3) Den del (Var_β), der ville kunne forklares, såfremt den fulde regressionsmodel (lign. 4.10) tages i brug.

Afhængigt af de forskellige variationsbidrags størrelse i forhold til hinanden, vil det være naturligt at vurdere, om regionen må opfattes som heterogen eller homogen, og om lign. (4.10) eller (4.11) skal benyttes ved fastsættelse af dimensioneringsgrundlag. I en konkret beregningssituation benyttes derfor en beslutningsgang som anført i Tabel 2.

Det bemærkes, at prediktionsvariansen vil være størst ved anvendelse af den regionale middelværdi-model (lign. 4.11), da der hér tages højde for den signifikante regionale variation, der ikke kan forklares. For en nærmere analyse

af disse forhold henvises til (Mikkelsen et al., 1997; Rosbjerg & Madsen, 1996).

Samtlige tre situationer beskrevet ovenfor kan håndteres af den regionale GLS-regressionsmodel (lign. 4.7) i kombination med lign (4.8-9).

Tabel 2. Princip for vurdering af, om en region er homogen eller heterogen.

1. Hvis stikprøveusikkerheden (Var_e) er stor i forhold til de andre variationsbidrag, kan regionen antages homogen, og der kan ikke lægges speciel vægt på lokale målinger. Det vil være rimeligt at benytte det samme dimensioneringsniveau i hele regionen (lign. 4.11).
2. Hvis den totale regionale variation ($Var_\beta + Var_\delta$) er dominerende i forhold til stikprøveusikkerheden (Var_e), er regionen heterogen, og der eksisterer to muligheder:
 - a. Hvis den residuale modelusikkerhed (Var_δ) er stor, er modellen af tvivlsom værdi, og det samme dimensioneringsniveau bør anvendes i hele regionen (lign. 4.11).
 - b. Hvis den residuale modelusikkerhed (Var_δ) er lille, bør der lægges vægt på den regionale model (lign. 4.10).

4.4.3 Fastsættelse af sikkerhedsniveau

Udover de usikkerheder, der indgår ved beregning af prediktionsvariansen ud fra den regionale model, er der mange andre betydende usikkerheder i forbindelse med afløbstekniske beregninger. Som eksempel kan nævnes usikkerheden forbundet med at ekstrapolere regndata målt i ét punkt til hele oplandets areal, jf. afsnit 3.2, men der er også usikkerheder relateret til de anvendte beregningsmetoder og beskrivelsen af oplandet. Betydningen af nogle væsentlige typer af usikkerheder for de mest almindelige afløbstekniske beregninger er vurderet i (Arnbjerg-Nielsen & Harremoës, 1996b).

Et ofte overset bidrag til usikkerheden er relateret til udviklingen i reduceret areal for et opland over en længere årrække. En stigning i befæstelsesgraden eller i det tilsluttede areal vil i mange tilfælde overskygge de hér berørte usikkerheder. Desuden kan det nævnes, at DMI har dokumenteret forandringer i det generelle nedbørsmønster i Danmark i løbet af sidste halvdel af det tyvende århundrede, formentlig pga. klimaforandringer eller ændringer i bevoksnings-

typen i store dele af landet (Frich et al., 1997), men regnserierne fra Spildevandskomitéens Regnmålersystem er ikke lange nok til at undersøge dette aspekt. Begge disse typer usikkerheder stiller spørgsmål ved den fundamentale antagelse om, at regndata og andre typer inddata til beregninger er *stationære*, men dette aspekt er ikke undersøgt nærmere.

Set i sammenhæng med andre betydende usikkerheder kan sikkerhedsniveauet ved regional estimation af regndata og valg af historiske regnserier fortolkes på samme måde som partialkoefficienter indenfor andre typer af ingeniørmæssige beregninger. Som grundlag for at fastsætte sikkerhedsniveauer er en dybere analyse af samtlige de betydende usikkerheder derfor nødvendig.

Der skal ikke her gives en generel anbefaling af sikkerhedsniveau i afløbstekniske beregninger, men for at standardisere fremstillingen er det fortrinsvis valgt at benytte 68% og 95% konfidensintervaller i afbildninger og tabeller, svarende til middelværdien $\pm$ én hhv. to gange standardafvigelsen. De øvre grænser i konfidensintervallerne svarer hér til et sikkerhedsniveauet på 84% hhv. 97,5%.

5 Standardiseret regional databearbejdning

Den standardiserede databearbejdning er beskrevet nøje i den tekniske baggrundsrapport (Madsen, 1998) og nedenfor refereres kun hovedpunkterne.

5.1 Udvælgelse af stationer og test for stationaritet

De i nærværende bearbejdning benyttede data blev udtrukket fra DMI's database d. 1. januar 1997, og de længste regnserier består således af 18 års observationer. Det blev indledningsvis vurderet, at stikprøveusikkerheden for stationer med mindre end 10 års målinger ville være så stor, at de ikke ville forbedre den regionale analyse. I den regionale analyse er derfor kun medtaget de stationer, der har mere end 10 års observationer (korrigeret observationsperiode). Det drejer sig om i alt 41 stationer, jf. bilag B, og disse stationer udgør ca. 650 stationsår ud af det samlede datamateriale på i alt 850 stationsår.

Udover den bearbejdning, der redegøres for i det følgende, er der gennemført forskellige test for stationaritet. Der blev ikke identificeret systematiske trend i data, men det kan ikke udelukkes, at ikke-stationariteter vil afsløres, efterhånden som observationsperioden forøges og stikprøveusikkerheden begrænses.

5.2 Analyserede nedbørsvariable

Som nævnt i afsnit 3.3 kan de karakteristiske nedbørsvariable af afløbsteknisk relevans opdeles i maksimale middelintensiteter, volumenbaserede variable og transformerede variable. I Tabel 3 er vist en oversigt over samtlige 14 nedbørsvariable, der er medtaget i den standardiserede databearbejdning. Ved udvælgelsen er der lagt vægt på bredt at dække spektret af relevante variable i forhold til afløbsteknik, og der er medtaget tilstrækkeligt med variable til, at der kan sammenlignes med de tidligere datagrundlag i Spildevandskomitéens skrifter. Samtidig er det forsøgt at begrænse antallet af nedbørsvariable, idet antallet af variable er bestemmende for beregningsarbejdet.

Et stort spektrum af varigheder er medtaget for maksimale middelintensiteter for at kunne beregne nye, regionale regnkurver og sammenligne med de gamle landsregnkurver (SVK, 1974). Regndybde pr. hændelse er primært medtaget for at kunne sammenligne med de første analyser af geografisk variation, mens døgnnedbøren er medtaget for at kunne sammenligne med døgnnedbøren for

DMI's net af manuelle døgnmålere. De transformerede variable er medtaget, fordi de - specielt for små afløbstal - afspejler særligt udtalte volumenegenskaber ved regnhændelser, og for at kunne sammenligne med de ofte anvendte diagrammer og tabeller, der er udarbejdet for Odense-regnserien (SVK, 1984a,b). Der er dog kun medtaget transformerede variable for to yderpunkter af relevante afløbstal. Nedenfor redegøres mere uddybende for, hvordan de tre typer af nedbørsvariable er beregnet.

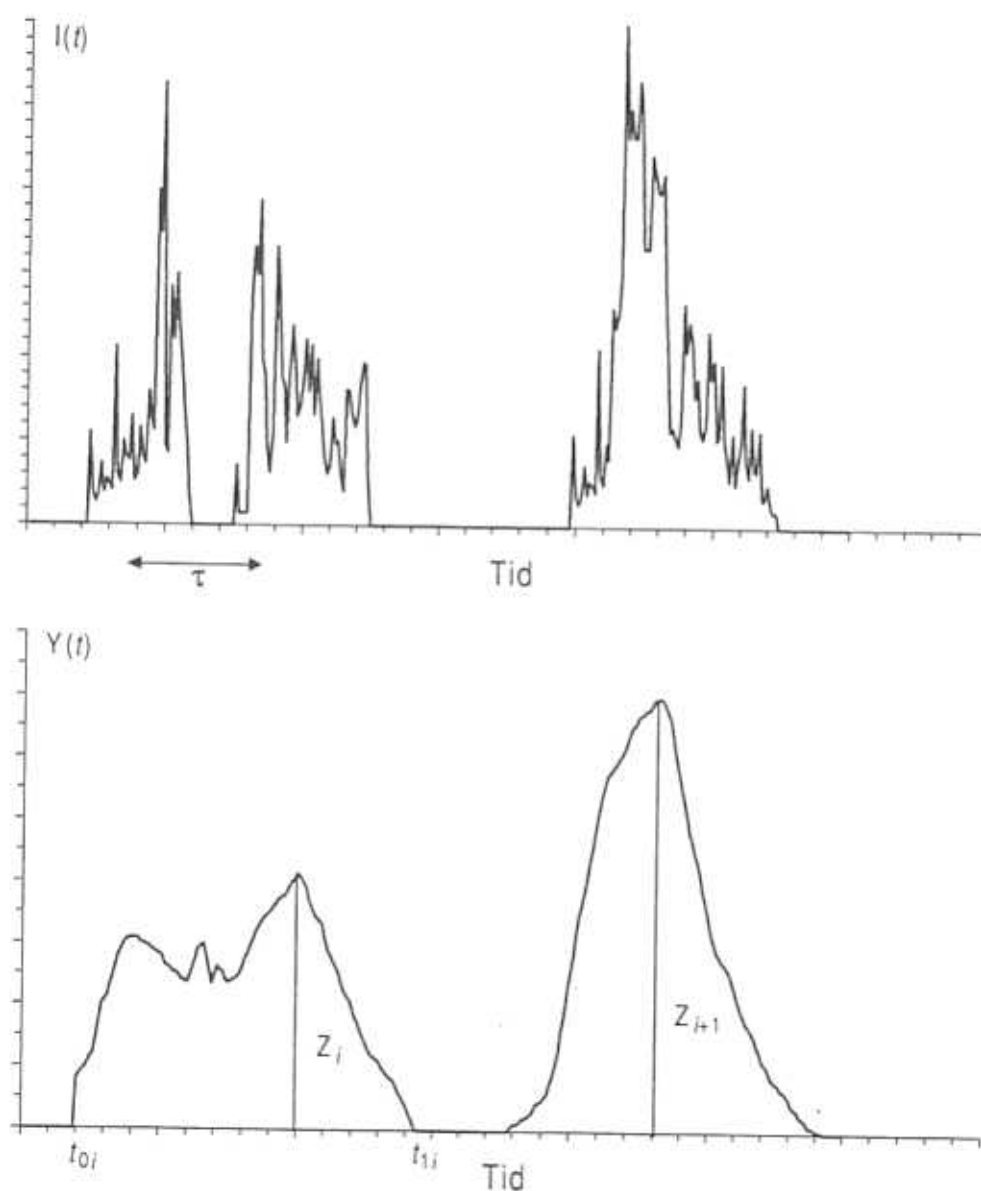
Tabel 3. Oversigt over de 14 nedbørsvariable, der er medtaget i den standardiserede databearbejdning.

Nedbørsvariabel	Type og parameterværdier
Maksimale middelintensiteter	Varighederne $\tau=10, 30$ og 60 minutter samt $\tau=3, 6, 12, 24$ og 48 timer
Volumenbaserede variable	Regndybde pr. hændelse og døgnnedbør
Transformerede variable	Overløbsvolumener og nødvendige bassinvolumener for afløbstal $a=0,1$ og $1,0 \mu\text{m/s}$

5.2.1 Maksimale middelintensiteter

Bestemmelse af den maksimale middelintensitet for individuelle nedbørshændelser er skitseret i Figur 8. For en given varighed, τ , bestemmes middelintensiteten $Y(t)$ ved glidende gennemsnitsdannelse af den observerede tidsserie af 1 minuts intensiteter. En nedbørshændelse relateret til varigheden τ defineres som en ubrudt sekvens af positive $Y(t)$, og den maksimale middelintensitet indenfor nedbørshændelsen kan da bestemmes. De maksimale middelintensiteter angives i enheden $\mu\text{m/s}$.

Med den herved benyttede definition regnes to regnhændelser for uafhængige såfremt tiden mellem de to hændelser er større end τ , dvs. uafhængighedsbegrebet afhænger af den betragtede varighed. Eftersom KMD formatet opererer med nedbørshændelser adskilt af tørvejr af minimum en times varighed kan ovenstående definition ikke benyttes for varigheder under 60 minutter. For $\tau < 60$ minutter benyttes derfor en tørvejrperiode på 60 minutter til sikring af uafhængige hændelser.



Figur 8. Definition af maksimal middelintensitet for individuelle regnhændelser. $I(t)$ er den observerede tidsserie af 1 minuts intensiteter, $Y(t)$ er middelintensiteten svarende til varigheden τ , mens t_{0i} og t_{1i} angiver hhv. start- og sluttidspunkt for den definerede nedbørshændelse og Z_i er den maksimale middelintensitet for hændelsen.

5.2.2 Volumenbaserede variable

To forskellige volumenvariable betragtes, den totale nedbørsmængde for individuelle regnhændelser (herefter benævnt regndybden) og den totale nedbørsmængde indenfor ét døgn (døgnnedbøren). Begge volumenvariable angives i enheden mm.

Regndybden beregnes ved integration af 1 minuts intensiteten for den enkelte regnhændelse, defineret ved KMD formatet. Døggnedbøren beregnes ved integration over et fast 24 timers interval fra kl. 0600 UTC. For dansk sommertid svarer dette til aflæsningstidspunktet for de manuelle Hellmann målere i DMI's landsdækkende net af regnmålere til registrering af døggnedbør.

5.2.3 Transformeret variable

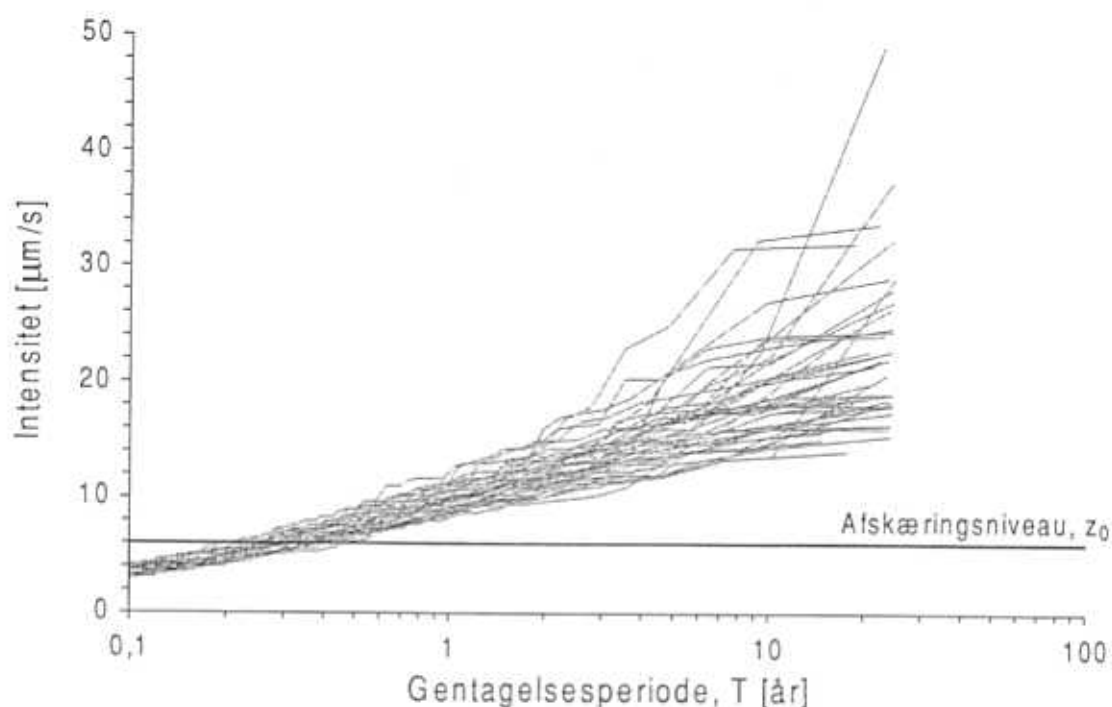
To forskellige typer af transformeret variable betragtes, nødvendige volumener for tilbageholdelse af regn i bassin (bassinvolumener) og volumener af overløb fra bygværker (overløbsvolumener). De transformeret variable angives i enheden mm.

Ved beregning af bassinvolumener betragtes tidsserien af 1 minuts intensiteter som indløb til et fiktivt bassin med uendelig kapacitet. Afløbet fra bassinet er fastlagt ved afløbstallet a (angivet i $\mu\text{m/s}$). Det nødvendige volumen $Y(t)$ til et givet tidspunkt t bestemmes ved en kontinuitetsbetragtning som summen af bassinvolumen til tiden $t-1$ og indløbet $I(t)$ fratrullet afløbet a . En hændelse er i denne sammenhæng defineret som en ubrudt sekvens af positive $Y(t)$ (tilsvarende definitionen af uafhængige regnhændelser, jf. Figur 8), og det nødvendige bassinvolumen for den herved definerede hændelse kan da bestemmes. Beregningsproceduren svarer til den procedure, der blev anvendt i Spildevandskomitéens skrift nr. 18 (SVK, 1984a), og der tages således hensyn til koblede hændelser, hvor bassinet ikke er tømt, før en ny regn begynder.

Overløbsvolumener bestemmes under forudsætning af, at intet bassinvolumen er til stede. I dette tilfælde beregnes overløbsvolumenet ved integration af positive værdier af 1 minuts intensiteten fratrullet afløbet a for den enkelte nedbørshændelse, defineret ved KMD formatet.

5.3 Valg af ekstremværdimodel

Til analyse af ekstremværdier benyttes PDS-modellen introduceret i afsnit 4.1. Som eksempel er de empiriske fordelinger af 10 min. intensiteten for de 41 analyserede stationer vist i Figur 9. Til definition af overskridelsesserierne benyttes det samme afskæringsniveau ved alle 41 stationer, og overskridelsernes størrelse beskrives ved en generaliseret Pareto fordeling, jf. afsnit 4.1. De benyttede afskæringsniveauer for de forskellige nedbørsvariable fremgår af Tabel 4. Her er ligeledes angivet det gennemsnitlige antal årlige overskridelser ved de 41 stationer, der inkluderes i ekstremværdianalysen.



Figur 9. Empiriske fordelinger af 10 min. intensiteten for de 41 stationer med observationsperiode på mere end 10 år.

Tabel 4. Symbolliste for de 14 analyserede nedbørsvariable sammen med afskæringsniveauet og den regionale middelværdi af det årlige antal overskridelser i de definerede PDS-serier.

Nedbørsvariabel	Symbol	Enhed	Afskæringsniveau	Overskridelser pr. år
10 min. intensitet	<i>i10m</i>	[μm/s]	6,00	3,22
30 min. intensitet	<i>i30m</i>		3,20	3,11
60 min. intensitet	<i>i60m</i>		2,10	3,13
3 timers intensitet	<i>i3h</i>		1,10	3,02
6 timers intensitet	<i>i6h</i>		0,730	2,83
12 timers intensitet	<i>i12h</i>		0,450	2,53
24 timers intensitet	<i>i24h</i>		0,260	2,65
48 timers intensitet	<i>i48h</i>	[μm/s]	0,150	3,04
Regndybde (dybde pr. hændelse)	<i>dph</i>	[mm]	17,2	3,09
Døgnnedbør (dybde pr. døgn)	<i>dpd</i>		19,4	2,95
Bassinvolumen, $a=0,1 \mu\text{m/s}$	<i>bv1</i>		17,0	2,82
Bassinvolumen, $a=1,0 \mu\text{m/s}$	<i>bv2</i>		5,40	2,85
Overløbsvolumen, $a=0,1 \mu\text{m/s}$	<i>ov1</i>		15,0	2,95
Overløbsvolumen, $a=1,0 \mu\text{m/s}$	<i>ov2</i>	[mm]	6,80	2,89

Parameterværdierne for hver enkelt regnserie og de tilhørende usikkerheder er beregnet vha. L -momenter som anført i (Madsen, 1998), men de er ikke gengivet her. Som led i L -moment analysen blev det godtgjort, at PDS-modellen med GP-fordelte overskridelser, se afsnit 4.1, kan benyttes til beskrivelse af overskridelserne for hele spektret af analyserede nedbørsvariable nævnt i Tabel 3 og Tabel 4.

5.4 Regional analyse af PDS-parametre

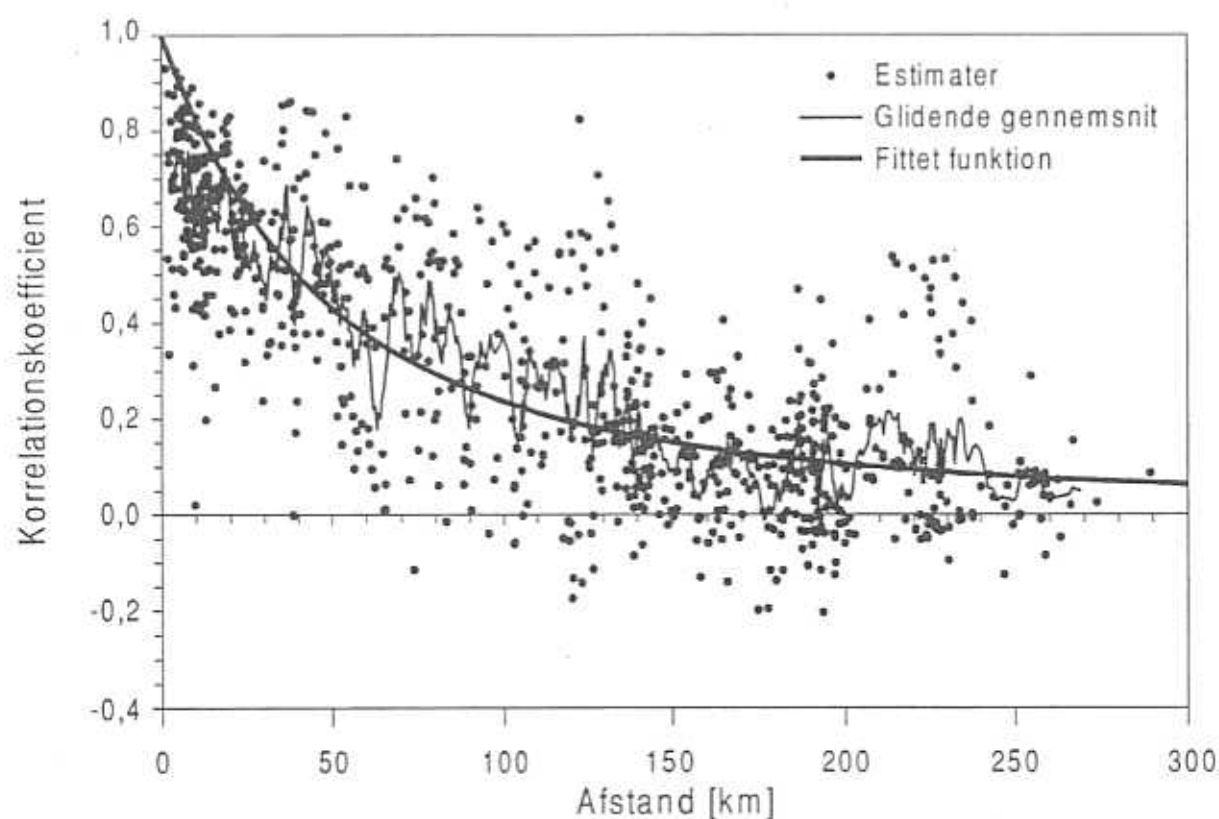
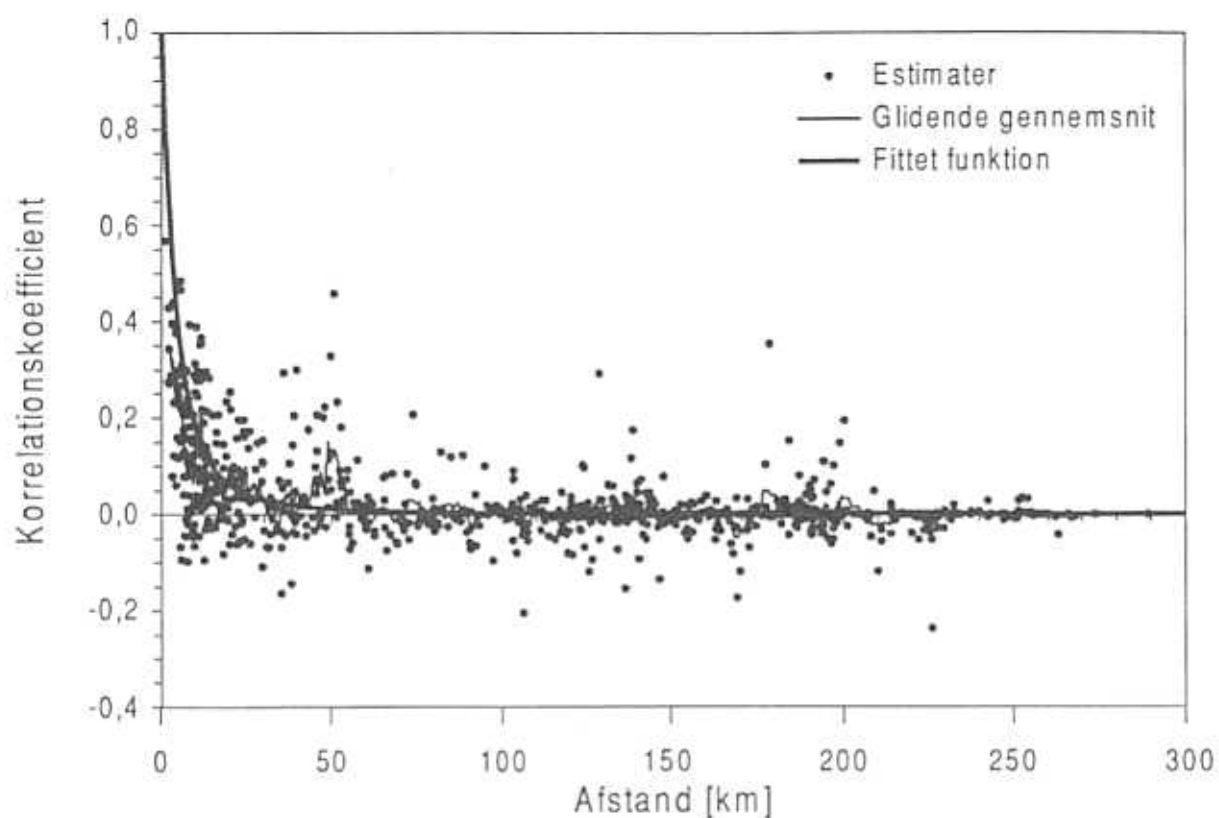
5.4.1 Generelle principper

Den umiddelbare regionale variation af ekstremværdiserne er anskueliggjort i Figur 9. Variationen af de empiriske fordelinger kan opdeles i flere bidrag hidrørende fra forskellige statistiske karakteristika af ekstremværdiserne. For eksempel er spredningen af serierne ved afskæring parallelt med den vandrette akse et udtryk for variationen af det gennemsnitlige antal årlige overskridelser. Dette kan ses af (4.1), idet gentagelsesperioden for overskridelser over afskæringsniveauet z_0 er $T=1/\lambda$. Andre typer variation i Figur 9 hidrører fra forskelle i overskridelserne mellem stationerne. Forskel på hældningen af kurverne kan eksempelvis forklares af forskel i middelloverskridelsen, mens forskelle i formen af kurverne kan forklares af forskelle i formparameteren.

Formålet med den statistiske analyse er at redegøre for eventuelle regionale forskelle i ekstremværdikarakteristika. Dette gøres ved at betragte de enkelte parametre i PDS modellen: middel antal årlige overskridelser (λ), middelloverskridelsen (μ) og formparameteren (κ). Der redegøres for, hvorvidt variationen af parametrene er statistisk signifikant eller kan forklares alene af de statistiske usikkerheder. Såfremt variationen er signifikant er det næste skridt i analysen at prøve at forklare denne variation ud fra relevante klimatiske og fysiografiske parametre.

5.4.2 Indbyrdes korrelation mellem stationer

Ved estimation af regressionsligningen (lign. 4.6) er det vigtigt at tage hensyn til den indbyrdes korrelation mellem stationerne. Betragtes korrelationen mellem overskridelsernes størrelse ses en tydelig afstandsafhængighed, hvor korrelationen mellem stationer, der har en stor indbyrdes afstand, er mindre end korrelationen mellem tætliggende stationer, se Figur 10. Der ses også en tydelig sammenhæng mellem korrelationen og varigheden af den betragtede intensitet, med større spatial korrelation for voksende varighed.



Figur 10. Spatial korrelationsstruktur for 10 min. intensiteten (øverst) og 24 timers intensiteten (nederst). Hver observation svarer til en regnhændelse.

Dette kan forklares med, at ekstreme intensiteter for store varigheder primært er relateret til vandrende frontsystemer med stor udbredelse (og deraf stor spatial korrelation), mens ekstreme intensiteter for små varigheder primært er relateret til konvektive regnceller med begrænset spatial udbredelse. Bassin- og overløbsvolumen for små afløbstal har også en stor korrelation, hvilket hænger sammen med, at det primært er de nedbørsrige regn, der i dette tilfælde giver anledning til ekstreme voluminer. Modsat for bassin- og overløbsvolumen for store afløbstal er der en mindre spatial korrelation, idet det her er de mere højintense regn, der giver ekstreme voluminer. Ekstreme regndybder pr. hændelse og døgnnedbør er også karakteriseret ved stor spatial korrelation. I regressionsmodellen er der benyttet en eksponentialfunktion til beskrivelse af den spatiale korrelationsstruktur.

I modsætning til korrelationen mellem overskridelsernes størrelse, er der ingen umiddelbar spatial struktur i korrelationen mellem antal årlige overskridelser. I dette tilfælde er en konstant funktion tilpasset med niveau lig den gennemsnitlige korrelationskoefficient.

5.4.3 Forklarende variable

En række klimatiske og fysiografiske parametre er benyttet som regressorer i regressionsmodellen, se Tabel 5. Generelt er alle de parametre medtaget, som var tilgængelige i DMI's databaser ved projektets gennemførelse. Årsmiddelnedbøren for normalnedbørsperioden 1961-90 aflæst på et kort som vist på Figur 5 kan ses som en generel klimatisk parameter, der udtrykker regional variation på en forholdsvis stor skala. Kortet giver et udglattet billede baseret på målinger fra DMI's net af Hellmann nedbørsmålere. Aflæsninger på kortet afspejler derfor ikke nødvendigvis alle variationer, der har betydning for mindre urbane oplande i Danmark. Det forventes umiddelbart, at de fysiografiske parametre udtrykker variation på en noget mindre skala, da parametrene relaterer sig direkte til placeringen af målerne i Spildevandskomitéens Regnmålersystem.

Målerens næromgivelser i form af læindeks og terrænhældning er medtaget i regressionsanalysen, idet disse parametre afspejler lokal "støj" ved måleren, der kan medføre en generel tendens til, at der registreres for lidt eller for meget nedbør. En eventuel signifikant korrelation mellem PDS-parametre og læindeks og/eller terrænhældning vil ikke kunne udnyttes i modellen til prediktion på lokaliteter uden målere, men korrelationen giver et mål for den residuale usikkerhed grundet målestøj.

Tabel 5. Regressorer benyttet i GLS-regresionsmodellen.

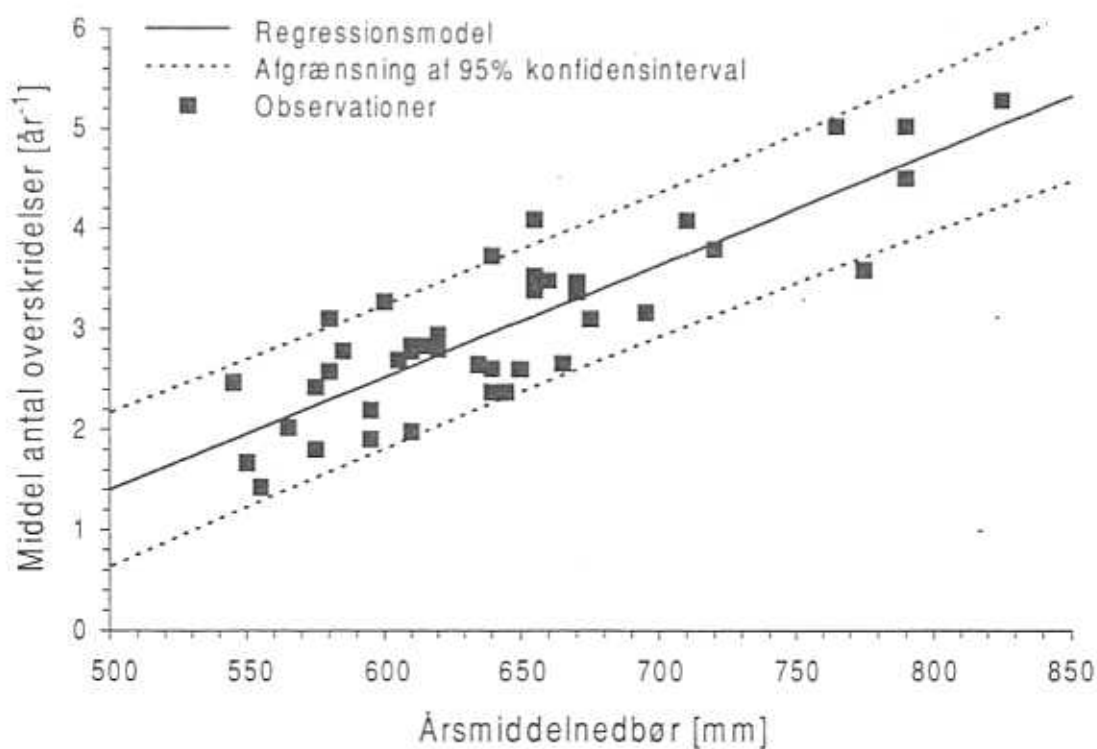
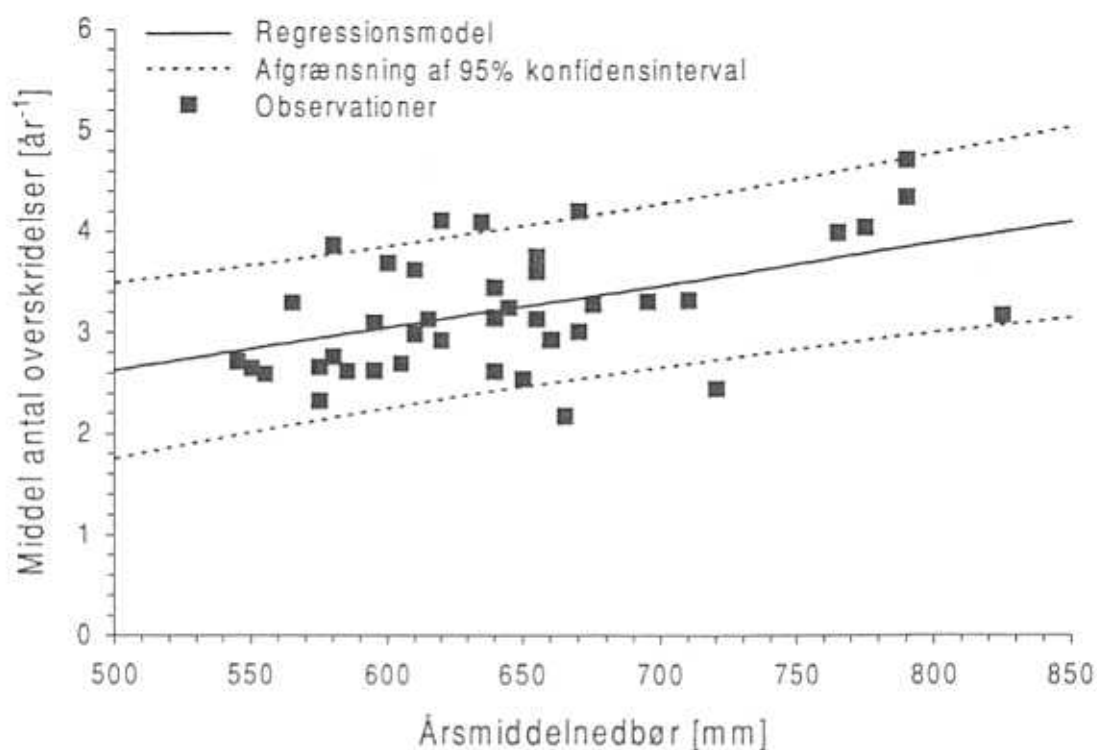
Klimatiske karakteristika:
- Årsmiddelnedbør for normalnedbørsperioden 1961-90, jf. kortet på Figur 5.
Fysiografiske karakteristika:
- Målerens højde over havet
- Målerens geografiske placering (længdegrad, breddegrad)
- Nærmeste afstand til havet, evt. en stor sø
- Nærmeste afstand til havet, evt. en stor sø, i retningerne S, SV og V
Målerens næromgivelser:
- Læindeks, beregnet som middelværdien af højdevinklen målt i 8 retninger kompasrosen rundt. I situationer med flere målinger af højdevinklen gældende for forskellige perioder tages gennemsnittet af disse
- Terrænhældning, beregnet som gennemsnittet imod retningerne S, SV og V. Terrænhældningen er målt i en afstand af 2,5 km fra måleren. I tilfælde af et højdepunkt, der "skygger", måles terrænhældningen mellem måleren og det pågældende højdepunkt

5.5 Regional modellering af PDS-parametre

Den ovenfor beskrevne regionale analyse blev gennemført for PDS-parametrene for samtlige 14 analyserede nedbørsvariable. Overordnet viste det sig, at årsmiddelnedbøren er i stand til at forklare den regionale variation for en del parametre og nedbørsvariable, mens ingen af de andre potentielle regressorer kunne forbedre den regionale model. Det blev desuden konkluderet, at hele landet kan betragtes som én homogen region for nogle parametre og nedbørsvariable, mens det for andre er nødvendigt at opdele i subregioner. Nedenfor gennemgås kortfattet de opnåede resultater mht. modellering af PDS-parametrenes regionale variation, herunder opdeling i subregioner.

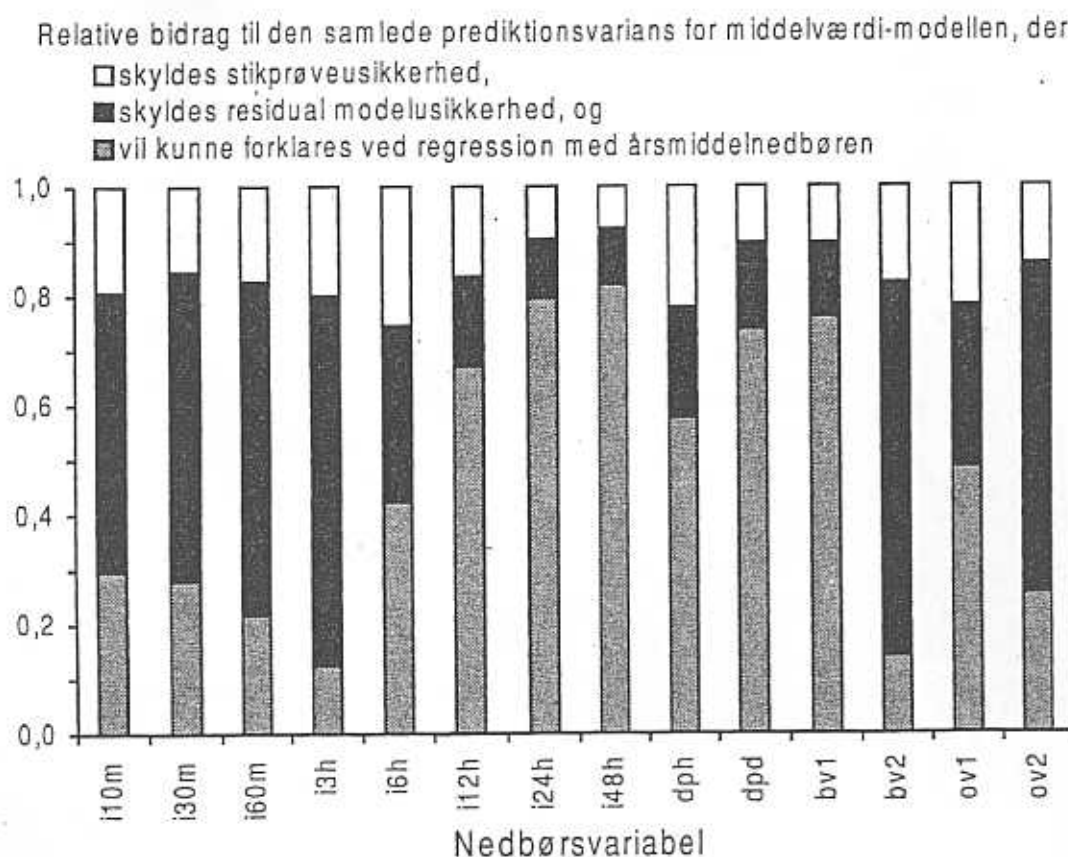
5.5.1 Middel antal overskridelser (λ)

Det gennemsnitlige antal årlige overskridelser udviser en signifikant regional variation for samtlige analyserede nedbørsvariable. En betydelig del af denne variation kan beskrives af årsmiddelnedbøren. Som eksempel er regressionsmodellen med tilhørende 95% konfidensinterval for 10 min. og 48 timers intensiteten vist i Figur 11.



Figur 11. Regressionsmodel for middel antal årlige overskridelser som funktion af årsmiddelnedbøren for henholdsvis 10 min. intensiteten (øverst) og 48 timers intensiteten (nederst) med tilhørende 95% konfidensinterval. Hver observation svarer til en målestation (en RIMCO-måler).

Regressionsmodellerne angiver, at middel antal årlige overskridelser er en voksende funktion af årsmiddelnedbøren, dvs. for steder med stor årsmiddelnedbør registreres flere ekstreme regnhændelser. Årsmiddelnedbøren giver den største forklaringsgrad for intensiteter med stor varighed og bassin- og overløbsvolumen for små afløbstal, mens forklaringsgraden er betydelig mindre for intensiteter med små varigheder og bassin- og overløbsvolumen for store afløbstal. For regndybde og døgnnedbør er der også en forholdsvis stor forklaringsgrad. Forklaringsgraden af regressionsmodellen og det relative bidrag fra stikprøveusikkerhed og residual modelusikkerhed til den totale prediktionsvarians (se diskussionen i afsnit 4.4.2) er illustreret for samtlige 14 analyserede nedbørsvariable i Figur 12.



Figur 12. Relative bidrag til prediktionsvariansen for den regionale middelværdi-model (lign. 4.11) for middel antal overskridelser. Opdelingen følger princippet forklaret i afsnit 4.4.2.

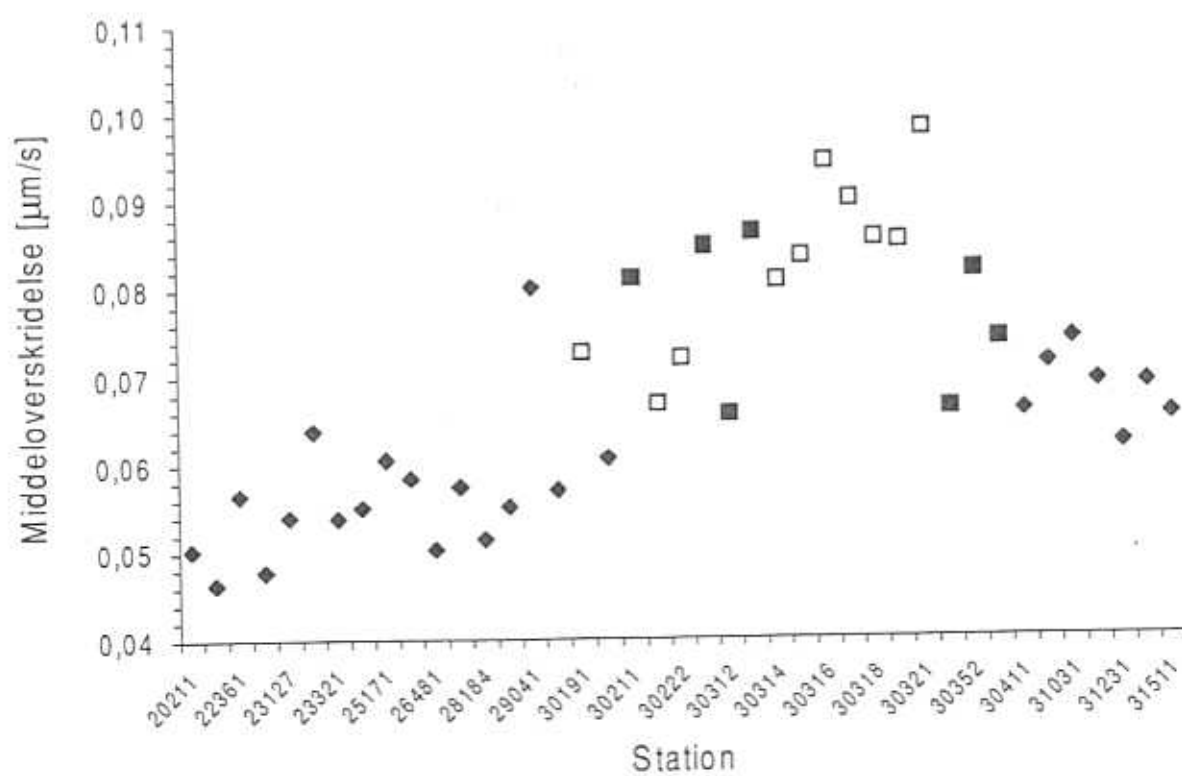
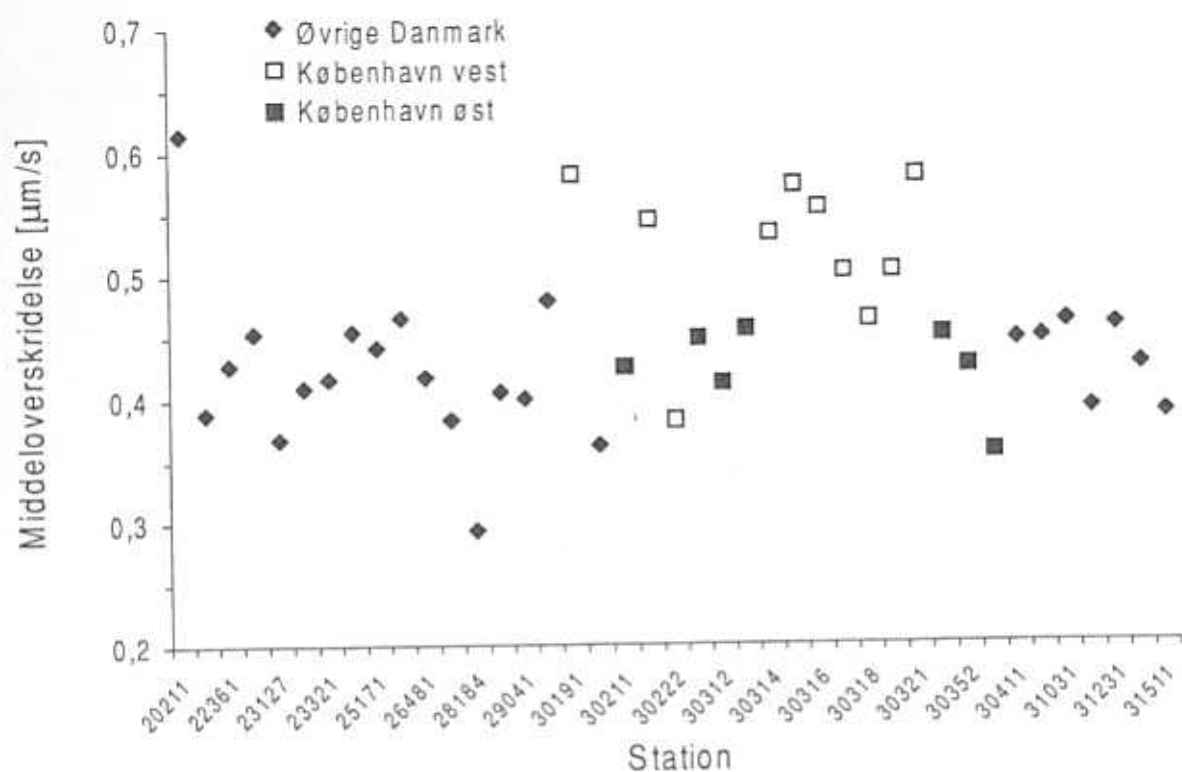
5.5.2 Middeloverskridelse (μ)

For middeloverskridelsen er der ingen signifikant regional variation for intensiteter med små varigheder (mindre end eller lig 1 time) og bassin- og overløbsvolumen for store afløbstal, dvs. middeloverskridelsen kan antages konstant i hele landet (homogen region) i disse tilfælde. For intensiteter med store varigheder (større end 1 time), bassin- og overløbsvolumen for små afløbstal, regndybde og døgnnedbør er der derimod en signifikant regional variation.

Ingen af de betragtede klimatiske og fysiografiske regressorer er i stand til på tilfredsstillende vis at beskrive den regionale variation. For tre variable (3, 6 og 12 timers intensiteten) kan der imidlertid ses en vis korrelation med læindekset. Middeloverskridelsen er i disse tilfælde en voksende funktion af læindekset, dvs. der er en tendens til at målere med bedre læforhold generelt registrerer større ekstremnedbør. Effekten af målerens næromgivelser kan tolkes som udtryk for en underliggende residual variation, der skal medtages i det resulterende usikkerhedsmål, og læindekset er derfor ikke medtaget som regressor i den endelige regressionsmodel.

For nedbørsvariable med en signifikant regional variation ligger middeloverskridelsen generelt højere i Københavnsområdet end i resten af landet. Årsagen for denne "Københavnseffekt" er formentlig storby-fænomener som luftforurening og generel opvarmning. En del af de mest ekstreme nedbørshændelser i Københavnsområdet er opstået i forbindelse med passage af forholdsvis sjældne varmfronter fra sydvest, hvor skysystemerne har tendens til at "blive hængende" over København. Det synes derfor rimeligt at formulere en regional model, der opdeler Danmark i to subregioner, henholdsvis Københavnsområdet, hvor ekstremnedbør er stærkt påvirket af storby effekter, og resten af landet.

Middeloverskridelsen for samtlige 41 stationer for 3 og 48 timers intensiteten er vist i Figur 13. De 17 stationer i Københavnsområdet, jf. Tabel 6, er fremhævet i figuren. For de mindre varigheder (3, 6 og 12 timer) kan de 17 stationer opdeles i 2 grupper, bestående af henholdsvis 7 stationer beliggende længst mod øst (kystnære stationer), der har et niveau svarende til resten af landet, og de resterende 10 stationer, der generelt har et signifikant højere niveau. For intensiteter med store varigheder (24 og 48 timer), bassin- og overløbsvolumen for små afløbstal, regndybden og døgnnedbøren er der derimod ingen generel niveauforskel mellem de 7 østligste og de resterende 10 stationer.



Figur 13. Middeloverskridelsen for 3 timers intensiteten (øverst) og 48 timers intensiteten (nederst).

Tabel 6. SVK stationer i Københavnsområdet opdelt i stationer beliggende længst mod øst (kystnære stationer) og øvrige stationer.

Subregion	Stationer i subregion
København øst	30211, 30311, 30312, 30313, 30351, 30352, 30353
København vest	30191, 30221, 30222, 30314, 30315, 30316, 30317, 30318, 30319, 30321

En regional modellering af middelloverskridelsen baseres derfor på følgende subregionale opdeling:

- *Danmark udenfor København*, bestående af stationer udenfor Københavnsområdet
- *København øst*, bestående af stationer i Københavnsområdet beliggende længst mod øst (kystnære stationer)
- *København vest*, bestående af øvrige stationer i Københavnsområdet

For 3, 6 og 12 timers intensiteten udgør "Det øvrige Danmark" og "København øst" en samlet region, se Figur 13 (øverst). For de øvrige nedbørsvariable udgør "København øst" og "København vest" en samlet region, se Figur 13 (nederst). For stationer udenfor Københavnsområdet kan det antages, at middelloverskridelsen er homogen. For Københavnsområdet er der derimod en signifikant variation mellem stationerne. Da stationerne ydermere er stærkt korrelerede, er der en stor usikkerhed, og den resulterende prediktionsvarians er derfor betydelig større end i resten af landet. Middelloverskridelsen for de københavnske stationer ses at være signifikant højere end i resten af landet.

5.5.3 Formparameter (κ)

Med hensyn til formparameteren kan der antages homogenitet for intensiteter mindre end eller lig 24 timer, regndybden og overløbsvolumen for små afløbstal. For de øvrige variable udviser formparameteren en signifikant regional variation. For ingen af disse variable er de betragtede klimatiske og fysiografiske karakteristika i stand til at beskrive den regionale variation. For to variable (bassin- og overløbsvolumen for store afløbstal) er der en signifikant korrelation med læindekset. Som nævnt ovenfor er korrelationen med læindekset en

underliggende residual fejl (målestøj), som bidrager til en forøget prediktionsusikkerhed.

Sammenlagt må det konkluderes, at det ikke er muligt at forklare den regionale variation af formparameteren for de nedbørsvariable, der udviser heterogenitet, og for samtlige betragtede variable baseres estimationen derfor på den regionale middelværdi-model, dvs. formparameteren antages konstant i hele landet for en given nedbørsvariabel.

6 Udvalgelse af repræsentative historiske regnserier

Som omtalt i kapitel 3 er der generelt behov for at vurdere, hvor godt de forskellige *lokale* historiske regnserier svarer til den regionale model, samt for at vurdere, hvorledes *repræsentative* historiske regnserier kan udvælges i situationer, hvor der ikke er regndata tilstede, eller hvor observationsperioden for lokale data er kort.

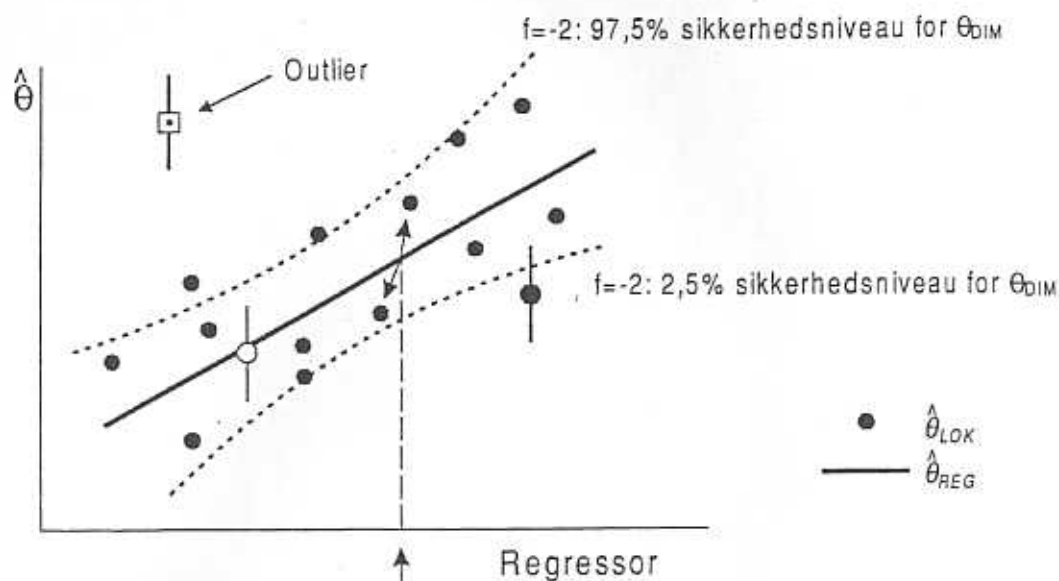
6.1 Teoretisk princip

På Figur 14 er for en fiktiv model med én regressor vist, hvordan estimer af θ for de forskellige stationer fordeler sig omkring regressionslinien. $\hat{\theta}$ kan i denne sammenhæng være et T -års estimat eller en parameter i en ekstremværdi-model. De optegnede konfidensgrænser illustrerer betydningen af prediktions-usikkerheden for dimensionsgivende regn-input, jf. afsnit 4.4 (lign. 4.10). Afgrænsningen af konfidensintervallet for θ_{DIM} fås f.eks. ved at optegne

$$\hat{\theta}_{DIM}(s) = \hat{\theta}_{REG}(s) + f \hat{\sigma}_{PRED}(s) \quad (6.1)$$

hvor $\hat{\theta}_{REG}(s)$ er et regionalt estimat af θ på lokaliteten s , $\hat{\sigma}_{REG}(s)$ er den regionale models prediktions-standardafvigelse, og f er sikkerhedsfaktoren (frekvensfaktoren) svarende til et ønsket sikkerhedsniveau (konfidensniveau). På figuren er benyttet $f=\pm 2$ svarende til 95% konfidensintervallet (afgrænset af 2,5% og 97,5% sikkerhedsniveauerne).

Figuren kan bruges til at vurdere, hvordan de enkelte historiske regnserier forholder sig til den regionale model. En station, der klart ligger indenfor de optegnede konfidensbånd (—○—) og en station, der ligger netop udenfor (—●—) er markeret på figuren. I det første tilfælde vil det være nærliggende at anvende den historiske regnserie som input til modelsimuleringer, hvis stationen ligger *indenfor* eller *tæt ved* det betragtede opland (en lokal regnserie). I det andet tilfælde vil nærmere undersøgelser være påkrævet for at afgøre, om den målte regnserie er repræsentativ. Er der f.eks. systematiske målefejl? Hvis den ikke er repræsentativ, står man i samme situation som i tilfælde, hvor ingen lokal regnserie er til rådighed, med mindre modellen er kalibreret vha. data fra netop denne regnmåler.



Figur 14. Vurdering af historiske regnserier i forhold til en regional model. Det optegnede konfidensinterval for θ_{DIM} svarer til $f=2$ i (6.1).

En outlier-station er tydeligt markeret på figuren ($\square$). En sådan station bør som udgangspunkt lades ude af betragtning som input til modelsimuleringer, og den bør underkastes en nøjere undersøgelse, hvis den alligevel ønskes benyttet.

I den situation, hvor ingen lokal regnserie er til rådighed, eller observationsperioden er for kort i forhold til problemstillingen, der ønsket analyseret, står man i en valgsituation. Det mest naturlige vil være at vælge en regnserie fra en lokalitet, der har omtrent samme fysiografiske og klimatiske parametre som det aktuelle kloakopland. Dette er illustreret på Figur 14 med en pil på den vandrette akse. Stationer, der ligger over regressionslinien vil generelt give større sikkerhed ved beregningerne end stationer, der ligger under regressionslinien, fordi de svarer til forskellige fraktiler i den regionale fordeling (forskellige værdier af f). Hvis valget står mellem flere forskellige stationer med næsten samme regressorer, må man vælge den station, der svarer bedst til det ønskede sikkerhedsniveau.

Til brug for valg af lokal regnserie for en given lokalitet til enten direkte anvendelse i en simuleringsmodel eller som basis for kalibrering af en nedbørs-generator er der opstillet et mål for afvigelsen af den lokale regnserie fra den regionale ekstremværdimodel. Målstørrelsen er defineret som

$$U = \frac{\hat{z}_{T,LOK} - \hat{z}_{T,REG}}{\hat{\sigma}_{PRED}} \quad (6.2)$$

hvor $\hat{z}_{T,LOK}$ er det lokale T -års estimat beregnet af (4.2) ved indsættelse af de lokalt estimerede PDS parametre,
 $\hat{z}_{T,REG}$ er det regionale T -års estimat beregnet af (4.8), og
 $\hat{\sigma}_{PRED}$ er prediktions standardafvigelsen på det regionale T -års estimat beregnet af (4.9).

Med henvisning til Figur 14, hvor $\hat{\theta}$ i dette tilfælde illustrerer en estimeret T -års hændelse for en vilkårlig nedbørsvariabel, udtrykker nævneren usikkerheden på det regionale T -års estimat (halvdelen af den lodrette afstand mellem regressionslinien og 2,5% hhv. 97,5% sikkerhedsniveauet), mens tælleren udtrykker forskellen mellem det lokale og det regionale T -års estimat. Målestørrelsen kvantificerer signifikansen af denne forskel, idet U er approksimativt normalfordelt. Med andre ord, det lokale T -års estimat kan beskrives som en given fraktil i den regionale fordeling af T -års hændelsen svarende til et givent sikkerhedsniveau. F.eks. svarer $U=-1$ og $U=1$ til hhv. 16% og 84% sikkerhedsniveauet (-fraktilen), mens $U=-2$ og $U=2$ svarer til 2,5% og 97,5% sikkerhedsniveauet (-fraktilen).

6.2 Bearbejdningens systematik

Til klassificering af de enkelte regnserier vha. målestørrelsen U defineret ved (6.2) inddeles de 14 analyserede nedbørsvariable i følgende tre nedbørsklasser, der er karakteristiske for forskellige egenskaber ved regn af betydning for funktionen af afløbssystemer:

- (1) Intensiteter med små varigheder (op til 60 minutter) samt bassin- og overløbsvolumen med stort afløbstal (1,0 $\mu\text{m/s}$). Målestørrelsen beregnes som middelværdien af U for variablene $i10m$, $i30m$, $i60m$, $bv2$ og $ov2$.
- (2) Intensiteter med varigheder på 1-12 timer. Målestørrelsen beregnes som middelværdien af målestørrelserne for variablene $i60m$, $i3h$, $i6h$ og $i12h$.
- (3) Intensiteter med store varigheder (over 12 timer) og bassin- og overløbsvolumen med lille afløbstal (0,1 $\mu\text{m/s}$). Målestørrelsen beregnes som middelværdien af U for variablene $i12h$, $i24h$, $i48h$, $bv1$ og $ov1$.

Idet der kan være betydelige forskelle på de lokale regnseriers beliggenhed i forhold til den regionale model for forskellige gentagelsesperioder inddeles hver nedbørsklasse ydermere i tre forskellige klasser baseret på gentagelsesperioden:

- (a) Små gentagelsesperioder ($1 < T < 5$ år). Målstørrelsen beregnes som middelværdien af målstørrelserne for $T=1, 2$ og 5 år.
- (b) Middel gentagelsesperioder ($5 < T < 20$ år). Målstørrelsen beregnes som middelværdien af målstørrelserne for $T=5, 10$ og 20 år.
- (c) Store gentagelsesperioder ($20 < T < 100$ år). Målstørrelsen beregnes som middelværdien af målstørrelserne for $T = 20, 50$ og 100 år.

6.3 Brug af tabellerne

Klassificeringen af de 41 stationer er givet i bilag E i én tabel for hver af de tre nedbørsklasser. Et uddrag heraf er vist i Tabel 7, hvoraf det ses, at sikkerhedsniveauet for de enkelte regnserier kan aflæses direkte. For eksempel svarer regnserien fra station 31401 (Nakskov) i nedbørsklasse (2) til en 84% fraktil ($U=1$) i fordelingen af T -års hændelsen, regnet som gennemsnit for små, middel og store gentagelsesperioder. Dvs. i de afløbstekniske beregninger, hvor intensiteter med varigheder på 1-12 timer er dimensionsgivende for det betragtede system, vil benyttelse af station 31401 give et sikkerhedsniveau på omkring 84% og derved implicit indbygge en vis sikkerhedsmargin i beregningerne.

Tabel 7. *Klassifikation af stationer vha. U-værdier for nedbørsklasse (2): "Intensiteter med små varigheder samt bassin- og overløbsvolumen med stort afløbstal". U-værdier kan aflæses for 3 intervaller af gentagelsesperioder (T) samt et gennemsnit. (Udsnit af tabel E2 fra bilag E).*

ÅMN [mm]	Station	Region	$1 < T < 5$	$5 < T < 20$	$20 < T < 100$	Middel
545	31031	0	1,2	1,8	2,2	1,7
550	29041	0	-0,5	-0,4	-0,7	-0,5
555	30353	1	-1,7	-1,9	-2,1	-1,9
565	31401	0	0,2	0,9	1,8	1,0
575	30351	1	0,2	0,7	1,2	0,7
575	30352	1	-1,2	-0,9	-0,7	-0,9
580	30411	0	0,5	0,1	-0,2	0,1

Regioner: 0: Danmark udenfor København, 1: København Øst, 2: København Vest.

Klassificeringen kan også benyttes til valg af en passende *repræsentativ* regnserie, jf. princippet skitseret i Figur 14, og derfor er stationerne sorteret efter voksende årsmiddelnedbør i tabellerne. Baseret på den pågældende lokalitets årsmiddelnedbør og beliggenhed (i Københavnsområdet eller i det øvrige Danmark) og den for opgaven karakteristiske nedbørsklasse og gentagelsesperiode udvælges den regnserie, som svarer til fastsat sikkerhedsniveau.

Som det ses af Tabel 7 og bilag E, kan sikkerhedsniveauet for den enkelte station variere betydeligt i de forskellige nedbørsklasser og for forskellige gentagelsesperioder. Det kan derfor ikke udelukkes, at det ved beregning af forskellige problemstillinger for et afløbssystem, f.eks. både kapaciteten af opstrøms beliggende ledninger (nedbørsklasse 1) og aflastningshyppighed af et nedstrøms beliggende bassin med lille afløbskapacitet (nedbørsklasse 3) kan være nødvendigt at anvende forskellige repræsentative regnserier for at opnå samme sikkerhedsniveau af beregningerne. Den enkelte regnseries sikkerhedsniveau kan desuden i nogen grad afhænge af den betragtede gentagelsesperiode.

Enkelte generelle tendenser kan dog udledes af tabellerne. Generelt ligger stationerne 20211 (Sulsted) og 30315 (Husum) betydeligt over den regionale model. Mens 20211 er mest ekstrem for små varigheder og store gentagelsesperioder, har 30315 et mere konstant niveau med en gennemsnitlig målstørrelse på $U=2,4$, svarende til et sikkerhedsniveau på omkring 99%. I den modsatte ende er station 30353 (Tårnby Renseanlæg), som ligger betydeligt under den regionale model i samtlige nedbørsklasser med en gennemsnitlig målstørrelse på $U=-1,8$, svarende til et sikkerhedsniveau på omkring 4%. Stationer der set over alle nedbørsklasser og gentagelsesperioder svarer til et middelniveau i forhold til den regionale model er 26091 (Haderslev Renseanlæg), 28186 Odense Vandværk), 30316 (Måløv Renseanlæg) og 30317 (Glostrup Vandværk).

6.4 Outlier-stationer og stationer med kort observationsperiode

Afbildningen i Figur 14 giver ikke mulighed for at vurdere usikkerheden på det lokale estimat i forhold til usikkerheden på det regionale estimat. Ud over målstørrelsen U er en anden målestørrelse Δ , der tager højde for den enkelte regnseries observationsperiode (stikprøveusikkerhed), derfor opstillet. På grundlag af en vurdering af både U og Δ er der identificeret følgende 5 outlier-stationer, der udviser signifikante afvigelser ($|U|>2$) fra den regionale model: 20211 (Sulsted), 30191 (Dronninggårds Renseanlæg), 30315 (Husum), 30353 (Tårnby Renseanlæg) og 31151 (Næstved Renseanlæg). Det bemærkes dog, at de to stationer 30191 og 31151 er udpeget, fordi én af PDS-parametrene (λ)

afviger signifikant fra den regionale model. En afvigelse af λ kan for store gentagelsesperioder opvejes af de andre parameterverdier, så afvigelsen ikke afspejles i T -års hændelsen, og det kan derfor tænkes, at de to stationer ved nærmere undersøgelser kan accepteres. Der henvises til (Madsen, 1998) for nærmere detaljer.

Ud over at tjene som endnu en måde til vurdering af de 41 stationer, der har indgået i den regionale analyse, har det ved opstilling af Δ været muligt at undersøge, hvor godt nogle af de stationer, der ikke er medtaget i den regionale analyse pga. en for kort observationsperiode, stemmer overens med den regionale model. Det drejer sig om yderligere 19 stationer med mellem 5 og 10 års observationer. Der henvises til den tekniske baggrundsrapport (Madsen, 1998) for nærmere detaljer.

7 Eksempler og sammenligning med ældre datagrundlag

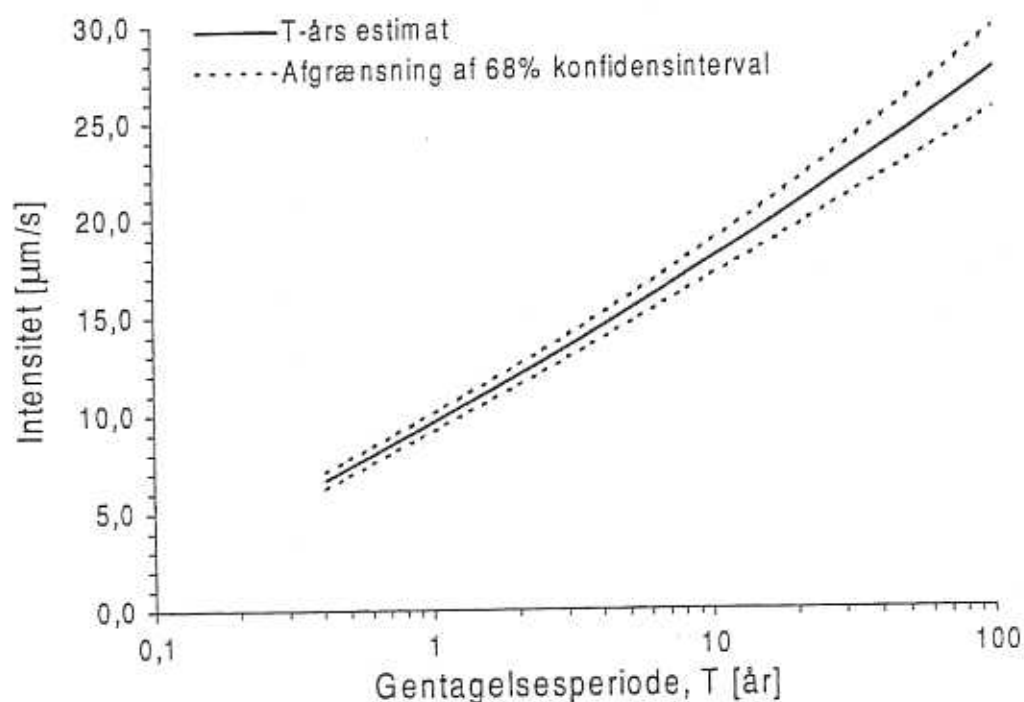
I dette kapitel redegøres der kortfattet for, hvordan T -års estimer af nedbørsvariable kan beregnes samt for de overordnede konklusioner mht. regional variation af T -års estimer af nedbørsvariable. Desuden illustreres det, hvordan regionale dimensioneringsregn svarende til et defineret sikkerhedsniveau kan estimeres. Endelig sammenlignes med regndata udgivet ifm. Spildevandskomitéens tidligere skrifter.

7.1 Regional estimation af T -års hændelser af nedbørsvariable

Baseret på de regionale modeller for PDS-parametrene, der er beskrevet i afsnit 5.5, kan T -års hændelser og de tilhørende prediktionsvarianser for hver af de 14 analyserede nedbørsvariable (se Tabel 3 og Tabel 4) estimeres på en arbitrær lokalitet i Danmark, hvor årsmiddelnedbøren og det sub-regionale tilhørsforhold er kendt. I de fleste tilfælde vil det være klart, hvilken region en lokalitet tilhører, men i Københavnsområdet kan der være tvivlstilfælde, hvor en mere detaljeret undersøgelse er nødvendig for at afgøre det sub-regionale tilhørsforhold.

Den detaljerede beregningsgang, under hensyntagen til resultaterne angivet i afsnit 5.5, er beskrevet i bilag C, hvor ligeledes de nødvendige formler og parameterverdier er anført. Som før nævnt inkluderer prediktionsvariansen stikprøveusikkerhed hidrørende fra hhv. estimation af parametrene ved hver målestation (korrigeret for afhængighed mellem stationerne) og fra estimation af parametrene i regressionsligningen samt residual modelusikkerhed (den del af den regionale variation, der ikke kan forklares vha. regressionsmodellen).

Formler og parameterverdier fra bilag C er desuden indlagt i et regneark, hvormed estimation af ekstreme T -års hændelser af nedbørsvariable på en vilkårlig lokalitet i Danmark kan foretages. Både regnearket samt en brugervejledning hertil kan rekvireres som støtte til anvendelsen af skriftet, se bilag A. Brug af regnearket forudsætter ikke detaljeret kendskab til de bagved liggende beregningsprocedurer, men et vist kendskab til principperne beskrevet i kapitel 4 og 5 er en fordel.



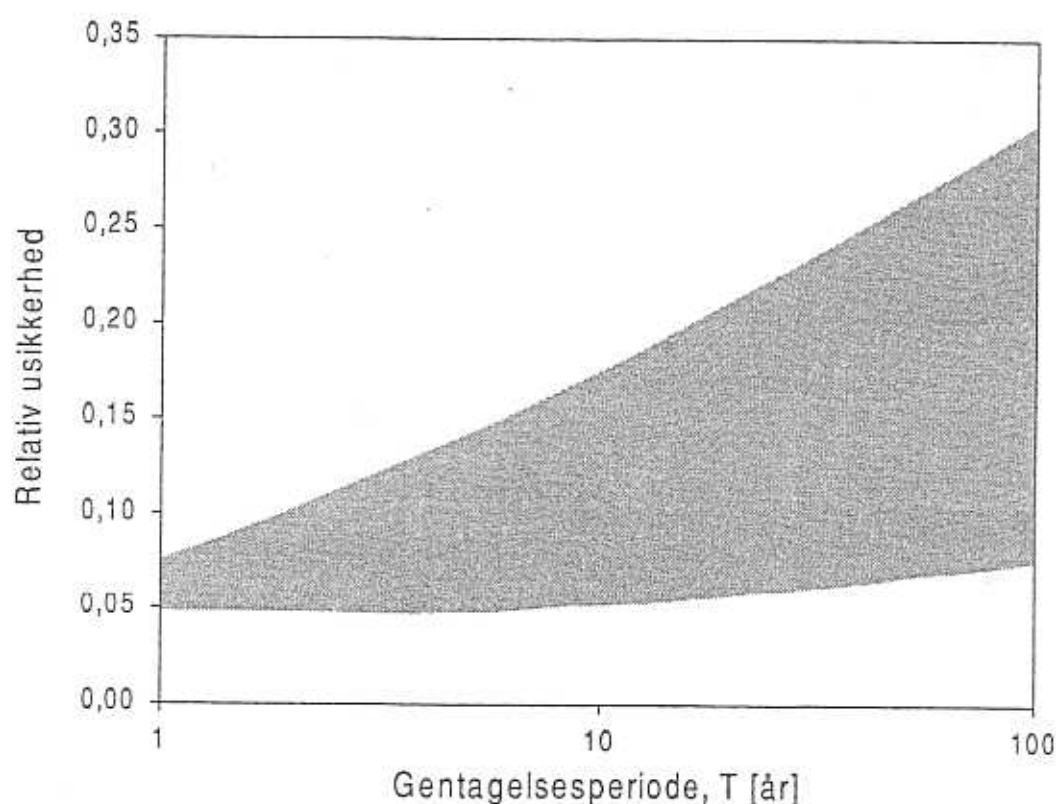
Figur 15. Regionalt T -års estimat for 10 min. intensiteten med tilhørende 68% konfidensinterval (svarende til T -års estimatet ± 1 gange prediktions-standardafvigelsen) for en lokalitet med en årsmiddelnedbør på 650 mm.

Et eksempel på beregning af T -års estimatet for 10 minutters intensiteter med tilhørende usikkerhed er vist i Figur 15. Bemærk, at der i dette tilfælde (for varigheder op til og med én time) ikke skelnes mellem forskellige regioner i landet men kun ses en afhængighed af årsmiddelnedbøren. Afbildninger som vist i Figur 15 kan beregnes vha. regnearket nævnt i bilag A for samtlige de 14 analyserede nedbørsvariable.

Den relative prediktionsusikkerhed (prediktions-standardafvigelsen divideret med det regionale T -års estimat) ses at vokse som funktion af gentagelsesperioden i Figur 15, hvilket skyldes den øgede betydning af stikprøveusikkerhed for store gentagelsesperioder. Variationsområdet af relativ prediktionsusikkerhed for samtlige de 14 analyserede nedbørsvariable er i Figur 16 illustreret for enhver mulig kombination af årsmiddelnedbør og sub-regional placering. For maksimale middelintensiteter ligger den relative usikkerhed generelt nederst i det viste variationsområde for små varigheder (ned til 10 minutter), mens den ligger højest for store varigheder (op til 48 timer). For volumen-baserede og transformerende nedbørsvariable er systematikken ikke helt så klar. Dette illustreres af, at den relative usikkerhed for overløbs- og bassinvolumener

for store afløbstal (*ov2* og *bv2*) ligger øverst i det viste variationsområde, selv om disse nedbørsvariable tilhører nedbørsklasse (1), hvor også intensiteter med små varigheder hører til.

Kurven for den relative usikkerhed for nedbørsvariablen regndybde pr. hændelse (*dph*) ligger omtrent midt i det viste variationsområde, dvs. for $T=1-10$ år ligger den relative usikkerhed på ca. 7-11%. I den første undersøgelse, hvor den regionale variation af ekstremregn i Danmark blev undersøgt, lå dette interval på ca. 10-30%, jf. Figur 1. Reduktionen i usikkerhed sammenlignet med den første undersøgelse skyldes dels, at der i nærværende undersøgelse er medtaget flere observationsår, men den er også et resultat af det teoretiske grundlag for inddragelse af regional regninformation, der er udviklet som et led i arbejdet. Det ses af Figur 16, at den relative usikkerhed for $T=1-10$ år generelt ligger i intervallet ca. 5-15%. Dette betyder, at usikkerheden mht. dimensionsgivende regndata i dag er nede på et niveau, der svarer til andre betydende usikkerheder ifm. afløbstekniske beregninger, se (Arnbjerg-Nielsen & Harremoës, 1996b).

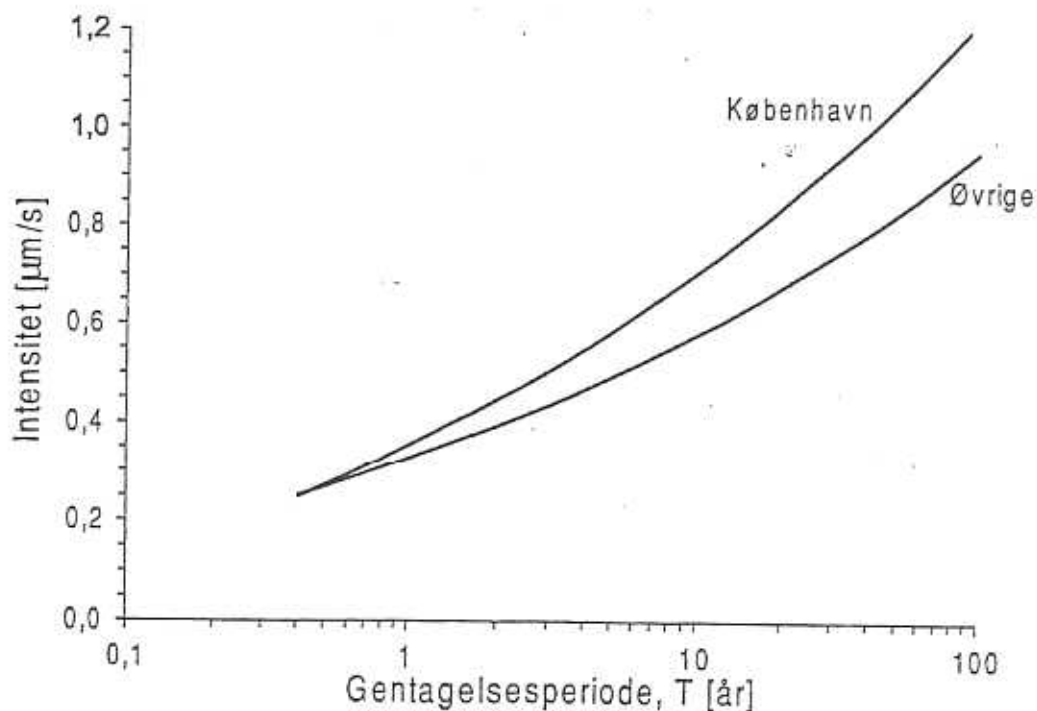


Figur 16. Variationssområde for den relative prediktionsusikkerhed af regionale T -års estimer for de 14 analyserede nedbørsvariable.

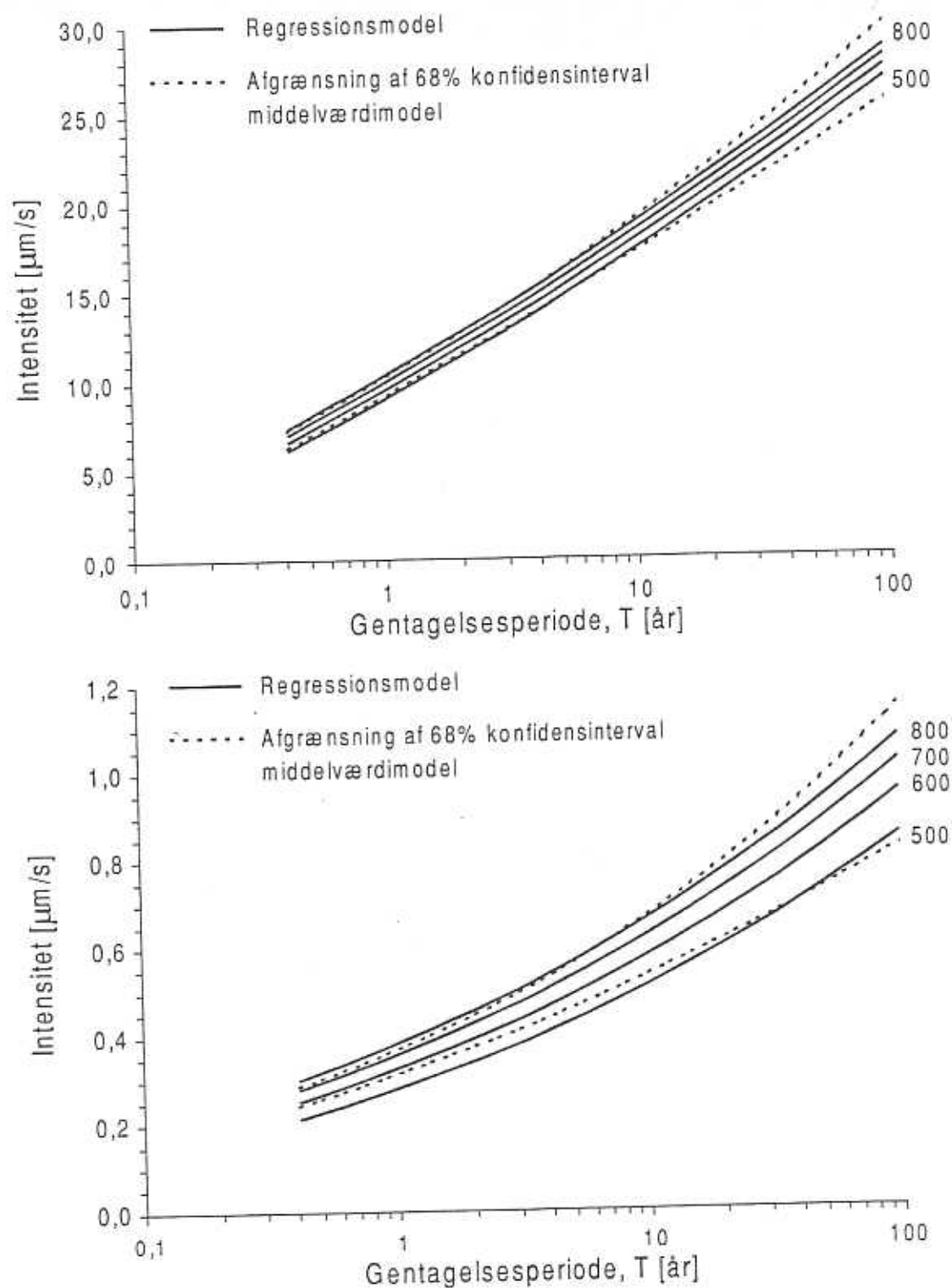
7.2 Regional variation af T -års estimer af nedbørsvariable

Effekten af forskelligt niveau for middelloverskridelsen er vist i Figur 17. T -års estimatet i Københavnsområdet er betydelig højere end i den øvrige del af landet, og forskellen mellem de to regioner er større jo større gentagelsesperiode, der betragtes.

Effekten af årsmiddelnedbøren på estimerede T -års hændelser fremgår af Figur 18, hvor T -års estimatet i subregion "Danmark udenfor København" for 10 minutters og 24 timers intensiteten er vist for en årsmiddelnedbør på henholdsvis 500, 600, 700 og 800 mm og sammenholdt med 68% konfidensintervallet for T -års hændelsen baseret på den regionale middelværdi-model. Generelt gælder, at T -års estimatet vokser med voksende årsmiddelnedbør. Den relative effekt af årsmiddelnedbøren afhænger imidlertid af den betragtede nedbørsvariabel og af gentagelsesperioden. Den relative forskel mellem T -års estimer for forskellig årsmiddelnedbør er størst for intensiteter med store varigheder, bassin- og overløbsvolumener for små afløbstal, samt for regndybden pr. hændelse og døgnnedbøren.



Figur 17. T -års estimat i de to subregioner "København" (bestående af både øst og vest stationer) og "Danmark udenfor København" for 24 timers intensiteten med årsmiddelnedbør på 600 mm.



Figur 18. T-års estimat i subregion "Danmark udenfor København" for 10 minutters intensiteten (øverst) og 24 timers intensiteten (nederst) for forskellige værdier af årsmiddelnedbøren, sammenholdt med 68% konfidensintervallet baseret på den regionale middelværdi-model.

For små gentagelsesperioder (T mindre end ca. 10 år) er variationen grundet forskelle i årsmiddelnedbør større end den generelle prediktionsusikkerhed baseret på den regionale middelværdi-model. For større gentagelsesperioder har variationen af middel antal overskridelser begrænset betydning sammenlignet med variationen af middelloverskridelsen og formparameteren, og variationen af T -års estimatet grundet forskelle i årsmiddelnedbør overskygges da af den generelle usikkerhed.

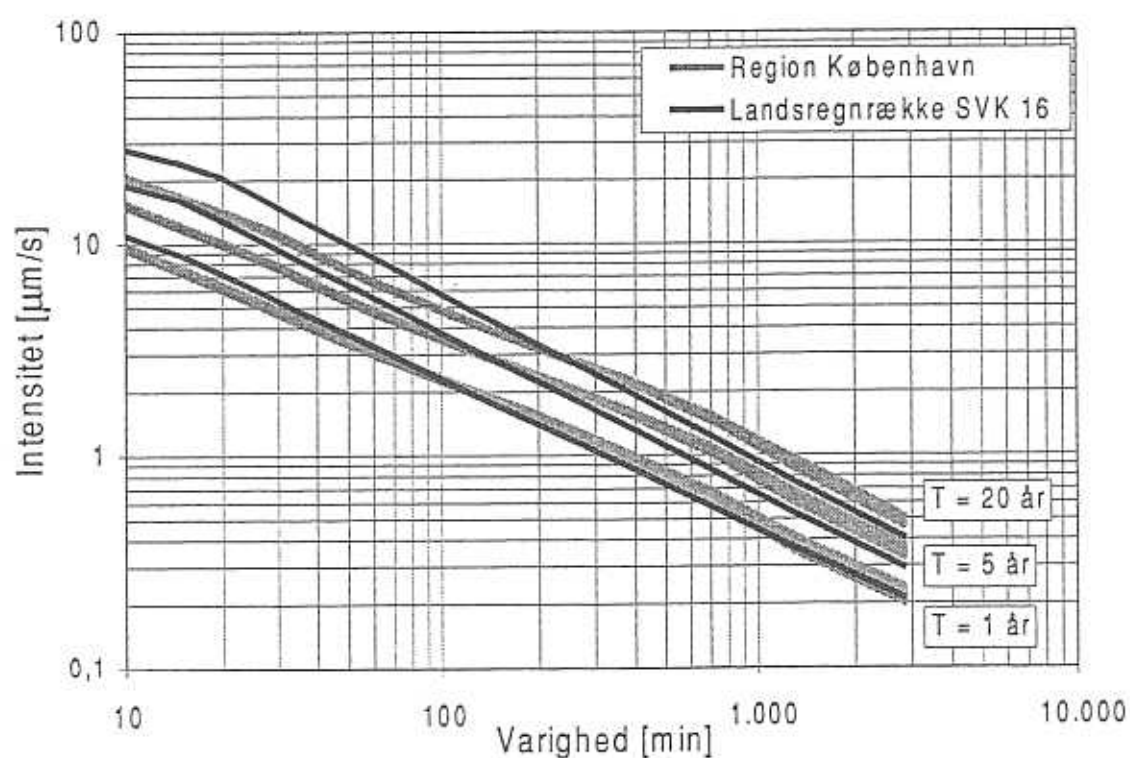
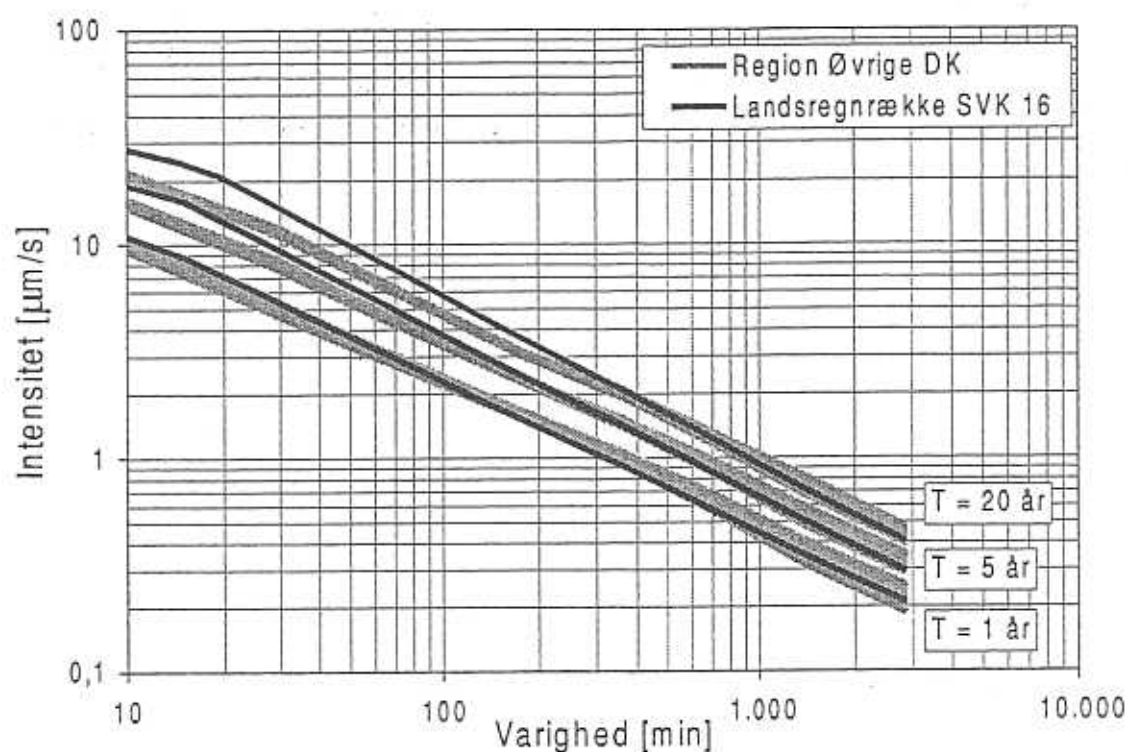
7.3 Variationsområde for regionale regnkurver

For de to regioner "Danmark udenfor København" og "København" er de regionale T -års estimater for middelintensiteter af forskellig varighed optegnet i Figur 19 som regnkurver, dvs. middelintensiteter som funktion af varigheden for forskellige gentagelsesperioder. T -års estimaterne er tydeligvis størst i Københavnsområdet for store varigheder. Bemærk, at de to subregioner er ens for varigheder mindre end eller lig med 1 time, og at forskellen i de viste variationsområder i dette område udelukkende skyldes forskelle i variationsbredde af årsmiddelnedbør i de to subregioner, jf. Figur 5. Der er taget udgangspunkt i en sikkerhedsfaktor på $f=0$ ved optegning af variationsområderne i Figur 19.

Det ses tydeligt, at variationsområderne er relativt smalle for små varigheder og relativt brede for store varigheder. I afløbsteknisk sammenhæng betyder dette, at den regionale variation har stor betydning ifm. analyse af problemstillinger relateret til store nedbørsvolumener, f.eks. bassindimensionering og beregning af aflastninger for små afløbstal. Omvendt vil betydningen af den regionale variation være mindre for store afløbstal og ved analyse af rørkapacitet og opstuvning i opstrøms beliggende oplande.

7.4 Sammenligning med landsregnrækkerne

Til sammenligning er landsregnrækkerne (SVK, 1974) ligeledes afbildet som regnkurver på Figur 19. For intensiteter med små varigheder (1 time og derunder) ligger de regionale regnkurver betydeligt under Landsregnkurverne, men dette udjævner sig for større varigheder. Der gives ingen umiddelbar forklaring på den observerede forskel, men det bemærkes, at der er tale om regndata fra forskellige perioder målt vha. forskellige måleprincipper, at der har været anvendt forskellige definitioner af adskilte regnhændelser for nedbørsvariable, og at der blev anvendt manuelle aflæsnings- og beregningsmetoder ved opstilling af landsregnkurverne.



Figur 19. Sammenligning af Landsregnrækkerne (SVK, 1974) afbildet som regnkurver med de regionalt estimerede regnkurver for "Danmark udenfor København" (øverst) og "København" (nederst). Skraveringen illustrerer variationsbredden af årsmiddelnedbør i de to regioner.

For større varigheder er regnkurverne i subregion "Danmark udenfor København" stort set identisk med Landsregnkurverne. For subregion "København" er der derimod en betydelig forskel mellem Landsregnkurverne og de regionale regnkurver for store varigheder (over 3 timer). I dette tilfælde er T -års estimatet for subregion "København" signifikant højere end for Landsregnkurverne.

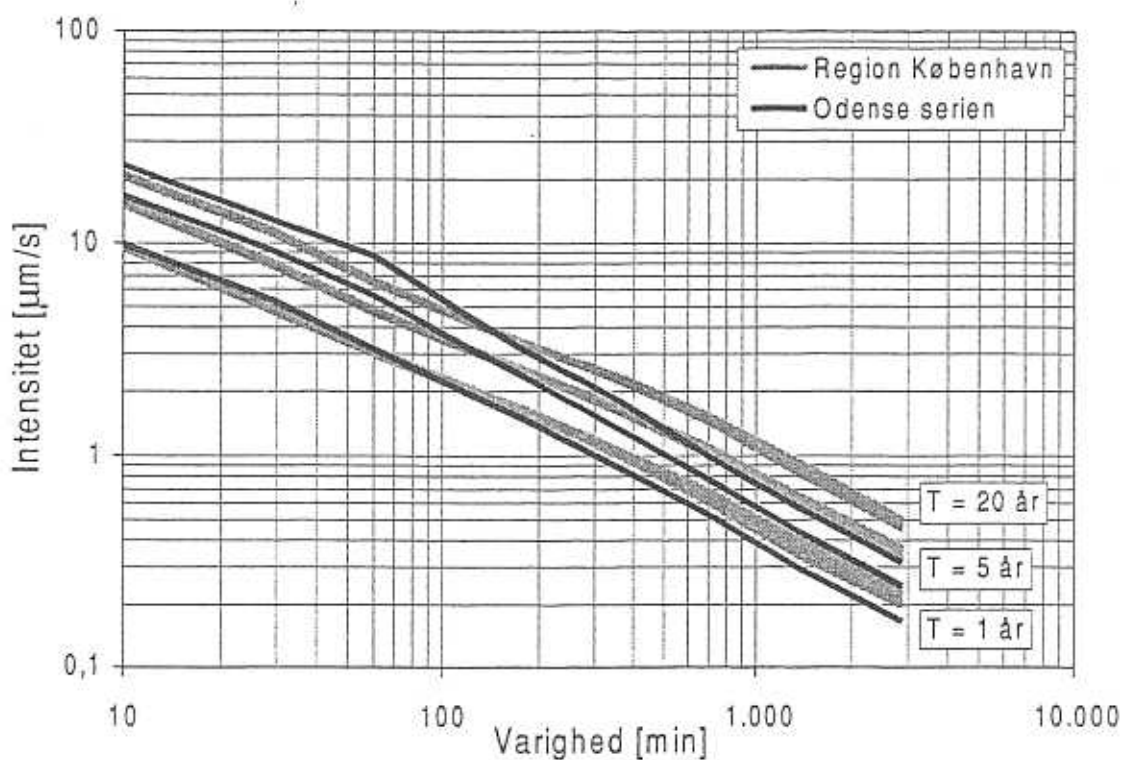
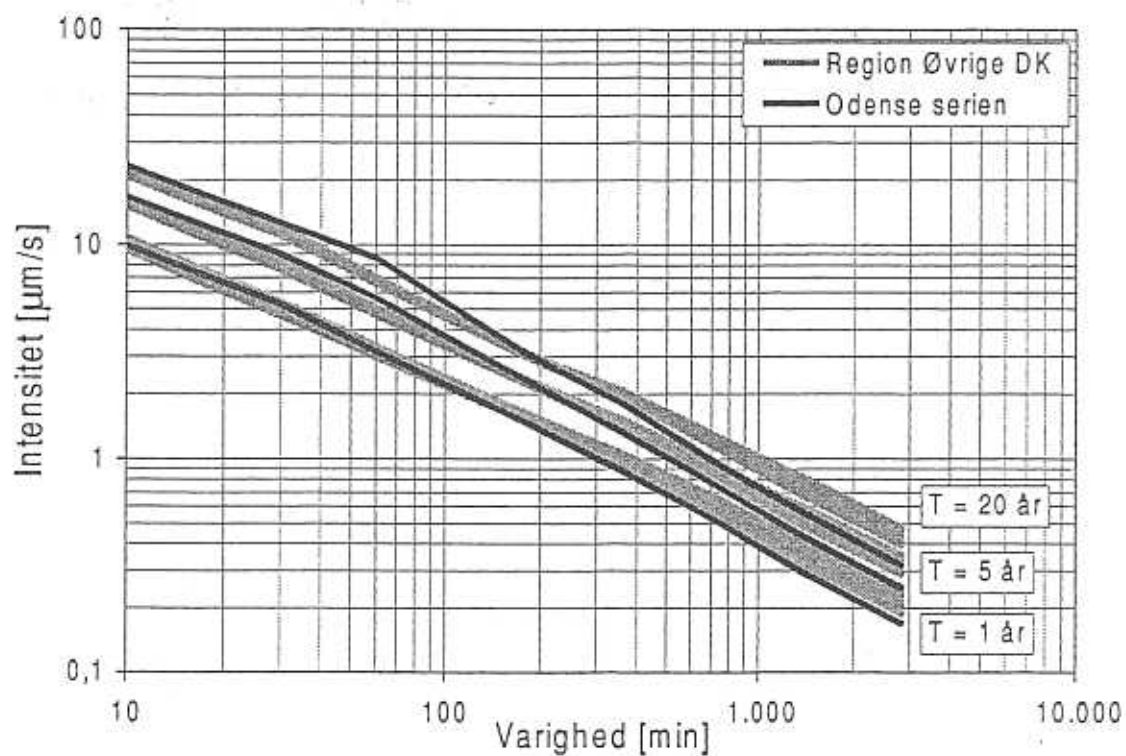
7.5 Sammenligning med Odense-regnserien, 33 helår 1933-80

Gennem en årrække i 1980'erne og 90'erne er Odense-regnserien blevet benyttet ved mange afløbstekniske beregninger i Danmark. Dette skyldes dels, at Spildevandskomitéens skrifter nr. 18 og 21 er baseret på denne regnserie, og at den i en årrække reelt var eneste mulighed, da regnserierne fra Spildevandskomitéens Regnmålersystem var for korte til anvendelse indenfor afløbsteknik. Som grundlag for en sammenligning er nedbørsvariable udtrukket fra Odense-regnserien jf. principperne beskrevet i afsnit 5.2, og T -års hændelser er estimeret ved tilpasning til PDS-modellen jf. afsnit 4.1.

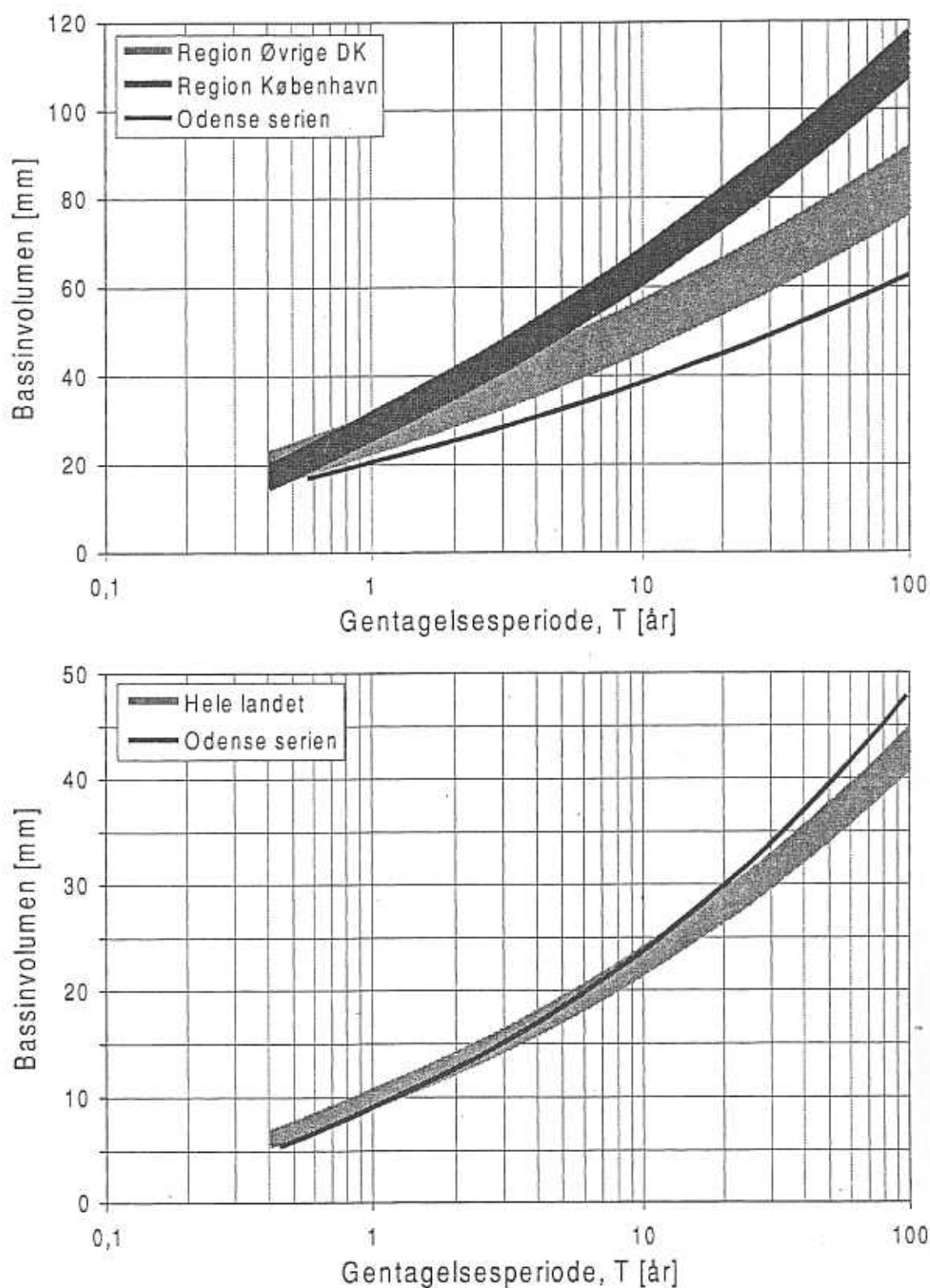
Regnkurver for Odense-regnserien er sammenlignet med de regionale regnkurver for de to regioner "Danmark udenfor København" og "København" i Figur 20. For små varigheder ligger Odense-regnserien indenfor eller lidt over variationsområdet for de regionale regnkurver. For store varigheder ligger Odense-regnserien signifikant under de regionale regnkurver (og også betydeligt under landsregnkurverne). F.eks. svarer en 20-års hændelse for Odense-regnserien for varigheder større end ca. 12 timer til en 5-års hændelse for de nye regionale regnkurver.

For volumenbaserede og transformerede variable ses samme tendens. Dvs. for regndybde og døgnnedbør samt bassin- og overløbsvolumen for små afløbstal ligger Odense-regnserien betydeligt under de regionale estimater. For bassin- og overløbsvolumen for store afløbstal ligger Odense serien stort set indenfor variationsbredden af de regionale estimater. For bassinvolumen med de to forskellige afløbstal er T -års estimater for Odense-regnserien sammenholdt med de regionale estimater i Figur 21. Bemærk, at de to regioner er ens for $a=1,0 \mu\text{m/s}$ (ingen forskel i middelloverskridelsen), men at de er forskellige for $a=0,1 \mu\text{m/s}$ svarende til forskellen for 24 timers intensiteten vist i Figur 17.

Figur 20 og Figur 21 viser tydeligt, at Odense-regnserien systematisk underestimerer maksimale middelintensiteter for store varigheder samt bassin- og overløbsvolumener for små afløbstal. Dette er yderligere illustreret i Tabel 8, idet de beregnede U -værdier (jf. lign 6.2) for nedbørsklasse (3) ligger klart under $-2,0$.



Figur 20. Sammenligning af regnkurver for Odense-regnserien (33 helår, 1933-80) med de regionalt estimerede regnkurver for "Danmark udenfor København" (øverst) og "København" (nederst). Skraveringen illustrerer variationsbredden af årsmiddelnedbør i de to regioner (som på Figur 19).



Figur 21. Sammenligning af Odense-regnserien og de regionale estimater for bassinvolumen med afløbstal $a=0,1 \mu\text{m/s}$ (øverst) og $a=1,0 \mu\text{m/s}$ (nederst). De beregnede regionale estimater svarer til variationsbredden af årsmiddelnedbøren i de to regioner.

Tabel 8. Klassificering af Odense-regnserien (33 helår, 1933-80) vha. U-værdier.

Nedbørsklasse	1<T<5	5<T<20	20<T<100	Middel
(1)	0,7	1,7	1,8	1,3
(2)	-0,9	0,3	0,7	0,0
(3)	-2,3	-2,5	-2,7	-2,5

Resultaterne vist i Tabel 8 støtter tidligere undersøgelser, der også har vist, at Odense-regnserien ligger højt for nedbørsklasse (1) "intensiteter med små varigheder samt bassin- og overløbsvolumen med stort afløbstal" og lavt for nedbørsklasse (3) "intensiteter med store varigheder samt bassin- og overløbsvolumen med lille afløbstal". Der gives ingen umiddelbar forklaring på de observerede forskelle mellem Odense-regnserien og den regionale model, men fænomenet kan evt. skyldes, at der er tale om regndata fra forskellige perioder målt vha. forskellige måleprincipper. Det er interessant at bemærke, at en af regnserierne fra Spildevandskomitéens Regnmålersystem er placeret på omtrent samme lokalitet som den hér undersøgte Odense-regnserie. Det drejer sig om station 28186 (Odense Vandværk), der er udpeget som en station, der ellers set over alle nedbørsklasser og gentagelsesperioder svarer til et middelniveau ($U \approx 0$) i forhold til den regionale model, se afsnit 6.3. Der er ikke i forbindelse med udarbejdelse af nærværende skrift gennemført en nærmere analyse af dette forhold.

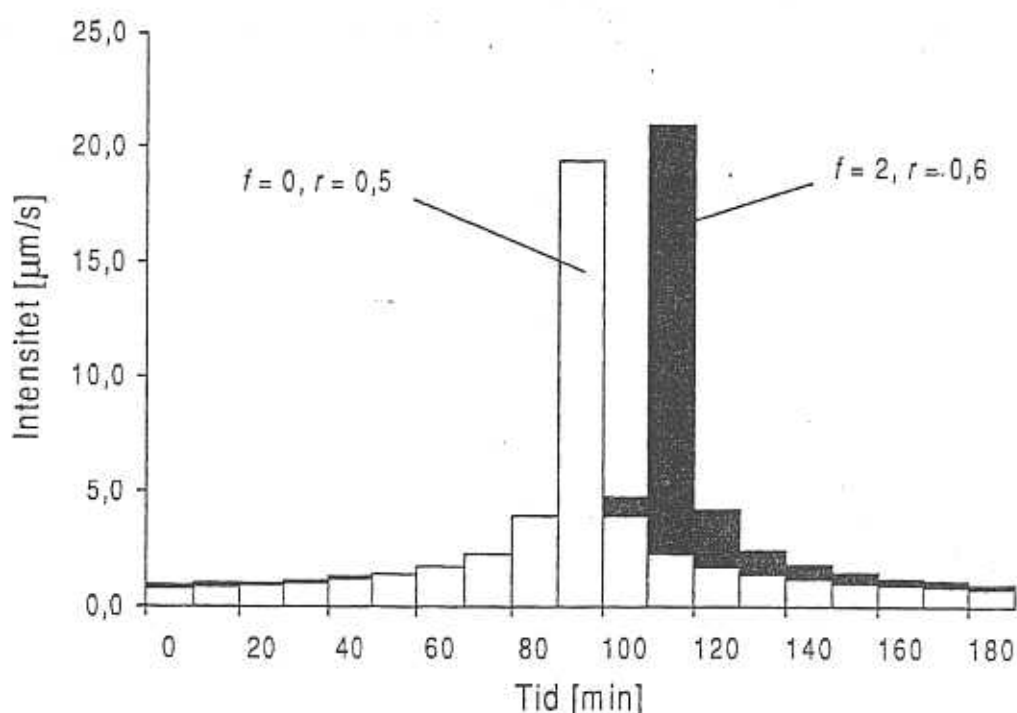
7.6 Generering af CDS-regn

Som nævnt i afsnit 3.7 har CDS-regn fundet bred anvendelse i mange danske ingeniørfirmaer, f.eks. ved analyse af den hydrauliske kapacitet af mindre opstrøms beliggende ledningsanlæg. Der gives i dette skrift ikke faste kriterier for, i hvilke situationer det er rimeligt at benytte CDS-regn, eller for hvordan f.eks. intensitets-toppen bør placeres, men der stilles et værktøj til rådighed, så regionale CDS-regn kan estimeres overalt i landet på et ensartet grundlag. Det teoretiske grundlag og den detaljerede beregningsgang er beskrevet i bilag D, og hér refereres kun hovedtræk.

Den valgte metode til konstruktion af CDS-regn følger i store træk principperne introduceret af Keifer & Chu (1957). Det skal dog bemærkes, at der benyttes en lidt anderledes parameterisering af regnkurven, og at der tillige introduceres en

diskret udgave af CDS-regn, der lægger direkte op til at genere inddata til brug ved modelsimuleringer. Følgende beregningsgang benyttes:

1. Dimensioneringskriterierne fastlægges, dvs. gentagelsesperioden T samt en frekvensfaktor f , der definerer det ønskede sikkerhedsniveau, jf. (4.10). På dette grundlag estimeres en regional regnkurve ud fra årsmiddelnedbøren det pågældende sted og den subregionale placering.
2. Der tages udgangspunkt i det i Danmark traditionelt anvendte to-parameter udtryk for regnformler (SVK, 1974), og parametrene bestemmes ved simpel lineær regression. Det er ikke fundet nødvendigt at introducere et tre-parameter udtryk til beskrivelse af regnkurver.
3. Asymmetrikoeficienten, r , samt tidsskridtet og regnens varighed fastsættes, og CDS-regnen bestemmes sluttelig. Der gives ikke hér nogen vejledning i fastsættelse af disse tre parametre.



Figur 22. Regionale CDS-regn for gentagelsesperioden $T=10$ år, varigheden 3 timer og tidsskridtet 10 minutter, svarende til en årsmiddelnedbør på 650 mm i region "Danmark udenfor København".

Beregningstrinnene 1-3 er indlagt i et regneark, hvormed estimation af CDS-regn på en vilkårlig lokalitet i Danmark kan foretages. Både regnearket samt dokumentation og brugervejledning kan rekvireres som støtte for anvendelse af skriftet, se bilag A. Til illustration af betydningen af sikkerhedsfaktoren (f) og asymmetrikoefficienten (r) viser Figur 22 to CDS-regn genereret vha. af regnearket. Begge CDS-regn gælder for gentagelsesperioden $T=10$ år, svarende til en årsmiddelnedbør på 650 mm i region "Danmark udenfor København".

Den hvide hyetograf gælder for et sikkerhedsniveau svarende til $f=0$, og hyetografens top er placeret midtvejs i hændelsen, dvs. $r=0,5$. Den sorte hyetograf gælder for et sikkerhedsniveau på $f=2$, hvilket ses af, at intensitetstoppen er lidt højere end for den hvide hyetograf. Desuden er der benyttet $r=0,6$ hvilket er årsagen til, at toppen er placeret i hændelsens sidste halvdel.

8 Afslutning

8.1 Konklusioner

Der er påvist statistisk signifikante og i afløbsteknisk sammenhæng væsentlige regionale (geografiske) variationer at ekstremregn i Danmark. På baggrund heraf er der opbygget en model til beskrivelse af de regionale variationer og estimation af regionale T -års hændelser som funktion af årsmiddelnedbøren på den enkelte lokalitet samt placeringen i én af sub-regionerne *Danmark udenfor København, København vest og København øst*. Den regionale variation har størst betydning for maksimale middelintensiteter for store varigheder samt bassin- og overløbsvolumener for små afløbstal. Der er udviklet forskellige metoder og værktøjer til vurdering og udvælgelse af repræsentative historiske regnserier på baggrund af den regionale model og estimation af dimensioneringsregn ved inddragelse af regional regninformation. Ved fastlæggelse af dimensionsgivende regndata tages udgangspunkt i et ønsket sikkerhedsniveau.

En model til generering af syntetiske regnserier, der genskaber regnens statistiske egenskaber (korttids-varationer, sæsonvarationer etc.) med tilstrækkelig nøjagtighed, foreligger endnu ikke.

8.2 Perspektivering

Den anvendte PDS-model med GP-fordelte overskridelser er baseret på tre modelparametre til karakterisering af ekstremhændelser over et vist niveau, hhv. middel antal overskridelser pr. år (λ), størrelsen af middelloverskridelsen (μ) og en formparameter (κ). Den regionale model angiver generelt, at λ er en voksende funktion af årsmiddelnedbøren, og der blev ikke fundet andre forklarende variable af betydning. For både μ og κ gælder det, at de for nogle nedbørsvariable varierer signifikant i landet, men at variationen ikke kan forklares ved den benyttede regressionsmodel. Specielt er μ for de Københavnske stationer større end i resten af landet, hvilket formentlig skyldes storby-fænomener som luftforurening og generel opvarmning. Det må forventes, at en tilsvarende effekt ville kunne spores for andre større byer, såfremt tilstrækkeligt mange målestationer var tilstede.

En væsentlig informationskilde, som ikke er medtaget i analyserne, er ekstremværdikarakteristika af døgnnedbøren fra DMI's net af manuelle Hellmann målere. En indledende undersøgelse har vist, at der er potentiale i at sammenholde den regionale variation af PDS-parametrene med tilsvarende parametre for ekstremværdiserier af døgnnedbør fra nettet af Hellmann målere (Madsen et al., 1996). Dette åbner mulighed for at indsnævre usikkerheden ved estimation af dimensionsgivende regndata yderligere. Da nettet af Hellmann målere er væsentlig tættere end nettet af SVK-målere, åbner det ligeledes mulighed for at studere de spatiale variationer på en mindre skala, herunder variationer på oplands-skala, variationer relateret til målernes næromgivelser og storbyeffekten nævnt ovenfor.

Der er et klart perspektiv ved at fortsætte udviklingsarbejdet med generering af syntetiske regnserier. Der er allerede nu opnået væsentlige resultater, men der er tendens til, at de genererede regnserier underestimerer specielt langvarige og volumenrige ekstremregn. Det forventes, at en beskrivelse af sæsonvariationer og inddragelse af supplerende modelprincipper, vil kunne forbedre resultatet væsentligt samt øge muligheden for en regional beskrivelse, der vil gøre det muligt at generere syntetiske regnserier på lokaliteter uden målestationer.

Den forståelse, der gennem arbejdet med dette skrift er opnået for spatiale variationer af regndata samt korrelation mellem målestationer, åbner derudover mulighed for mere indgående at studere betydningen af regnens bevægelse og arealmæssige udbredelse for belastningen af afløbssystemer.

9 Referencer

- Allerup, P.; Madsen, H. & Riis, J. (1982): Methods for calculating areal precipitation - applied to the Suså-catchment. *Nordic Hydrology*, **13**, 263-278.
- Andersen, H.S.; Jacobsen, P. & Harremoës, P. (1991): Influence of rainfall movement on peak discharge in urban sewers. *Nordic Hydrol.*, **22**, 243-252.
- Arnbjerg-Nielsen, K. (1999): Generering af kunstige regnserier. Institut for Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet. Kan rekvireres fra <http://www.imt.dtu.dk>.
- Arnbjerg-Nielsen, K. (1996): Statistical analysis of urban hydrology with special emphasis on rainfall modelling. *Ph.D. Thesis*. Department of Environmental Science and Engineering, Technical University of Denmark. Lyngby.
- Arnbjerg-Nielsen, K. (1993): Non-parametric statistics on extreme rainfall. *M.Sc. thesis*. Department of Environmental Engineering, and Institute of Mathematical Statistics and Operations Research, Technical University of Denmark.
- Arnbjerg-Nielsen, K. & Harremoës, P. (1996a): Prediction of hydrological reduction factor and initial loss in urban surface runoff from small ungauged catchments. *Atmospheric Research*, **42**, (1-4), 137-147.
- Arnbjerg-Nielsen, K. & Harremoës, P. (1996b): The importance of inherent uncertainties in state-of-the-art urban storm drainage modelling from ungauged small catchments. *Journal of Hydrology*, **179**, 305-319.
- Arnbjerg-Nielsen, K.; Harremoës, P. & Spliid, H. (1996): Interpretation of regional variation of extreme values of point precipitation in Denmark. *Atmospheric Research*, **42**(1-4), 99-111.
- Arnbjerg-Nielsen, K.; Spliid, H. & Harremoës, P. (1994): Non-parametric statistics on extreme rainfall. *Nordic Hydrology*, **25**, 267-278.
- Bramslev, J.-P.; Harremoës, P. & Jacobsen, P. (1989): Bearbejdning af nedbørsdata fra et landsdækkende regnmålersystem (+ 43 bilagsrapporter). Laboratoriet for Teknisk Hygiejne, Danmarks Tekniske Højskole. Lyngby.

- Cappelen (1993): Kvalitetsmarkering af automatiske nedbørsregistreringer. Danish Meteorological Institute, Technical Report 93-16.
- Cappelen, J. & Jørgensen, H.K. (1997): Drift af Spildevandskomitéens regnmålersystem. Årsnotat 1996. Danish Meteorological Institute, Technical Report 97-4.
- Dansk Standard (1999): Afløbssystemer uden for bygninger. Del 4: Hydraulisk design og miljøaspekter. DS/EN 752-4:1999 (på engelsk).
- Dahl, A.; Mikkelsen, P.S. & Harremoës, P. (1992): Ekstremregns intensiteter og rørdimensionering. *Stads- og Havneingeniøren*, 83, (8), 30-34.
- Frich, P.; Rosenørn, S.; Madsen, H. & Jensen, J.J. (1997): Observed precipitation in Denmark, 1961-90. Danish Meteorological institute, Technical report 97-8.
- Harremoës, P. & Mikkelsen, P.S. (1995): Properties of extreme point rainfall I: Results from a rain gauge system in Denmark. *Atmospheric Research*, 37, 277-286.
- Harremoës, P.; Mikkelsen, P.S.; Bramslev, J.-P. & Dahl, A. (1992): Ekstremregns nedbørsmængde og geografiske fordeling. *Stads- og havneingeniøren*, 83(6/7), 30-35.
- Jensen, M. (1990): Rain-runoff parameters for six small gauged urban catchments. *Nordic Hydrol.*, 21, 165-184.
- Jørgensen, H.K., Rosenørn, S., Madsen, H. & Mikkelsen, P.S. (1998): Quality control of rain data used for urban runoff systems. *Water Science and Technology*, 37(11), 113-120.
- Keifer, C.J. & Chu, H.H. (1957): Synthetic storm pattern for drainage design. *ASCE J. Hydraul. Div.*, 83(HY 4), 1332/1-1332/25.
- Madsen (1998): Ekstremregn i Danmark. Statistisk bearbejdning af nedbørsdata fra Spildevandskomitéens Regnmålersystem 1979-96. Institut for Strømningsmekanik og Vandresurser samt Institut for Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet. Kan rekvireres fra <http://www.imt.dtu.dk>.
- Madsen, H. (1996): At-site and regional modelling of extreme hydrologic events. *Ph.D. thesis*. Department of Hydrodynamics and Water Resources, Technical University of Denmark.

- Madsen, H. (1993): Statistisk analyse af ekstremregn i Danmark. *Eksamensprojekt*. Institut for Strømningsmekanik og Vandbygning, Danmarks Tekniske Højskole.
- Madsen, H. & Rosbjerg, D. (1997a), The partial duration series method in regional index-flood modeling, *Water Resources Research*, **33**(4), 737-746.
- Madsen, H. & Rosbjerg, D. (1997b): Generalized least squares and empirical Bayes estimation in regional partial duration series index-flood modeling, *Water Resources Research*, **33**(4), 771-781.
- Madsen, H.; Rosbjerg, D. & Harremoës, P. (1994): PDS-modelling and regional Bayesian estimation of extreme rainfalls. *Nordic Hydrology*, **25**, 279-300.
- Madsen, H.; Rosbjerg, D.; Mikkelsen, P.S. (1996): L-moment analysis of Danish rainfall extremes. XIX Nordic Hydrological Conference (NHK-96), Akureyri, Iceland, August 13-15. Proceedings, **1**, 734-743. NHP-report No. 40.
- Mikkelsen, P.S. (1995): Hydrological and pollutional aspects of urban storm-water infiltration. *Ph.D. thesis*. Institute of Environmental Science and Engineering. Technical University of Denmark. Lyngby. 82 pp. + app.
- Mikkelsen, P.S., Arnbjerg-Nielsen, K. & Harremoës, P. (1997): Consequences for established design practice from geographical variation of historical rainfall data. *Water Science and Technology*, **36**(8-9), 1-6.
- Mikkelsen, P.S.; Dahl, A. & Harremoës, P. (1992): Regnserier, overløbsmængder og bassindimensionering. *Stads- og Havneingeniøren*, **83**, 52-61.
- Mikkelsen, P.S.; Madsen, H.; Rosbjerg, D. & Harremoës, P. (1996): Properties of extreme point rainfall III: Identification of spatial inter-site correlation structure. *Atmospheric Research*, **40**, 77-98.
- Nielsen, M.K. (1999): Drift af Spildevandskomitéens regnmålersystem. Årsnotat 1998. Danish Meteorological Institute, Technical Report 99-4.
- Niemczyniowicz, J. (1984): An investigation of the areal and dynamic properties of rainfall and its influence on runoff generating processes. *Thesis*, (1005), 1-215 + appendix. Department of Water Resources Engineering, Lunds University of Technology/University of Lund, Sweden.
- PH-consult (1992): Ekstremstatistik for regn. Notat udarbejdet for Dansk Ingeniørforening, Spildevandskomitéen.

- Rosbjerg, D.; Correa, J. & Rasmussen, P.F. (1992): Justification des formules de probabilité empirique basées sur la médiane de la statistique d'ordre. *Revue des sciences de l'eau*, **5**, 529-540.
- Rosbjerg, D. & Madsen, H. (1992): On the choice of threshold level in partial duration series. Nordic Hydrolic Conference, Alta. *NHP-rep.*, **30**, 604-615.
- Rosbjerg, D. & Madsen, H. (1996): The role of regional information in estimation of extreme point rainfalls, *Atmospheric Research*, **42**, 113-122.
- SVK (1974): Bestemmelse af regnrækker. Dansk Ingeniørforening, Spildevandskomitéen, *skrift nr. 16*. Teknisk Forlag.
- SVK (1980): Spildevandskomitéens regnmålersystem. Dansk Ingeniørforening, Spildevandskomitéen, *skrift nr. 17*. Teknisk Forlag.
- SVK (1984a): Maksimalafstrømninger og bassinvoluminer fra historiske regnserier. Dansk Ingeniørforening, Spildevandskomitéen, *skrift nr. 18, 1+2*. Tekst og Tryk.
- SVK (1984b): Recipientbelastning fra overløbsbygværker. Dansk Ingeniørforening, Spildevandskomitéen, *skrift nr. 21, 1+2*. Tekst og Tryk.

Ordliste

- CDS-regn (Chicago Design Storm).** Dimensioneringsregn, der for en valgt gentagelsesperiode indeholder information om maksimale middelintensiteter for et spektrum af varigheder. Princippet bag CDS-regn blev oprindelig udviklet i Chicago/USA, deraf navnet.
- Dimensioneringsregn.** Konstruerede, syntetiske ekstremhændelser for en på forhånd defineret gentagelsesperiode, der benyttes som dimensionsgivende input til beregninger.
- Ekstremværdiserie.** Rangordnet serie af ekstremhændelser af en nedbørsvariable. Hver ekstremhændelse kan tildeles en gentagelsesperiode for overskridelse vha. en ploteformel.
- Filtrerede regndata.** Regndata, der er blevet behandlet for at udtrække relevante nedbørsvariable. Typisk eksempler på filtrerede data er regnkurver og CDS-regn.
- Geografisk variation.** Se *regional variation*.
- Historiske regnserier.** Målte ufiltrerede tidsserier af regndata, der typisk er lagret i et filformat, så de kan bruges som input til simulering med hydrologiske modeller.
- Lokalt T -års estimat.** Estimat af en T -års hændelse på basis udelukkende af lokale regndata.
- Lokale regndata.** Regndata målt på en lokalitet, det er placeret *indenfor* eller *tæt ved* et aktuelt opland.
- Nedbørsvariable.** Et sæt variable, der kan bruges til at karakterisere regn på hændelses-basis. Almindelige eksempler er maksimalintensiteter pr. hændelse beregnet som et gennemsnit over en defineret varighed eller den totale regndybde pr. hændelse. Andre eksempler af specielt relevans for afløbsteknik er overløbsvolumener og nødvendige bassinvolumener for definerede oplandskarakteristika.
- Overskridelsesserie.** Rangordnet serie af ekstremhændelser af nedbørsvariable over et vist niveau (del af en ekstremværdiserie over et vist niveau).
- PDS-model (Partial Duration Series model).** Parametrisk statistisk model til estimation af ekstremhændelser på baggrund af observerede ekstreme

regnhændelser større end et vist niveau (en overskridelsesserie). Modellen indeholder en beskrivelse af hyppigheden af overskridelser samt af overskridelsernes størrelse.

Plotteformel. Formeludtryk, hvormed rangordnede observationer tildeles en empirisk gentagelsesperiode for overskridelse.

Prediktionsusikkerhed. Den totale usikkerhed forbundet med estimation af T -års hændelser. Prediktionsusikkerheden tager højde for både stikprøveusikkerhed og residual modelusikkerhed i den regionale model.

Region. Et område klassificeret efter geografi og/eller andre relevante fysiografiske og klimatiske parametre. Såfremt der ikke er variation af nedbørsvariable indenfor regionen, benævnes den homogen. I modsat fald er den heterogen. Heterogeniteten kan forsøges beskrevet ved regression af nedbørsvariable med fysiografiske eller klimatiske parametre, eller regionen kan inddeles i mere homogene subregioner.

Regionale regndata. Regndata målt på flere lokaliteter indenfor den betragtede region.

Regionalt T -års estimat. Estimat af en T -års hændelse på basis af regionale data.

Regional model. Model, der beskriver den observerede regionale variation. Der kan f.eks. være tale om en regressionsmodel eller om en underinddeling af en region i mindre, homogene områder.

Regional variation. Variation af nedbørsvariable fra én lokalitet til en anden. Sommetider kaldes denne type variation også *geografisk variation*.

Regnkurve. Kurve, der for en given gentagelsesperiode viser sammenhængen mellem den maksimale middelintensitet pr. hændelse som funktion af den betragtede varighed. Kaldes på engelsk *IDF*-kurver.

Regnrække. En tabel, der viser tal afbildet i en *regnkurve*.

Repræsentative historiske regnserier. Regnserie fra en lokalitet, der har samme fysiografiske og klimatiske karakteristika som den betragtede, og som svarer godt til den regionale model.

Residual modelusikkerhed. Den del af den regionale variation, der ikke kan forklares af en regional model.

Stikprøveusikkerhed. Usikkerhed ved estimation af f.eks. T -års hændelser pga. en begrænset stikprøve (et begrænset antal observationsår) samt ved

opbygning af en regional model på baggrund af et begrænset antal stationer.

Syntetiske regnserier. Genererede regnserier med de samme statistiske egenskaber og samme format som historiske regnserier.

T -års hændelse. Størrelsen af en nedbørsvariabel, der i gennemsnit overskrides én gang i løbet af T år. T -års hændelser kan estimeres vha. en statistisk ekstremværdimodel som f.eks. PDS-modellen.

Bilag A Supplerende materiale

I tilknytning til dette skrift fra Spildevandskomitéen gøres nedenstående materiale frit tilgængeligt via Internettet-hjemmesider hos hhv. Danmarks Meteorologiske Institut (www.dmi.dk), Ingeniørforeningen i Danmark (www.ida.dk) og Institut for Miljøteknologi, DTU (www.imt.dtu.dk).

- En teknisk baggrundsrapport (Madsen, 1998) samt et baggrundsnotat om syntetiske regnserier (Arnbjerg-Nielsen, 1999). Begge dokumenter er formateret i *pdf*-format, som kan læses med programmet *Adobe Acrobat Reader*, der er frit tilgængeligt.
- To regneark til estimation af T -års hændelser for nedbørsvariable og CDS-regn på baggrund af et valgt sikkerhedsniveau. Regnearkene er udarbejdet i Microsoft Excel under Office 97-pakken. Desuden dokumentation og brugervejledning til de to regneark i *pdf*-format.
- En elektronisk database med de 41 historiske regnserier, der har indgået i databearbejdningen.
- En samling eksempler på brug af skriftet inkl. regneark og data nævnt ovenfor samt til belysning af specielle tilfælde, hvor der ikke gives præcise anbefalinger i skriftet.

Det er tanken, at eksempel samlingen skal suppleres løbende, efterhånden som erfaringer med de nye koncepter opsamles. Det samlede materiale forventes i øvrigt at udvikle sig løbende, hvorfor de præcise download-adresser ikke anføres hér.

Bilag B Stationer tilknyttet DMI's net af automatiske regnmålere

Stationer mærket med * er ejet af Danmarks Meteorologiske Institut, mens de resterende stationer er ejet af Spildevandskomitéen. Stationer med mere end 10 års observationer (i alt 41 stationer) er markeret med **skravering**.

Nedbrud [dage] angiver den samlede tid, hvor måleren har været ude af drift, og korr. t [år] er den korrigerede observationsperiode, beregnet som driftsperiode minus perioder uden målinger.

Station nr.	Navn	Bredde-grad	Længde-grad	Startdato	Slutdato	Nedbrud [dage]	Korr. t [år]
20061	Hjørring	572600	100100	19790101	19821130	78,6	3,70
20097	Frederikshavn Materialgård	572700	103000	19900419	19970101	3,0	6,70
20099	Frederikshavn Renseanlæg	572600	103200	19900424	19970101	173,5	6,22
20211	Sulsted	571000	95800	19790101	19970101	870,7	15,62
20304	Ålborg Pumpestation	570300	95700	19900228	19970101	18,8	6,79
20461	Svenstrup	565800	95200	19790108	19900315	239,1	10,53
21364*	Flyvestation Karup	561800	90700	19931209	19970101	11,8	3,03
22123	Grenå Ådalen	562500	105400	19961116	19970101	0,0	0,13
22191*	Flyvestation Tirstrup	561800	103700	19931102	19970101	3,4	3,16
22321	Lystrup/Egå Renseanlæg	561300	101500	19890905	19970101	272,1	6,58
22361	Viby J. Renseanlæg	560800	100900	19790101	19970101	715,4	16,04
22421	Silkeborg Vandværk	561000	93400	19790101	19970101	330,6	17,10
22554	Trankær Renseanlæg	560500	100800	19890905	19970101	23,0	7,26
23127	Horsens Renseanlæg	555100	95100	19820820	19970101	174,6	13,89
23241*	Flyvestation Vandel	554200	91200	19940209	19970101	5,5	2,88
23261	Vejle Renseanlæg	554200	93300	19790101	19970101	1774,7	13,14
23294	Fredericia Centralrenseanlæg	553300	94300	19941123	19970101	1,5	2,10
23321	Kolding Renseanlæg	552900	92900	19790101	19970101	254,5	17,30
23345*	Vamdrup Flyveplads	552600	92000	19910610	19970101	9,4	5,54
24292	Herning Renseanlæg	560900	85700	19790101	19970101	698,6	16,09
24341*	Hvide Sande	560000	80800	19930901	19970101	4,6	3,32
25101*	Blåvandshuk Fyr	554300	80500	19910913	19950331	0,7	3,54
25171	Esbjerg Renseanlæg V	552900	82600	19790104	19970101	870,1	15,61

Station nr.	Navn	Bredde- grad	Længde- grad	Startdato	Slutdato	Nedbrud [dage]	Korr. t [år]
26091	Haderslev Renseanlæg	551500	93000	19790101	19970101	1064,7	15,09
26099*	Flyvestation Skrydstrup	551400	91600	19931007	19970101	0,7	3,23
26376	Tønder Renseanlæg	545500	85100	19940209	19970101	6,8	2,88
26481	Sønderborg Vandværk	545500	94800	19790101	19970101	413,5	16,87
27011*	Læsø SV	571600	105400	19900112	19960706	265,0	6,25
27021*	Anholt Havn	564300	113100	19900330	19950331	441,3	3,79
27031*	Hesslø	-	-	19910603	19970101	791,0	3,42
27119*	Endelave	554500	101800	19900706	19970101	407,7	5,38
28181	Bolbro Vandværk	552300	102000	19790101	19970101	992,7	15,28
28182	Dalum	552200	102200	19790119	19871027	553,8	7,25
28183	Ejby Mølle Renseværk	552400	102500	19790101	19891121	1250,0	7,47
28184	Odense NV Renseanlæg	552500	102200	19790101	19970101	967,4	15,35
28186	Odense Vandværk	552400	102200	19790101	19970101	900,5	15,54
28453	Egsmade Renseanlæg	550400	104100	19941004	19970101	12,3	2,21
29009*	Gniben	560100	111700	19900601	19970101	12,3	6,55
29041	Holbæk Renseanlæg	554300	114400	19790101	19970101	236,5	17,35
29291	Tuelsø Renseanlæg	552700	113400	19920301	19970101	3,2	4,83
29354	Slagelse Renseanlæg	552500	112100	19940823	19970101	27,9	2,28
29387	Korsør Renseanlæg	552000	111200	19961015	19970101	32,5	0,12
29429*	Omø Fyr	551000	110800	19900719	19970101	32,6	6,37
30031	Sydskystens Renseanlæg	560000	123400	19790123	19970101	187,9	17,43
30131	Frederikssund Renseanlæg	555000	120400	19920116	19970101	30,2	4,88
30168	Hillerød Renseanlæg	555700	121600	19910603	19970101	181,1	5,09
30189	Munkeris	555000	122500	19790601	19831004	14,1	4,30
30191	Dronninggård Renseanlæg	554800	122700	19790101	19970101	539,8	16,52
30201	Vedbæk Renseanlæg	555100	123400	19790101	19970101	340,0	17,07
30208	Ordруп Kirkegård	554600	123500	19911014	19970101	107,8	4,92
30211*	Svanemøllens Kaserne	554300	123400	19790920	19930416	1160,4	10,39
30217*	Jægersborg	554600	123200	19940208	19970101	5,2	2,88
30221	Virum	554700	123000	19790101	19970101	223,5	17,39
30222	Søborg Vandværk	554400	123100	19790101	19970101	428,1	16,83
30223	Askevænget	554800	122900	19790803	19830927	66,3	3,97
30224	Holte Vandværk	554800	122800	19790802	19831004	30,8	4,09
30243	Farum Pumpestation	554800	122200	19920824	19970101	0,2	4,36
30261*	Flyvestation Værløse	554600	122000	19940301	19970101	0,1	2,84
30309	Åvendingen	554200	122800	19950411	19970101	0,0	1,73

Station nr.	Navn	Bredde- grad	Længde- grad	Startdato	Slutdato	Nedbrud - [dage]	Korr. t [år]
30311	Emdrup	554300	123300	19790108	19941025	257,3	15,09
30312	Vølundsgade	554200	123300	19790124	19940113	322,1	14,09
30313	Kløvermarksvej	554000	123600	19790101	19970101	444,3	16,79
30314	Kongens Enghave	553900	123200	19790101	19970101	275,3	17,25
30315	Husum	554300	122800	19790116	19950309	547,9	14,64
30316	Måløv Renseanlæg	554600	121900	19790101	19970101	318,9	17,13
30317	Glostrup Vandværk	554000	122400	19790123	19970101	402,7	16,84
30318	Hvidovre Vandværk	553900	122800	19790101	19970101	264,9	17,28
30319	Hvidovre Pumpestation	553700	122900	19790101	19970101	246,3	17,33
30321	Rødovre Vandværk	554200	122800	19790101	19970101	280,9	17,23
30325	Bispebjerg Hospital	554300	123300	19950114	19970101	0,3	1,96
30326	Lygten	554200	123200	19941125	19970101	32,8	2,01
30348	Greisvej	553900	123800	19950411	19970101	0,0	1,73
30351	Tårnby Pumpestation 4	553800	123600	19790101	19970101	259,3	17,29
30352	Tårnby Pumpestation 10	553600	123500	19790223	19970101	248,8	17,18
30353	Tårnby Renseanlæg	553800	123900	19790110	19970101	1211,5	14,66
30381	Landbohøjskolen	554100	123200	19920508	19970101	0,6	4,65
30384	Brøndbyvester Vandværk	553800	122500	19900410	19970101	69,9	6,54
30386	Albertslund Materielgård	554000	122000	19931028	19970101	12,8	3,14
30388	Høje Tåstrup	554000	121600	19960115	19970101	3,3	0,97
30395	Ishøj Varmeværk	553600	122100	19921102	19970101	3,5	4,15
30411	Roskilde Renseanlæg	553900	120400	19790101	19970101	624,2	16,29
30451	Mosedede Renseanlæg	553400	121700	19790101	19970101	286,3	17,22
31031	St. Heddinge Vandværk	551900	122400	19790101	19911231	312,7	12,14
31151	Næstved Renseanlæg	551300	114500	19790101	19970101	239,2	17,35
31231	Vordingborg Renseanlæg	550000	115400	19790101	19911231	150,6	12,58
31401	Nakskov	545000	110900	19790101	19970101	256,1	17,30
31406*	Albuen	545000	105800	19911107	19970101	51,2	5,01
31511	Nykøbing F. Renseanlæg	544600	115300	19790101	19970101	437,3	16,80
31621*	Gedser Odde	543400	115800	19931111	19970101	0,7	3,14
32097	Rønne C	550600	144300	19891109	19970101	7,8	7,12

Bilag C Beregning af regionalt T -års estimat

Et regionalt estimat af T -års hændelsen beregnes af

$$\hat{z}_T = z_0 + \hat{\mu} \frac{1+\hat{\kappa}}{\hat{\kappa}} \left[1 - \left(\frac{1}{\hat{\lambda}T} \right)^{\hat{\kappa}} \right] \quad (\text{C.1})$$

I (C.1) angiver z_0 det benyttede afskæringsniveau til definition af overskridelsesserien. Det regionale estimat af det gennemsnitlige antal årlige overskridelser $\hat{\lambda}$ bestemmes af årsmiddelnedbøren ($\hat{AMN}$) det pågældende sted

$$\hat{\lambda} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \hat{AMN} \quad (\text{C.2})$$

hvor $\hat{\beta}_0$ og $\hat{\beta}_1$ er de fra regressionsanalysen estimerede regressionsparametre.

Den regionale model for middelloverskridelsen $\hat{\mu}$ baseres på følgende subregionale opdeling

$$\hat{\mu} = \begin{cases} \hat{\mu}_0 & , \text{Det øvrige Danmark} \\ \hat{\mu}_1 & , \text{København Øst} \\ \hat{\mu}_2 & , \text{København Vest} \end{cases} \quad (\text{C.3})$$

Det regionale estimat af formparameteren $\hat{\kappa}$ regnes konstant i hele landet for en given nedbørsvariabel. De i (C.1-3) indgående parametre for de 14 analyserede nedbørsvariable er angivet i Tabel C1-3. Prediktionsvariansen af T -års estimatet beregnes af

$$\text{Var}\{\hat{z}_T\} = \left(\frac{\partial z_T}{\partial \lambda} \right)^2 \text{Var}\{\hat{\lambda}\} + \left(\frac{\partial z_T}{\partial \mu} \right)^2 \text{Var}\{\hat{\mu}\} + \left(\frac{\partial z_T}{\partial \kappa} \right)^2 \text{Var}\{\hat{\kappa}\} \quad (\text{C.4})$$

hvor de partielt afledede af z_T , bestemt af (C.1), er givet ved

$$\begin{aligned} \frac{\partial z_T}{\partial \lambda} &= \mu(1+\kappa)T(\lambda T)^{-\kappa-1} \\ \frac{\partial z_T}{\partial \mu} &= \frac{1+\kappa}{\kappa} [1 - (\lambda T)^{-\kappa}] \\ \frac{\partial z_T}{\partial \kappa} &= \mu(1+\kappa) \left[\frac{1}{\kappa} (\lambda T)^{-\kappa} \ln(\lambda T) - \frac{1}{\kappa^2} [1 - (\lambda T)^{-\kappa}] \right] \end{aligned} \quad (\text{C.5})$$

Tabel C1. Afskæringsniveau for overskridelsesserierne samt regressionsparametre, varians og kovarians af regressionsparametrene og residualvariansen fra regression af det gennemsnitlige antal årlige overskridelser med årsmiddelnedbøren.

Variabel	z_0 [μm/s] [mm]	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$ [x 10 ⁻³]	$Var\{\hat{\beta}_0\}$	$Cov\{\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1\}$ [x 10 ⁻⁴]	$Var\{\hat{\beta}_1\}$ [x 10 ⁻⁶]	$\hat{\sigma}_\delta^2$
<i>i10m</i>	6,00	0,531	4,19	0,677	-9,95	1,55	0,120
<i>i30m</i>	3,20	0,0807	4,69	0,794	-11,7	1,83	0,181
<i>i60m</i>	2,10	0,428	4,15	0,799	-11,8	1,83	0,184
<i>i3h</i>	1,10	0,973	3,17	0,759	-11,2	1,74	0,172
<i>i6h</i>	0,730	-0,142	4,60	0,491	-6,88	1,08	0,0708
<i>i12h</i>	0,450	-1,40	6,11	0,404	-5,72	0,894	0,0428
<i>i24h</i>	0,260	-3,31	9,25	0,439	-6,16	0,964	0,0559
<i>i48h</i>	0,150	-4,19	11,2	0,533	-7,54	1,18	0,0753
<i>dpt</i>	17,2	-0,594	5,80	0,483	-6,71	1,05	0,0537
<i>dptn</i>	19,4	-2,43	8,30	0,522	-7,50	1,17	0,0704
<i>bv1</i>	17,0	-2,63	8,46	0,480	-6,85	1,07	0,0595
<i>bv2</i>	5,40	0,899	3,01	0,686	-10,2	1,59	0,142
<i>ov1</i>	15,0	-0,479	5,35	0,521	-7,33	1,15	0,0781
<i>ov2</i>	6,80	0,133	4,24	0,750	-11,2	1,74	0,169

Ved beregning af prediktionsvariansen indsættes de regionalt estimerede parametre i (C.5).

Prediktionsvariansen af det gennemsnitlige antal årlige overskridelser $Var\{\hat{\lambda}\}$ afhænger af årsmiddelnedbøren

$$Var\{\hat{\lambda}\} = Var\{\hat{\beta}_0\} + 2\check{A}MNCov\{\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1\} + \check{A}MN^2Var\{\hat{\beta}_1\} + \hat{\sigma}_\delta^2 \quad (C.6)$$

hvor $Var\{\hat{\beta}_0\}$, $Var\{\hat{\beta}_1\}$ og $Cov\{\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1\}$ er varians og kovarians af de estimerede regressionsparametre og $\hat{\sigma}_\delta^2$ er residualvariansen.

Prediktionsvariansen af middelloverskridelsen $Var\{\hat{\mu}\}$ afhænger af den sub-regionale opdeling

$$Var\{\hat{\mu}\} = \begin{cases} Var\{\hat{\mu}_0\} & , \text{Det øvrige Danmark} \\ Var\{\hat{\mu}_1\} & , \text{København Øst} \\ Var\{\hat{\mu}_2\} & , \text{København Vest} \end{cases} \quad (C.7)$$

Tabel C2. Regionalt estimat af middelloverskridelsen og tilhørende prediktionsvarians i de 3 subregioner.

Variabel	Det øvrige Danmark		København Øst		København Vest	
	$\hat{\mu}_0$	$Var\{\hat{\mu}_0\}$	$\hat{\mu}_1$	$Var\{\hat{\mu}_1\}$	$\hat{\mu}_2$	$Var\{\hat{\mu}_2\}$
<i>i10m</i>	3,33	$1,20 \cdot 10^{-2}$	3,33	$1,20 \cdot 10^{-2}$	3,33	$1,20 \cdot 10^{-2}$
<i>i30m</i>	1,61	$3,04 \cdot 10^{-3}$	1,61	$3,04 \cdot 10^{-3}$	1,61	$3,04 \cdot 10^{-3}$
<i>i60m</i>	0,948	$1,25 \cdot 10^{-3}$	0,948	$1,25 \cdot 10^{-3}$	0,948	$1,25 \cdot 10^{-3}$
<i>i3h</i>	0,432	$6,04 \cdot 10^{-4}$	0,432	$6,04 \cdot 10^{-4}$	0,517	$5,74 \cdot 10^{-3}$
<i>i6h</i>	0,257	$3,26 \cdot 10^{-4}$	0,257	$3,26 \cdot 10^{-4}$	0,340	$2,30 \cdot 10^{-3}$
<i>i12h</i>	0,162	$1,70 \cdot 10^{-4}$	0,162	$1,70 \cdot 10^{-4}$	0,234	$8,05 \cdot 10^{-4}$
<i>i24h</i>	0,0940	$7,60 \cdot 10^{-5}$	0,131	$4,73 \cdot 10^{-4}$	0,131	$4,73 \cdot 10^{-4}$
<i>i48h</i>	0,0581	$2,49 \cdot 10^{-5}$	0,0756	$1,61 \cdot 10^{-4}$	0,0756	$1,61 \cdot 10^{-4}$
<i>dpt</i>	7,14	0,420	9,33	2,83	9,33	2,83
<i>dpn</i>	7,03	0,249	9,95	2,35	9,95	2,35
<i>bv1</i>	8,99	0,882	13,7	5,73	13,7	5,73
<i>bv2</i>	4,46	$6,60 \cdot 10^{-2}$	4,46	$6,60 \cdot 10^{-2}$	4,46	$6,60 \cdot 10^{-2}$
<i>ov1</i>	6,53	0,328	8,94	2,34	8,94	2,34
<i>ov2</i>	4,91	$7,50 \cdot 10^{-2}$	4,91	$7,50 \cdot 10^{-2}$	4,91	$7,50 \cdot 10^{-2}$

Tabel C3. Regionalt estimat af formparameteren med tilhørende prediktionsvarians.

Variabel	Symbol	$\hat{\kappa}$	$Var\{\hat{\kappa}\}$
10 min. intensitet	<i>i10m</i>	-0,0620	$8,20 \cdot 10^{-4}$
30 min. intensitet	<i>i30m</i>	-0,165	$7,50 \cdot 10^{-4}$
60 min. intensitet	<i>i60m</i>	-0,134	$9,55 \cdot 10^{-4}$
3 timers intensitet	<i>i3h</i>	-0,0806	$1,56 \cdot 10^{-3}$
6 timers intensitet	<i>i6h</i>	-0,155	$1,82 \cdot 10^{-3}$
12 timers intensitet	<i>i12h</i>	-0,134	$2,45 \cdot 10^{-3}$
24 timers intensitet	<i>i24h</i>	-0,169	$2,30 \cdot 10^{-3}$
48 timers intensitet	<i>i48h</i>	-0,106	$1,20 \cdot 10^{-2}$
Regndybde	<i>dpt</i>	-0,162	$2,32 \cdot 10^{-3}$
Døggnedbør	<i>dpn</i>	-0,0769	$7,75 \cdot 10^{-3}$
Bassinvolumen, $a = 0,1 \mu\text{m/s}$	<i>bv1</i>	-0,127	$3,11 \cdot 10^{-3}$
Bassinvolumen, $a = 1,0 \mu\text{m/s}$	<i>bv2</i>	-0,192	$1,40 \cdot 10^{-2}$
Overløbsvolumen, $a = 0,1 \mu\text{m/s}$	<i>ov1</i>	-0,208	$1,94 \cdot 10^{-3}$
Overløbsvolumen, $a = 1,0 \mu\text{m/s}$	<i>ov2</i>	-0,138	$1,85 \cdot 10^{-2}$

Prediktionsvariansen af formparameteren $Var\{\hat{\kappa}\}$ regnes konstant i hele landet. De i (C.4-7) indgående størrelser for de 14 analyserede nedbørsvariable er angivet i Tabel C1-3.

Årsmiddelnedbøren og den subregionale placering af de 41 analyserede stationer er angivet i Tabel C4.

Tabel C4. Årsmiddelnedbør (ÅMN) og subregional placering (0: Det øvrige Danmark, 1: København Øst, 2: København Vest) af de 41 analyserede stationer.

Station	ÅMN	Region	Station	ÅMN	Region	Station	ÅMN	Region
	[mm]			[mm]			[mm]	
20211	655	0	29041	550	0	30318	620	2
20461	710	0	30031	620	0	30319	635	2
22361	660	0	30191	665	2	30321	645	2
22421	720	0	30201	675	0	30351	575	1
23127	695	0	30211	605	1	30352	575	1
23261	790	0	30221	640	2	30353	555	1
23321	765	0	30222	640	2	30411	580	0
24292	825	0	30311	610	1	30451	585	0
25171	775	0	30312	610	1	31031	545	0
26091	790	0	30313	595	1	31151	580	0
26481	670	0	30314	615	2	31231	595	0
28181	670	0	30315	655	2	31401	565	0
28184	650	0	30316	610	2	31511	600	0
28186	655	0	30317	640	2			

Bilag D Generering af CDS-regn

Konstruktion af CDS regn

CDS er en syntetisk dimensioneringsregn, der er baseret på maksimum middelintensiteter af regn for forskellige varigheder som beskrevet ved en regnkurve. Hyetografen er fastlagt ved, at den integrerede nedbørsmængde for en given varighed, t , målt ud fra tidspunktet hvor maksimum intensiteten optræder, er lig med regndybden af regnkurven svarende til varigheden t . Med andre ord, CDS regn indeholder for en valgt gentagelsesperiode information om maksimale middelintensiteter for et interval af varigheder og samler derved information fra en hel regnkurve i en enkelt dimensioneringsregn.

Til konstruktion af CDS regn benyttes følgende generelle parameterisering af regnkurven

$$i_m(t) = \alpha(t + \theta)^{-\nu} \quad (\text{D.1})$$

hvor $i_m(t)$ er middelintensiteten over varigheden t . Parameteren $\alpha > 0$ bestemmer det generelle niveau og afhænger af den betragtede gentagelsesperiode. Parameteren ν ($0 < \nu < 1$) angiver hældningen af regnkurven i et dobbelt logaritmisk plot ($\ln[i_m(t)] = \ln[\alpha] - \nu \ln[t + \theta]$). Parameteren $\theta \geq 0$ er en formparameter, der giver en krumning på regnkurven for små varigheder. Ofte ses en to-parameter udgave af (D.1) hvor $\theta = 0$, dvs. regnkurven er en ret linie i en dobbelt logaritmisk afbildning.

En kontinuert CDS regn kan udledes af (D.1) på følgende vis. Antages først at den maksimale intensitet optræder i starten af regnhændelsen, kan CDS regns intensitet $i(t)$ bestemmes ved differentiering af den akkumulerede nedbørsmængde $P(t) = t i_m(t)$ fra regnkurven, dvs.

$$i(t) = \frac{d}{dt}(t\alpha[t + \theta]^{-\nu}) = \alpha(t + \theta)^{-\nu-1}[(1 - \nu)t + \theta] \quad (\text{D.2})$$

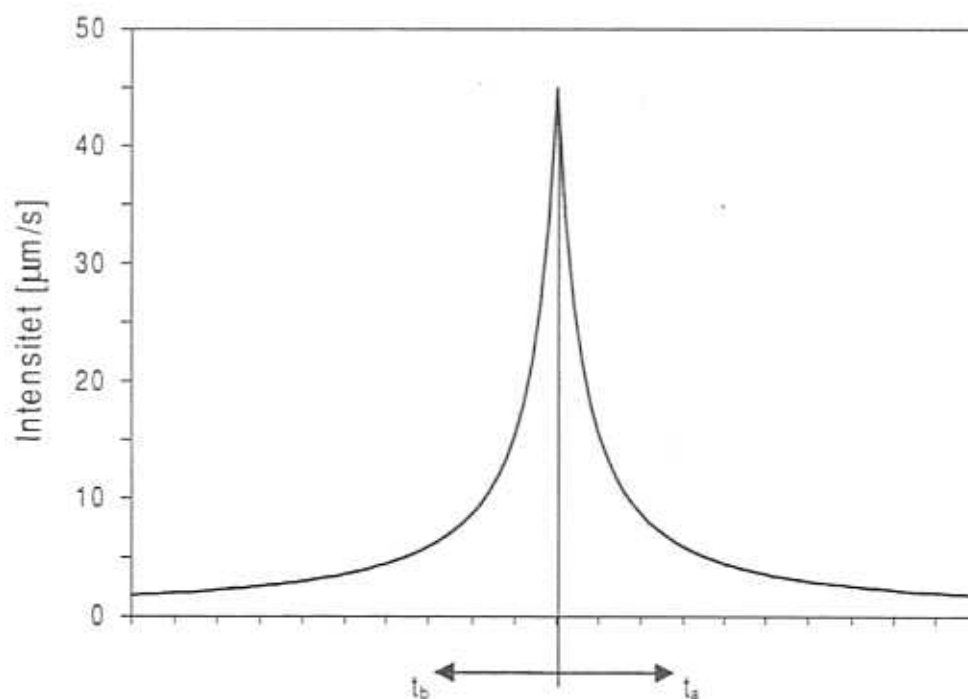
For konstruktion af en CDS regn, hvor den maksimale intensitet kan forekomme på et vilkårligt tidspunkt under regnhændelsen, introduceres parameteren r som forholdet mellem tiden fra regnhændelsens start indtil den maksimale intensitet forekommer, t_p , og den totale varighed af hændelsen, t_d :

$$r = \frac{t_p}{t_d} \quad (\text{D.3})$$

En CDS regn hvor den maksimale intensitet er i starten af regnhændelsen med efterfølgende faldende intensitet svarer til $r=0$ med intensitetsforløb givet ved (D.2). Tilsvarende svarer $r=1$ til en CDS regn, hvor intensiteten er støt stigende og topper til slut. For $r=1/2$ fås en CDS regn, der er symmetrisk omkring topintensiteten. Parameteren r benævnes i det følgende asymmetrikoefficienten.

Intensiteten for en CDS regn med vilkårlig asymmetrikoefficient $0 \leq r \leq 1$ kan udledes af (D.2). Til dette defineres en tidsakse med 0-punkt ved den maksimale intensitet. Tiden før intensitetstoppen t_b måles fra 0-punktet mod venstre, mens tiden efter intensitetstoppen t_a måles fra 0-punktet mod højre (se Figur D1). Idet $t_b = r t_a$, bestemmes intensitetsforløbet før intensitetstoppen ved substitution af $t = t_b/r$ i (D.2)

$$i(t_b) = \alpha \left(\frac{t_b}{r} + \theta \right)^{-v-1} \left[(1-v) \frac{t_b}{r} + \theta \right] \quad (\text{D.4})$$



Figur D1. Kontinuert CDS regn med asymmetrikoefficient $r=1/2$. t_b og t_a angiver tidsakser til bestemmelse af intensitetsforløbet henholdsvis før og efter intensitetstoppen ved brug af (D.4-5).

Idet $t_a = (1-r)t_d$, bestemmes på tilsvarende vis intensitetsforløbet efter intensitetstoppen ved substitution af $t = t_d/(1-r)$ i (D.2)

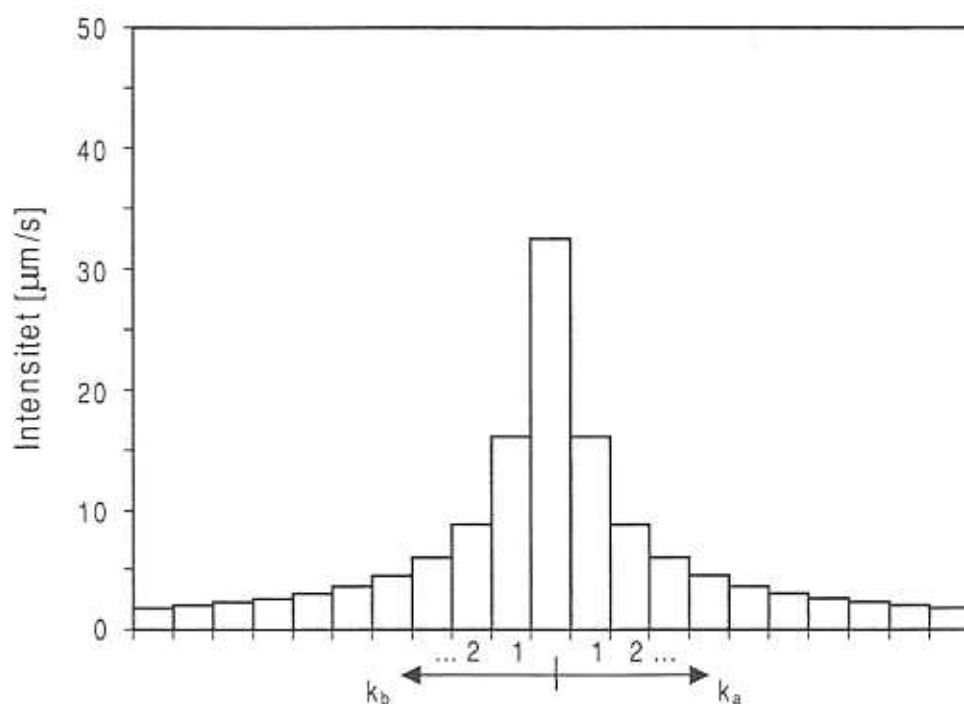
$$i(t_a) = \alpha \left(\frac{t_a}{1-r} + \theta \right)^{-v-1} \left[(1-v) \frac{t_a}{1-r} + \theta \right] \quad (\text{D.5})$$

Et eksempel på en kontinuert CDS regn bestemt ved (D.4-5) er vist i Figur D1.

Til brug i praksis, hvor CDS regn bruges som inddata til en hydrologisk model, benyttes en diskretiseret udgave af (D.4-5). Intensiteten ved intensitetstoppen fås direkte af (D.1)

$$i_0 = i_m(\Delta t) = \alpha(\Delta t + \theta)^{-v} \quad (\text{D.6})$$

hvor Δt er den benyttede tidsdiskretisering. Intensitetsforløbet for den diskretiserede CDS regn før og efter intensitetstoppen bestemmes ved successiv integration af (D.4-5) over tiden Δt . Intensiteten i tidsskridtet k_b før topintensiteten (k_b måles positiv mod venstre fra topintensiteten, se Figur D2) er givet ved



Figur D2. Diskret udgave af CDS regnen vist i Figur D1. k_b og k_a angiver antal tidsskridt henholdsvis før og efter intensitetstoppen til bestemmelse af intensitetsforløbet ved brug af (D.7-8).

$$i_{k_b} = \alpha \left[\left(\frac{r + k_b}{r} \Delta t + \theta \right)^{-v} (r + k_b) - \left(\frac{r + k_b - 1}{r} \Delta t + \theta \right)^{-v} (r + k_b - 1) \right] \quad (D.7)$$

Intensiteten i tidsskridtet k_a efter topintensiteten (k_a måles positiv mod højre fra topintensiteten, se Figur D2) er givet ved

$$i_{k_a} = \alpha \left[\left(\frac{1 - r + k_a}{1 - r} \Delta t + \theta \right)^{-v} (1 - r + k_a) - \left(\frac{k_a - r}{1 - r} \Delta t + \theta \right)^{-v} (k_a - r) \right] \quad (D.8)$$

En diskretiseret udgave af CDS regnen i Figur D1 er vist i Figur D2.

CDS regn bestemt ved brug af regionale regnkurver

Ved bestemmelse af CDS regn fastsættes dimensioneringskriterierne først, dvs. gentagelsesperioden, T , og det ønskede sikkerhedsniveau fastlagt ved frekvensfaktoren f , jvf. (D.9) nedenfor. Derefter benyttes følgende beregningsgang:

1. Et regionalt estimat af regnkurven og tilhørende usikkerhed bestemmes på den pågældende lokalitet ud fra årsmiddelnedbøren og den subregionale placering (*Danmark udenfor København, København Øst eller København Vest*). For hver af de betragtede varigheder 10, 30 og 60 min. samt 3, 6, 12, 24 og 48 timer beregnes den dimensionsgivende intensitet som

$$\hat{i}_{DIM} = \hat{i}_{REG,T} + f \hat{\sigma}_{PRED} \quad (D.9)$$

hvor $\hat{i}_{REG,T}$ er det regionale estimat af T -års intensiteten, $\hat{\sigma}_{PRED}$ er den estimerede prediktionsusikkerhed (standardafvigelse), og f er den valgte sikkerhedsfaktor.

2. Parametrene i regnkurven givet ved (D.1) bestemmes ud fra de regionale estimater for de betragtede varigheder ved regression. Til parameterisering af de regionale regnkurver er en to-parameter model hvor $\theta=0$ fundet tilstrækkelig. I dette tilfælde kan de to parametre α og v bestemmes ved simpel lineær regression.
3. CDS parametrene fastsættes, dvs. asymmetrikoefficienten r , tidsskridtet Δt og regnens varighed t_d .
4. CDS regnen bestemmes af (D.7-8).

Bilag E Klassificering af stationer

I de efterfølgende tre tabeller (Tabel E1-3) er de 41 stationer, der har indgået i den regionale analyse, klassificeret vha. målestørrelsen U defineret i lign. (6.2). Klassificeringen er foretaget for hver af følgende nedbørsklasser, der er karakteristiske for forskellige egenskaber ved regn af betydning for funktionen af afløbssystemer:

- (1) Intensiteter med små varigheder (op til 60 minutter) samt bassin- og overløbsvolumen med stort afløbstal ($1,0 \mu\text{m/s}$). Målestørrelsen beregnes som middelværdien af U for variablene $i10m$, $i30m$, $i60m$, $bv2$ og $ov2$.
- (2) Intensiteter med varigheder på 1-12 timer. Målestørrelsen beregnes som middelværdien af målestørrelserne for variablene $i60m$, $i3h$, $i6h$ og $i12h$.
- (3) Intensiteter med store varigheder (over 12 timer) og bassin- og overløbsvolumen med lille afløbstal ($0,1 \mu\text{m/s}$). Målestørrelsen beregnes som middelværdien af U for variablene $i12h$, $i24h$, $i48h$, $bv1$ og $ov1$.

Stationerne er listet som funktion af årsmiddelnedbør, og for hver station er målestørrelsen U angivet for hhv. små ($1 < T < 5$), middel ($5 < T < 20$) og store ($20 < T < 100$) gentagelsesperioder, samt for gennemsnittet af gentagelsesperioder.

Skravering angiver stationer der ligger over 97,5% fraktilen ($U > 2$), hhv. under 2,5% fraktilen ($U < -2$).

Tabel E1. U-værdier til klassificering af stationer for nedbørsklasse (1).

ÅMN [mm]	Station	Region	1<T<5	5<T<20	20<T<100	Middel
545	31031	0	-1,1	-0,5	0,5	-0,3
550	29041	0	-1,3	-0,4	0,9	-0,3
555	30353	1	-1,8	-2,2	-2,3	-2,1
565	31401	0	1,2	1,6	1,8	1,6
575	30351	1	-0,5	-0,7	-0,8	-0,7
575	30352	1	-2,1	-2,5	-2,4	-2,3
580	30411	0	0,2	0,6	1,1	0,6
580	31151	0	1,8	0,5	-0,3	0,7
585	30451	0	-0,9	-1,5	-1,8	-1,4
595	30313	1	-0,2	0,5	1,1	0,5
595	31231	0	-1,7	-1,8	-1,3	-1,6
600	31511	0	2,5	2,3	2,0	2,3
605	30211	1	-0,3	-1,0	-1,2	-0,9
610	30311	1	-0,2	-0,7	-0,9	-0,6
610	30312	1	-0,6	-1,6	-2,0	-1,4
610	30316	2	-0,6	-0,6	-0,5	-0,5
615	30314	2	1,4	1,0	0,6	1,0
620	30031	0	-1,0	-1,1	-1,2	-1,1
620	30318	2	3,2	2,7	2,0	2,6
635	30319	2	1,5	1,3	1,0	1,3
640	30221	2	0,0	0,7	1,3	0,7
640	30222	2	-1,5	-1,5	-1,6	-1,5
640	30317	2	-0,3	-0,5	-0,6	-0,5
645	30321	2	1,5	1,7	1,7	1,6
650	28184	0	-0,7	-0,6	-0,5	-0,6
655	20211	0	0,8	4,1	7,9	4,3
655	28186	0	0,6	0,0	-0,5	0,0
655	30315	2	3,6	3,0	2,4	3,0
660	22361	0	0,1	-1,1	-1,7	-0,9
665	30191	2	-2,6	-0,7	1,3	-0,7
670	26481	0	-0,4	-0,8	-0,8	-0,7
670	28181	0	-1,0	-0,6	0,0	-0,5
675	30201	0	-2,2	-2,9	-2,9	-2,6
695	23127	0	-0,7	-1,1	-1,2	-1,0
710	20461	0	-0,6	-0,9	-1,0	-0,8
720	22421	0	-2,6	-1,8	-1,2	-1,9
765	23321	0	-1,1	-1,3	-1,2	-1,2
775	25171	0	-0,5	-0,7	-0,6	-0,6
790	23261	0	2,6	3,9	4,9	3,8
790	26091	0	0,1	0,0	0,0	0,0
825	24292	0	0,2	2,5	4,3	2,4

Tabel E2. U-værdier til klassificering af stationer for nedbørsklasse (2).

ÅMN [mm]	Station	Region	1<T<5	5<T<20	20<T<100	Middel
545	31031	0	1,2	1,8	2,2	1,7
550	29041	0	-0,5	-0,4	-0,7	-0,5
555	30353	1	-1,7	-1,9	-2,1	-1,9
565	31401	0	0,2	0,9	1,8	1,0
575	30351	1	0,2	0,7	1,2	0,7
575	30352	1	-1,2	-0,9	-0,7	-0,9
580	30411	0	0,5	0,1	-0,2	0,1
580	31151	0	1,6	0,2	-0,7	0,4
585	30451	0	1,5	0,9	0,1	0,8
595	30313	1	0,3	1,5	2,5	1,4
595	31231	0	-0,5	-0,2	0,3	-0,2
600	31511	0	1,1	0,2	-0,3	0,3
605	30211	1	0,5	0,5	0,6	0,5
610	30311	1	1,1	0,9	0,8	0,9
610	30312	1	-0,7	-1,2	-1,3	-1,0
610	30316	2	-0,6	-0,4	-0,3	-0,4
615	30314	2	0,9	0,4	0,1	0,5
620	30031	0	-0,8	-0,3	0,2	-0,3
620	30318	2	1,3	0,8	0,6	0,9
635	30319	2	0,2	0,5	0,7	0,5
640	30221	2	0,2	0,1	0,1	0,1
640	30222	2	-1,3	-1,2	-1,1	-1,2
640	30317	2	-0,4	-0,2	0,0	-0,2
645	30321	2	0,5	0,5	0,4	0,5
650	28184	0	-2,0	-2,0	-1,6	-1,8
655	20211	0	0,6	2,4	4,2	2,4
655	28186	0	-0,2	0,1	0,3	0,0
655	30315	2	2,1	2,3	2,6	2,3
660	22361	0	1,1	0,0	-0,7	0,1
665	30191	2	-1,8	-0,1	1,8	0,0
670	26481	0	-0,9	-1,1	-0,9	-1,0
670	28181	0	-0,6	-0,9	-0,8	-0,8
675	30201	0	-0,6	-0,8	-0,6	-0,7
695	23127	0	-0,6	-1,6	-2,0	-1,4
710	20461	0	-1,2	-0,5	0,2	-0,5
720	22421	0	-1,5	-1,8	-1,9	-1,8
765	23321	0	-0,8	-1,0	-0,9	-0,9
775	25171	0	-0,6	-0,8	-0,9	-0,8
790	23261	0	0,3	0,3	0,7	0,4
790	26091	0	0,0	0,1	0,3	0,1
825	24292	0	-0,1	1,0	2,2	1,0

Tabel E3. U-værdier til klassificering af stationer for nedbørsklasse (3).

ÅMN [mm]	Station	Region	1<T<5	5<T<20	20<T<100	Middel
545	31031	0	2,3	2,9	3,0	2,7
550	29041	0	0,6	1,2	1,2	1,0
555	30353	1	-1,4	-1,1	-0,9	-1,2
565	31401	0	0,0	1,2	2,6	1,3
575	30351	1	-0,1	0,3	0,7	0,3
575	30352	1	-0,8	-0,3	0,0	-0,4
580	30411	0	1,2	1,3	1,2	1,2
580	31151	0	2,2	1,4	0,8	1,5
585	30451	0	2,9	2,9	2,3	2,7
595	30313	1	0,1	0,7	1,0	0,6
595	31231	0	-0,4	0,7	1,5	0,6
600	31511	0	1,4	0,9	0,9	1,1
605	30211	1	0,3	1,0	1,9	1,0
610	30311	1	1,0	0,8	0,6	0,8
610	30312	1	-0,9	-0,7	-0,4	-0,7
610	30316	2	-0,5	0,0	0,2	-0,1
615	30314	2	0,6	0,4	0,5	0,5
620	30031	0	-0,2	-0,3	-0,4	-0,3
620	30318	2	0,8	0,7	0,7	0,8
635	30319	2	0,1	0,6	0,9	0,6
640	30221	2	-0,1	0,2	0,7	0,3
640	30222	2	-1,2	-0,7	-0,3	-0,7
640	30317	2	-0,2	0,3	0,6	0,2
645	30321	2	0,2	0,6	0,9	0,6
650	28184	0	-1,8	-1,4	-1,1	-1,5
655	20211	0	-0,4	0,8	2,0	0,8
655	28186	0	0,0	0,5	0,9	0,5
655	30315	2	1,3	1,8	2,5	1,9
660	22361	0	1,2	-0,3	-1,1	-0,1
665	30191	2	-1,3	-0,1	0,9	-0,2
670	26481	0	-0,8	-1,4	-1,6	-1,3
670	28181	0	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4
675	30201	0	0,2	0,5	0,7	0,5
695	23127	0	-0,9	-1,7	-1,9	-1,5
710	20461	0	-1,1	-0,1	0,8	-0,1
720	22421	0	-1,1	-1,0	-1,0	-1,0
765	23321	0	-1,1	-1,1	-0,7	-1,0
775	25171	0	-0,7	-1,3	-1,6	-1,2
790	23261	0	0,3	-0,7	-1,1	-0,5
790	26091	0	0,0	-0,2	-0,3	-0,2
825	24292	0	0,1	-0,2	-0,3	-0,2