

Skrift nr. 32

Regional variation af ekstremregn i Danmark (1979-2019) inkl. korrektion for klimaændringer

2023

IDA Spildevandskomiteen

Regional variation af ekstremregn i Danmark (1979-2019) inkl. korrektion for klimaændringer –
Spildevandskomiteen, Skrift nr. 32

© IDA Spildevandskomiteen 2023

Forfattere: Karsten Arnbjerg-Nielsen, Ida Bülow Gregersen, Henrik Madsen og Hjalte Jomo Danielsen
Sørup

Indholdsfortegnelse

Indholdsfortegnelse	3
Rekommandation.....	5
Forord.....	7
1 Indledning	8
1.1 Baggrund	8
1.2 Formål	8
2 Nedbørsdata	9
2.1 Tilgængelige nedbørsdata.....	9
2.2 Analyse af variationer over tid.....	9
2.3 Udvalgelse af nedbørsdata til den regionale model.....	10
3 Opdateret regional model for ekstremregn	13
3.1 Struktur af modellen	13
3.2 Analyserede variable.....	14
3.3 Overskridelsesniveauer.....	15
3.4 Verifikation af antagelser omkring spatial korrelation	16
3.5 Opdateret interpolation af forklarende variable	17
4 Opdaterede regionale estimater for ekstremregn	19
4.1 Regionale estimater	19
4.2 Sammenligning med tidligere skrifter.....	19
5 Model for historiske og forventede fremtidige klimaforandringer	23
5.1 Brug af klimafaktorer til justering af resultater fra den regionale model	23
5.2 Brug af SVKs Regnserieværktøj til sammenligning af historiske regnserier mod den regionale model	26
6 Sammenfatning.....	27
7 Referencer.....	29
Bilag A Anvendte SVK-stationer til bestemmelse af den regionale model.....	32
Bilag B Opdaterede værktøjer fra Spildevandskomiteen	34
B.1 Spildevandskomiteens Regionale Regnrækkeværktøj v2023	34
B.2 Spildevandskomiteens Regnserieværktøj v2023	34
B.3 LAR-regnearket v2023.....	35

Rekommandation

Der er i perioden 2020 – 2023 udført en bearbejdning af regndata fra Spildevandskomiteens regnmålersystem baseret på de samme principper for regionalisering, som er anvendt siden Skrift nr. 26 "Regional variation af ekstremregn i Danmark". Formålet er, som hidtil, at skabe det bedst mulige bud på dimensionsgivende regnintensiteter i "nutidens klima" og at beskrive de stikprøve- og modelusikkerheder, der er uundgåelige i tilknytning til at udarbejde en regional model.

Der pågår løbende en udvikling i viden om ekstremregn. Derfor er den aktuelle bearbejdning baseret på opdaterede principper for anvendelse af data. Det skyldes ikke mindst den variation i forekomsten af ekstreme regn over tid, der blev beskrevet i Skrift nr. 30. I Skrift nr. 30 konstateres det, at særligt antallet af ekstreme regn har været stigende i hele måleperioden fra 1979 til 2012. Som forudsagt, i samme skrift, er stigningen i perioden efter 2012 ophørt og erstattet af et fald i antallet af ekstremhændelser per år på landsplan. Overordnet set understøtter det hypotesen om, at ekstremregn udviser en cyklisk variation med en varighed på ca. 30-40 år, der ligger oven i den generelle stigning i observerede ekstremintensiteter. Hvis hypotesen holder, svarer den nuværende samlede observationslængde af de længste serier til en fuld cyklus, der dermed giver et godt bud på "nuværende, gennemsnitligt klima" for perioden 1979 - 2019. Den regionale model for ekstremregn er derfor baseret på en bearbejdning, der estimerer de gennemsnitlige ekstreme intensiteter for denne periode.

Der er endvidere lavet en række analyser af hidtidige antagelser i Skrift nr. 26, Skrift nr. 28 og Skrift nr. 30. Det har medført metodiske justeringer i bearbejdningerne og resultaterne er indarbejdet i anbefalingerne i forbindelse med nærværende skrift. For brugerne af skriftet er den mest tydelige ændring nok, at man nu kan beregne regnrækker for gentagelsesperioder ned til 0,1 år, idet der er udarbejdet regionale estimater for denne gentagelsesperiode. For gentagelsesperioder mellem 0,1 og 0,33 år beregnes regnrækken ved interpolation mellem de to gentagelsesperioder, mens den regionale regnrække anvendes direkte for højere gentagelsesperioder. Modellen er dog også blevet opdateret og justeret på en lang række andre områder. Særligt er kravet til observationsperioden for regnserier, der indgår i modellen, blevet hævet fra 10 til 25 år for dels at mindske stikprøveusikkerheden på de anvendte data, dels at mindske bias fra en overrepræsentation af data fra bestemte dele af den ovenfor nævnte cyklus; det gennemsnitlige antal hændelser per år er mindsket, så modellen fokuserer mere på de ekstreme hændelser; og endelig er regionaliseringen ændret, så den i højere grad fokuserer på forhold inden for de nærmeste 15 km fra den angivne lokalitet.

På dette grundlag rekommanderes følgende:

- De principper og metoder, som er beskrevet i Skrift nr. 26, Skrift nr. 28 og Skrift nr. 30, er fortsat gældende bortset fra nedenstående ændringer og præciseringer.
- Den nye regionale model for ekstremregn benyttes til dimensionering og analyse af simple afløbssystemer under regn og erstatter dermed modellen fra Skrift nr. 30. Der er udviklet et regneark til at beregne de konkrete intensiteter på baggrund af regnrækker.
- Den nye regionale model for ekstremregn benyttes til dimensionering og analyse af simple bassiner under regn og erstatter dermed modellen fra Skrift nr. 30. Der er udviklet et regneark til at beregne de konkrete volumener på baggrund af de nye regionale regnrækker.
- Den nye regionale model angiver det gennemsnitlige klima for perioden 1979 – 2019. Der er i denne periode dels en cyklisk variation og dels en generel stigning i forekomsten af ekstremregn.

Disse to tidsmæssige variationer er ikke eksplicit modelleret. Ved anvendelse af modellen anbefales det ved dimensionering at indarbejde forventede klimaændringer fra periodens tidsmæssige midtpunkt, dvs. år 2000.

- Der er i skriftet angivet et forslag til, hvordan man kan udregne klimafaktorer for forskellige fremskrivningshorisonter og gentagelsesperioder. Det gøres derved mere tydeligt, at klimafaktoren afhænger af fremskrivningshorisonten, og at udgangspunktet ikke er udgivelsesåret for skriftet, men midtpunktet af den historiske måleperiode, år 2000. Ved anvendelse af dette forslag vil en regnrække for gentagelsesperioden 10 år for året 2023 beregningsmæssigt have en intensitet, der er 7% højere end det, som den regionale model angiver. Ved fremskrivning til år 2100 anvendes de klimafaktorer, der er anbefalet i tidligere skrifter.

Der er som tidligere udviklet og opdateret hjælpeværktøjer, der kan bruges i forbindelse med udarbejdelse af regionale regnrækker, CDS-regn, og simpel bassindimensionering. Der er endvidere udviklet et hjælpeværktøj, SVKs Regnserieværktøj, til at beregne, hvor store afvigelser der er mellem en given regnserie og den nye regionale model for typiske varigheder og gentagelsesperioder. Afvigelserne er beregnet ved hjælp af samme principper, som er angivet i tidligere skrifter og anvendes på samme måde som anbefalet i Skrift 30. Der hersker stadig stor usikkerhed om, hvordan man laver den bedste udvælgelse og korrektion af en regnserie.

Forord

Dette skrift er en opfølgning på Spildevandskomiteens Skrift nr. 26 fra 1999, Skrift nr. 28 fra 2006, Skrift nr. 29 fra 2008 og Skrift nr. 30 fra 2014. Der indføres ikke grundlæggende nye principper, men en række antagelser efterprøves, og den regionale model for ekstremregn fra Skrift nr. 30 er opdateret ved brug af den nyeste data og viden på området.

Skriftet er udarbejdet af:

- Karsten Arnbjerg-Nielsen, DTU Sustain
- Ida Bülow Gregersen, Rambøll
- Henrik Madsen, DHI
- Hjalte Jomo Danielsen Sørup, DTU Sustain

Med hjælp til udarbejdelse af figurer fra:

- Sara Virén Popp-Madsen, Rambøll

Skriftet er udarbejdet som en del af det VUDP-støttede forsknings- og innovationsprojekt VÆRDI, som ud over forfatterne har haft deltagelse af:

- Ane Loft Møllerup, Novafos
- Toke Sloth Illeris, HOFOR
- Andreas Lindvold Bøndergaard, KLAR Forsyning
- Søren Liedtke Thorndahl, AAU
- Christoffer Bang Andersen, AAU
- Dan Rosbjerg, HYDROconsult
- Birgit Paludan, Birgit Paludan
- Jens Jørgen Linde, Krüger
- Alex Torpenholt Jørgensen, Krüger
- Jørn Torp Pedersen, WSP

Ud over det økonomiske bidrag fra VUDP har Aarhus Vand, VandCenterSyd og HOFOR også bidraget økonomisk til projektet, ligesom resultater fra Emma D. Thomassens KlimaAtlas-finansierede PhD-projekt er brugt.

Nærværende skrift, herunder centrale antagelser og resultater, har været diskuteret i flere omgange i såvel projektgruppen som Spildevandskomiteens Faglige Udvalg.

1 Indledning

1.1 Baggrund

Spildevandskomiteens Skrift nr. 2 (Spildevandskomiteen, 1950) og Skrift nr. 6 (Spildevandskomiteen, 1953) udgjorde starten på systematisk brug af regndata til dimensionering af afløbssystemer i Danmark og blev senere efterfulgt af Skrift nr. 16 (Spildevandskomiteen, 1974), hvori den første nationale model for regnrækker blev udarbejdet. Det blev antaget, at regnmålinger fra Gentofte, Odense, Århus, Ålborg, Esbjerg og Vejle var uafhængige og dermed kunne de indgå i en samlet model for ekstremregn, ved at blive lagt i forlængelse af hinanden.

I forbindelse med udarbejdelsen af Skrift nr. 26 (Spildevandskomiteen, 1999) blev der udviklet en regional model for ekstremregn i Danmark baseret på statistisk bearbejdning af ekstremregnsdata fra Spildevandskomiteens regnmålersystem. Metoden bag den regionale model har været genanvendt i senere bearbejdnings, men både måden til at beskrive den regionale variation og de forklarende regionale variable har ændret sig flere gange, ligesom selve datagrundlaget er blevet større for hver ny bearbejdning.

Klimaforandrings forventede indflydelse på ekstremregn blev første gang omtalt og inddraget i dimensioneringspraksis i Skrift nr. 27 (Spildevandskomiteen, 2005), men uden en konkret vurdering af, hvor store ændringerne måtte forventes at være. Det fulgte i Skrift nr. 29 (Spildevandskomiteen, 2008), baseret på en analyse af resultater fra simuleringer med klimamodeller, og anbefalingerne herfra er siden bekræftet, dog med mindre justeringer i Skrift nr. 30.

I årene siden Skrift nr. 30 er mængden af data fra Spildevandskomiteens regnmålersystem steget betragteligt. Herudover har udviklingen på klimamodelområdet resulteret i nye datasæt i væsentlig højere rumlig og tidlig opløsning. Samtidig var det i Skrift nr. 30 vanskeligt at angive fremtidens klimaændringer i forhold til ekstremregn på grund af en tidsmæssig variation, der bestod af både en cyklisk variation og en generel stigning. I den nye bearbejdning er det derfor eksplicit undersøgt, om resultaterne fra de nye måleår kan be- eller afkræfte de hypoteser, som dannede baggrund for anbefalingen i Skrift nr. 30.

1.2 Formål

Formålet med dette skrift er at opdatere de gældende danske anbefalinger vedrørende beskrivelse af ekstremregn til brug for dimensionering af afløbssystemer. Til det formål fokuseres på tre overordnede spørgsmål:

- 1) Med det nu opdaterede datasæt fra Spildevandskomiteens regnmålersystem, samt yderligere datakilder, hvilke data giver da den bedste beskrivelse af "nutidens"-klima i den regionale model for ekstremregn?
- 2) Baseret på disse data, hvordan ændrer estimaterne for ekstremregn i Danmark sig i den nye regionale model?
- 3) Giver nye klimamodeldata anledning til, at anbefalingerne vedrørende inddragelse af klimaforandringer skal opdateres?

Derudover har der i det tilknyttede projekt været diskuteret og testet en række hidtidige antagelser bag den regionale model. Det har i nogle tilfælde ført til en række præciseringer af anvendelsen af modellen samt en bedre forståelse af ekstremregn i Danmark. Denne større forståelse er dokumenteret dels i nærværende skrift og dels i den tekniske baggrundsrapport (Gegersen et al., 2023a).

2 Nedbørsdata

2.1 Tilgængelige nedbørsdata

Ved nærværende opdatering af den regionale bearbejdning er der brugt en række forskellige datakilder. Fra Skrift nr. 30 er genbrugt følgende data:

- Spildevandskomiteens regnmålersystem: data fra 83 stationer med mere end 10 års observationsperiode.
- DMIs Hellman-målere: kun måleren i København er brugt i denne bearbejdning.
- DMIs Kimagrid Danmark: samme datasæt som i Skrift nr. 30 er brugt.

For beskrivelse af disse datasæt henvises til Skrift nr. 30 og referencerne heri.

Af nye datasæt, som ikke tidligere er brugt i forbindelse med Spildevandskomiteens skrifter, er brugt:

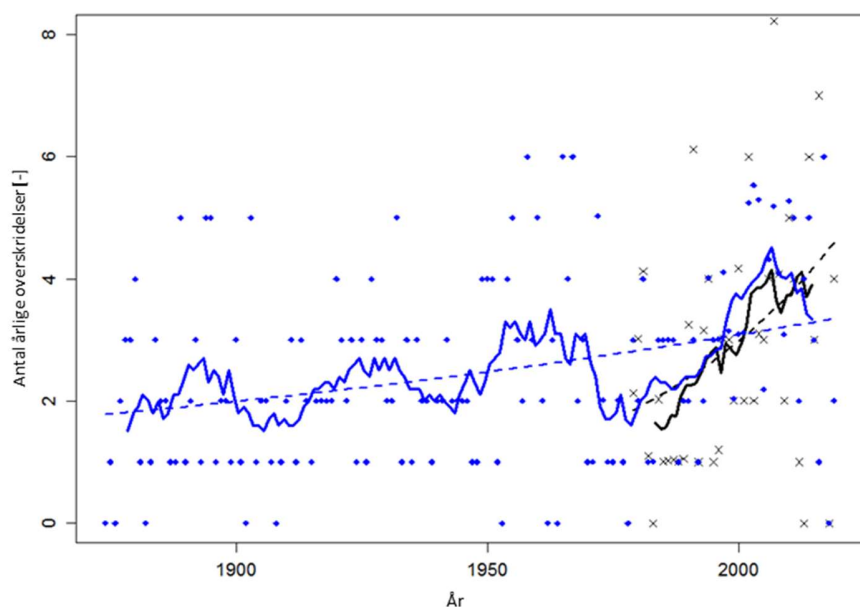
- Spildevandskomiteens regnmålersystem: Data fra alle stationer er opdateret med målinger fra perioden 2013-2019 (begge år inklusive). Det har resulteret i 132 stationer med mere end 10 års observationsperiode, hvoraf der er 50 stationer med mere end 25 års observationsperiode.
- Et regndatasæt for årene 2005-2018 baseret på en bearbejdning af data fra DMIs radar på Stevns. Datasættet er et pseudo-CAPPI produkt svarende til nedbøren i 1 km højde (ud til ca. 70 km) med en spatial opløsning på 500x500 m² og en tidsopløsning på 10 min. Data er interpoleret til 1 min tidsopløsning som beskrevet i Nielsen et al. (2014), og der er foretaget bias-justering som beskrevet i Thorndahl et al. (2014).
- Klimamodeldata fra to nye højtopløselige klimamodeller fra det fællesnordiske NorCP-samarbejde (Lind et al., 2020). Begge modeller er re-analyseprodukter beregnet med Harmonie Climate modellen (Belušić, et al., 2020). Forskellen på de to produkter er, at det ene er et "klassisk" klimamodelprodukt i 12x12 km² spatial opløsning med konvektion parametriseret, hvorimod det andet produkt er fra en såkaldt "convective permitting model", hvor den spatiale opløsning er højere (3x3 km²), og hvor dyb konvektion ikke er parametriseret (Lind et al., 2020). De to modeller fungerer fysisk meget forskelligt, hvilket giver mulighed for at evaluere, om de højere opløste modeller performer bedre på skalaer relevant i urban hydrologi. Den tidlige opløsning på datasættene er hhv. 1 time og 15 min, hvor den højtopløselige har den bedste tidlige opløsning.

For yderligere beskrivelse af de nye datasæt og deres brug henvises til Thomassen et al. (2022) og de ovenfor citerede referencer.

2.2 Analyse af variationer over tid

Analyser af den historiske variation af ekstremregn gennem perioden 1874-2019 viser, at den kraftige stigning i antallet af ekstreme hændelser, der er observeret fra 1979-2010 i Skrift nr. 30, nu er aftagende (se Figur 1). Baseret på både de historiske data og forventede klimaforandringer må det forventes, at faldet i ekstremregn er sket på trods af en fortsat stigning i det generelle niveau af ekstremregn. På figuren er modellen baseret på perioden 1974 - 2012 udvidet med data frem til 2019. Det fremgår, at det glidende gennemsnit baseret på de seneste års observationer nu er nede på det niveau, der må vurderes som forventeligt uden den observerede cyklus, men inklusive den generelle stigning over tid. Dette understøtter, at den naturlige variation i form af en cyklus, som historisk set har fundet sted parallelt med en generel stigning, stadig må vurderes at være en væsentlig del af klimasystemet. Perioden for mønsteret

blev i Gregersen et al. (2014) bestemt til 30-40 år med en vis usikkerhed, da analysen kun er baseret på fem regnserier i Danmark og én i Sydsverige. Regionale analyser af udviklingen over tid, for SVK netværket som helhed, baseret på den marginale model beskrevet i Gregersen et al., (2017) viser, at tendensen ikke kun gør sig gældende for København (Gregersen et al., 2014). Det har ikke været muligt at identificere årsagerne til denne cyklus og dermed er den vanskelig at bruge til fremskrivninger af ekstremregn. Det har betydning for valg af data som indgår i den regionale af model, hvilket vil blive diskuteret i næste afsnit.



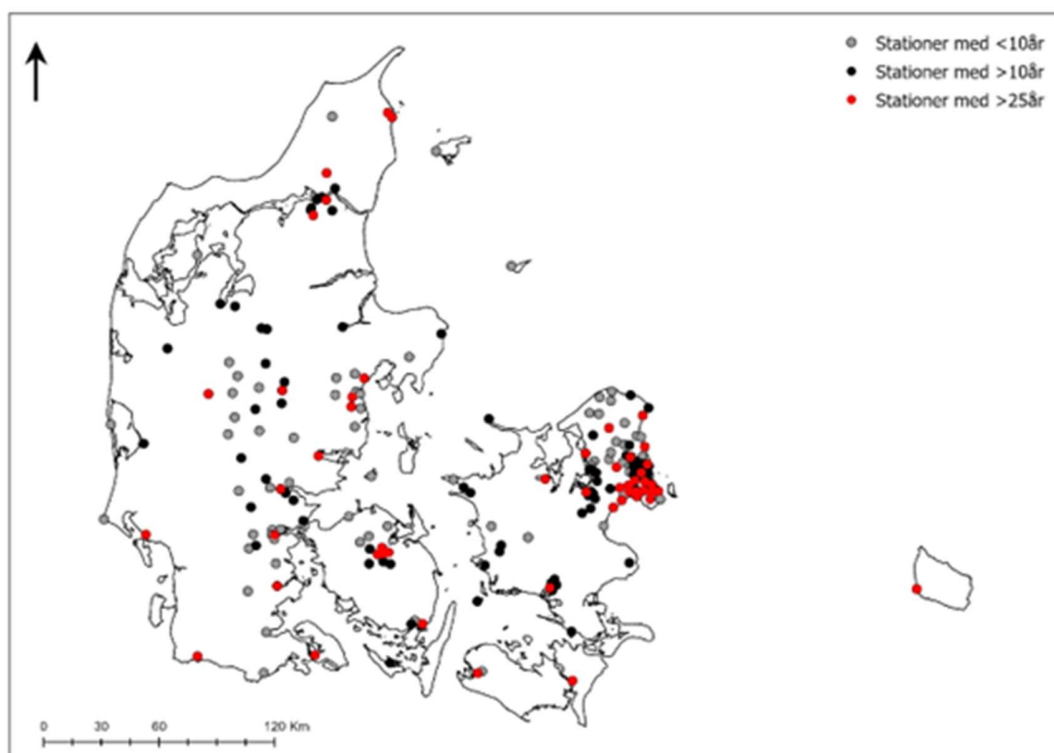
Figur 1: Antal ekstreme hændelser af døggnedbør siden 1874 for Hellmann-måleren i København (blå) samt ekstrem døggnedbør for SVK-måleren 5694 i Søborg (sort). Punkterne angiver det observerede antal hændelser hvert år, de stiplede linjer angiver modellerede gennemsnitlige antal hændelser som funktion af tid for hver af de to serier, mens de fuldt optrukne kurver angiver et glidende gennemsnit af antal hændelserne over de sidste 5 år.

2.3 Udvalgelse af nedbørsdata til den regionale model

Den anvendte regionale model antager, at de statistiske egenskaber ved de målte ekstremregn er konstante over tid. I forbindelse med udarbejdelsen af Skrift nr. 26 blev betydningen af sæsonmæssige variationer undersøgt, og konklusionen var, at det var ønskeligt at have hele år repræsenteret, så man undgik en skæv repræsentation af sæsoner med høje hhv. lave forekomster af ekstremere. Det var bl.a. på den baggrund, at kravet til måleserier om minimum 10 observationsår blev fastlagt. I forbindelse med udarbejdelse af Skrift 30 blev det erkendt, at der er en væsentlig variation over tid med en lav frekvens som diskuteret i det foregående afsnit. Ligesom med sæsonvariationen er det væsentligt, at modellen i videst muligt omfang repræsenterer en hel cyklus, så modellen har et repræsentativt billede af variationerne over tid. Det er bevidst fravalgt at modellere selve svingningen, fordi årsagerne til svingningen er ukendte, og det dermed ikke er muligt, med rimelig sikkerhed, at forudsige et mønster i den fremtidige svingning.

Data til den regionale model er derefter udvalgt, så de bedst muligt repræsenterer såvel den geografiske som den tidsmæssige variation i data. Tætheden af målere varierer kraftigt over Danmark, hvor de større

byer for nuværende stadig er overrepræsenterede i forhold til landområderne. På Figur 2 er alle regnmålere vist, og det er indikeret, om måleperioden er over 25 år, over 10 år eller under 10 år. Et skift fra 10 til 25 års længde på regnserierne vil udelukke mange stationer, og nogle regioner vil have langt mellem de målere, der indgår i analysen. Det ændrer dog ikke væsentligt på, hvor godt den regionale model repræsenterer Danmark, fordi de tilbageværende regnserier stadig dækker samme spænd hen over de to forklarende variable, der benyttes til at beskrive den regionale variation, og regressionskurverne ændrer sig heller ikke væsentligt. Af hensyn til fremtidige bearbejdnings er det fortsat vigtigt, at såvel de lange som de korte regnserier fortsættes, da det vil forbedre datagrundlaget både i forhold til bestemmelse af den tidsmæssige som den geografiske variation.



Figur 2 Oversigtskort over placeringen af SVK-stationer opdelt efter observationslængde. Kun stationer med mere end 25 års observationslængde indgår i analyserne i denne bearbejdnings.

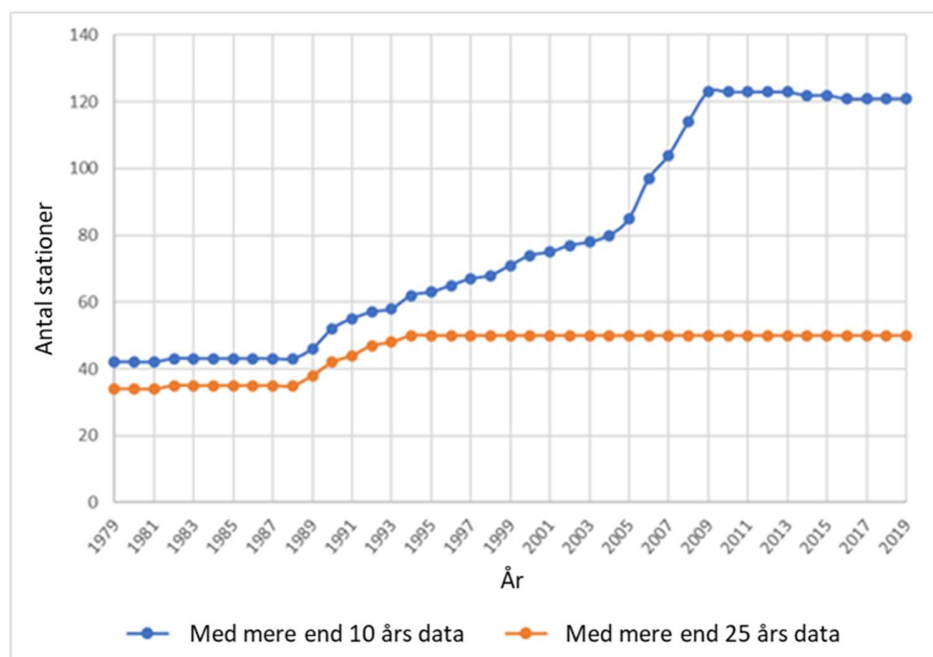
Regnmålerne med observationsperioder mellem 10 og 25 år er hovedsageligt installeret i perioden 1995 - 2005, hvilket fremgår af Figur 3. Disse målestationer har kun målt i den del af cyklus, der har de højeste forekomster af ekstremregn. At medtage disse data i analysen vil give en bias¹ i forhold til gennemsnittet over perioden. Det ideelle ville være kun at medtage serier, der har målt i hele cyklus, hvorved bias ville være elimineret. Det vil dog give for få data og især for få lokaliteter. Derfor er der sat en grænse på 25

¹ En bias er her den forskel, der er mellem det sande (men i sagens natur ukendte) gennemsnit af ekstremregns egenskaber i perioden 1979 – 2019 og den værdi, som modellen beregner.

års observationsperiode som et kompromis mellem at have tilstrækkeligt mange serier og mindske den bias, der opstår fra, at ikke alle serierne nødvendigvis har målt en hel cyklus hver især.

I denne bearbejdning er der derfor taget udgangspunkt i de 50 regnserier fra Spildevandskomiteens regnmålersystem, der har en minimumslængde på 25 år, se Bilag A. Dette giver et samlet datasæt på 1763 stationsår. Den regionale model beregnet ud fra det valgte datagrundlag er dermed repræsentativ for det gennemsnitlige klima for perioden 1979-2019. Som skitseret på Figur 1 er der forventeligt en udvikling af ekstremregns egenskaber i denne periode, og derfor anses modellens værdier for at være repræsentative for periodens tidsmæssige midtpunkt, dvs. år 2000.

Videns- og datagrundlaget, som ligger til grund for analysen, udvikler sig løbende, og i den næste opdatering af den regionale bearbejdning forventes dermed et bedre grundlag for at vurdere, hvad kombinationen af hhv. cyklus og trend betyder for de data, der vælges som repræsentative for "nutidens klima". Skærpelsen af kravet til observationsperiode sænker også stikprøveusikkerheden væsentligt, altså den usikkerhed der er på bestemmelse af modellens parametre for hver enkelt regnserie og dermed beregning af især ekstreme for høje gentagelsesperioder.



Figur 3 Antallet af stationsår per år ved et krav om minimums observationsperiode på hhv. 10 og 25 år. Ved valg af et krav om 10 års måleperiode vil der dermed f.eks. indgå 120 stationer fra år 2019 i den regionale model, men kun 41 stationer fra år 1979. Kravet om minimum 25 års måleperiode giver dermed et mere ensartet datamateriale for hele måleperioden end et krav om 10 års måleperiode, hvor en meget stor del af datamaterialet vil være fra de seneste ca. 15 år.

3 Opdateret regional model for ekstremregn

3.1 Struktur af modellen

Den regionale modellering har grundlæggende ikke ændret sig siden Skrift nr. 26 og er udførligt beskrevet i Madsen (1998) og Madsen og Arnbjerg-Nielsen (2006). Denne model er baseret på målte ekstreme med hyppigheder under ca. $n = 3$ pr. år. Som supplement til denne model er der i den nye bearbejdning medtaget enkeltværdier i tidsserierne svarende til $n = 10$ pr. år, og der er tilpasset en regional model til disse data. Det betyder, at de beregnede regionale regnrækker fremkommer på tre forskellige måder, afhængigt af gentagelsesperioden:

- For hændelser med en hyppighed under $n = 3$ pr. år fungerer modellen som beskrevet i Skrift nr. 30, men med de opdateringer, som er beskrevet i de følgende afsnit.
- For hændelser $n = 10$ pr. år er der udarbejdet en ny selvstændig regional model. Modellen for disse værdier er estimeret på samme måde som parametrene i den regionale model for de ekstreme regnintensiteter.
- I intervallet mellem $n = 3$ pr. år og $n = 10$ pr. år interpoleres der mellem de to regionale modeller således, at der opnås en glidende overgang fra den ene til den anden når der arbejdes med hyppigheder i det pågældende spænd.

Modellen antager at ekstremregnen har samme statistiske egenskaber over tid og tager dermed ikke højde for den generelle stigning i antallet af hændelser over årene endside den væsentlige cykliske variation. Den cykliske variation er indarbejdet via udvælgelsen af data som beskrevet i afsnit 2.3. Derved er bestemt det bedste bud på det gennemsnitlige klima i perioden 1979 – 2019. Denne periode er lang, og det kan i praksis ikke forventes, at der ikke er sket en generel stigning i intensiteterne i løbet af perioden. Derfor anbefales det, at man ved anvendelse af modellen korrigerer for denne generelle stigning i form af en klimafaktor, som derfor beregnes fra år 2000, det tidsmæssige midtpunkt i perioden 1979-2019. Størrelsen af denne klimafaktor er vanskelig at skønne præcist. Baseret på bearbejdningen i Gregersen et al. (2014) og tilsvarende bearbejdninger i bl.a. Belgien er det vurderet, at den underliggende stigning er tæt på de ændringer, som forventes at ske som følge af klimaændringer.

I forbindelse med opstilling af modellen blev det undersøgt, hvorvidt det var en fordel at inddrage længere varigheder ved estimeringen af den regionale regnrække, konkret ved at medtage varigheden på 7 dage. Ved analyse af resultaterne blev det fundet, at den regionale regnrække passede dårligere til data for typiske varigheder på 0,5 - 6 timer, såfremt varigheden på 7 dage indgik i bestemmelsen af regnrækken. Derfor er værdier for 7-dages varighed af rapporteret, men indgår ikke i beregningen af den regionale regnrække. Ud fra samme princip er det besluttet, ikke at inddrage resultaterne for varigheden 1 minut ved beregning af den regionale regnrække. Samlet set har analysen bekræftet tidligere resultater i henhold til hvilke varigheder, der bør indgå ved opstilling og beregning af en regnrække.

Der er foretaget en større analyse af metoden til beregning af bassin-voluminer. Metoden har hidtil kun været verificeret for gentagelsesperioder på 1 og 5 år og for afløbstal på 0,1 og 1,0 $\mu\text{m/s}$ og kun på regnserier frem til 2008. Det generelle ønske om at kunne dimensionere bassiner for meget små afløbstal har medført, at der er udarbejdet en supplerende analyse for afløbstallet 0,05 $\mu\text{m/s}$, ligesom der er udført

en række supplerende undersøgelser på det aktuelle datamateriale. Disse analyser er offentliggjort i et selvstændigt notat (Gregersen et al., 2023b).

Fundamentet i den regionale model er ligesom i alle de forudgående modeller (Skrift nr. 26, Skrift nr. 28 og Skrift nr. 30) etableringen af regressioner mellem parametrene i de lokale statistiske fordelinger af ekstremhændelser for de analyserede variable og to forskellige forklarende regionale variable, der tilsammen beskriver en del af variationen i ekstrem regn over Danmark.

3.2 Analyserede variable

Overordnet set analyseres de samme variable som i tidligere skrifter, men nogle få nye tilføjes for at udbrede gyldighedsområdet for modellen og nogle få udgår, da de ikke anvendes i praksis. De analyserede variable kan opdeles i to typer:

- 1) Maksimumintensiteter af individuelle nedbørshændelse for forskellige varigheder.
- 2) Minimum volumen som ikke medfører overløb som funktion af gentagelsesperiode udregnet i en kontinuert reservoirmodel for et givet fast afløbstal. I tidligere bearbejdnings benævnt Maksimal bassinvoluminer.

For en entydig matematisk definition af ovenstående henvises til Madsen (1998). Se Tabel 1 for et overblik over analyserede variable.

Tabel 1 Oversigt over analyserede variable samt variable analyseret i tidligere rapporter (Spildevandskomiteen, 1999; 2006; 2014) som er udeladt i denne bearbejdning.

Variabel	Enhed	Note
1 min varighed	µm/s	<i>Udgår i denne bearbejdning</i>
2 min varighed	µm/s	
5 min varighed	µm/s	
10 min varighed	µm/s	
30 min varighed	µm/s	
60 min varighed	µm/s	
3 timers varighed	µm/s	
6 timers varighed	µm/s	
12 timers varighed	µm/s	
24 timers varighed	µm/s	
2 døgns varighed	µm/s	
7 døgns varighed	µm/s	Ny i denne bearbejdning*
Regndybde (dybde per hændelse)	mm	<i>Udgår i denne bearbejdning</i>
Døgnedbør (dybde per døgn)	mm	<i>Udgår i denne bearbejdning</i>
Bassinvolumen, a = 0,05 µm/s	mm	Ny i denne bearbejdning
Bassinvolumen, a = 0,1 µm/s	mm	
Bassinvolumen, a = 1,0 µm/s	mm	
Overløbsvolumen, a = 0,1 µm/s	mm	<i>Udgår i denne bearbejdning</i>
Overløbsvolumen, a = 1,0 µm/s	mm	<i>Udgår i denne bearbejdning</i>

**indgår ikke i udregningen af regnrækken*

I tidligere bearbejdnings har den længste varighed været sat til 2 døgn. I praksis er der problemstillinger, hvor længere varigheder er relevante. Maksimumintensiteter med 7 døgns varighed er derfor tilføjet, så den regionale models gyldighedsområde kan verificeres i området mellem 2 og 7 døgn, hvor praksis hidtil

har været en simpel ekstrapolation af regnrækken. Der anvendes en hændelsesdefinition, hvor tørvejrslængden mellem individuelle hændelser er mindst lige så lang som den varighed, der betragtes (3 timer for 3 timers hændelser, 12 timer for 12 timers hændelser osv.) (Madsen, 1998). Dette er dog ikke muligt for variable under 1 time grundet dataformatet (Madsen, 1998) og er heller ikke muligt, når varigheden af regnhændelserne er 7 døgn, da et krav om 7 døgns adskillelse mellem individuelle hændelser ville resultere i ekstremt få hændelser om året, samtidig med, at det ikke meteorologisk er meningsfyldt. Derfor bruges for 7 døgns hændelserne en minimumsadskillelse på 2 døgn, svarende til en antagelse om, at dette repræsenterer individuelle vejrssystemer.

Der tilføjes en bassinvolumenberegning for et afløbstal, der er lavere end dem, der blev behandlet i tidligere bearbejdnings. Argumenterne er de samme som for 7 døgns varighed: I praksis bliver modellen brugt for lavere afløbstal end dem, der var regnet for, og denne nye variabel skal hjælpe med at verificere den regionale models gyldighedsområde i spændet mellem $a = 0,05 \mu\text{m/s}$ og $0,1 \mu\text{m/s}$.

3.3 Overskridelsesniveauer

Som konsekvens af den cyklus, der er afbilledet på Figur 1, er der observeret flere og flere ekstremer for hver opdatering af den regionale model, se Tabel 2. Dette udfordrer en central præmis for den regionale model, da den grundlæggende overskridelsesmodel, beskrevet i Madsen (1998), bygger på en antagelse om, at der i gennemsnit inkluderes 3 hændelser pr. år. På den baggrund justeres afskæringsniveauerne (se Tabel 3) i denne bearbejdnings, så der igen inkluderes ca. 3 hændelser om året for alle analyserede variable (se Tabel 2).

Tabel 2: Det gennemsnitlige årlige antal hændelser i de forskellige regionale modeller, beregnet som et gennemsnit over alle observationsår og alle stationer.

	Skrift nr. 26	Skrift nr. 28	Skrift nr. 30	Denne bearbejdning	Enhed
2 min varighed	-	3,80	4,31	3,38	[år ⁻¹]
5 min varighed	-	3,65	4,18	3,19	[år ⁻¹]
10 min varighed	3,22	4,03	4,63	3,01	[år ⁻¹]
30 min varighed	3,11	3,79	4,29	3,03	[år ⁻¹]
60 min varighed	3,13	3,70	4,12	3,01	[år ⁻¹]
3 timers varighed	3,02	3,44	3,69	3,01	[år ⁻¹]
6 timers varighed	2,83	3,10	3,35	3,02	[år ⁻¹]
12 timers varighed	2,53	2,76	3,09	3,05	[år ⁻¹]
24 timers varighed	2,65	2,98	3,25	3,01	[år ⁻¹]
2 dages varighed	3,04	3,34	3,52	2,98	[år ⁻¹]
7 dages varighed	-	-	-	3,01	[år ⁻¹]
Bassinvolumen $a = 0,05 \mu\text{m/s}$	-	-	-	3,01	[år ⁻¹]
Bassinvolumen $a = 0,1 \mu\text{m/s}$	2,82	3,11	3,31	3,00	[år ⁻¹]
Bassinvolumen $a = 1 \mu\text{m/s}$	2,85	3,33	3,75	3,02	[år ⁻¹]

Tabel 3: Afskæringsniveauet i den nye regionale model sammenlignet med de tidligere modeller. Afskæringsniveauet definerer, hvilke hændelser, der medtages i den regionale model.

	Skrift nr. 26-30	Denne bearbejdning	Enhed
2 min varighed	12,8	14,9	[$\mu\text{m/s}$]
5 min varighed	9,0	10,6	[$\mu\text{m/s}$]
10 min varighed	6,0	7,34	[$\mu\text{m/s}$]
30 min varighed	3,2	3,74	[$\mu\text{m/s}$]
60 min varighed	2,1	2,39	[$\mu\text{m/s}$]
3 timers varighed	1,1	1,19	[$\mu\text{m/s}$]
6 timers varighed	0,73	0,753	[$\mu\text{m/s}$]
12 timers varighed	0,45	0,453	[$\mu\text{m/s}$]
24 timers varighed	0,26	0,267	[$\mu\text{m/s}$]
2 dages varighed	0,15	0,16	[$\mu\text{m/s}$]
7 dages varighed	-	0,0668	[$\mu\text{m/s}$]
Bassinvolumen a = 0,05 $\mu\text{m/s}$	-	22,0	[mm]
Bassinvolumen a = 0,1 $\mu\text{m/s}$	17,00	17,80	[mm]
Bassinvolumen a = 1 $\mu\text{m/s}$	5,40	6,26	[mm]

3.4 Verifikation af antagelser omkring spatial korrelation

Den spatiale korrelation mellem regnmålere er i denne regionale model beskrevet på samme måde som i tidligere versioner (Madsen og Arnbjerg-Nielsen, 2006). Korrelationslængderne beskriver sandsynligheden for at måle den samme ekstremregn på to eller flere stationer, der fysisk er placeret tæt på hinanden. Det er væsentligt at korrigere for dette i den regionale model, da områder med stor regnmåletæthed ellers vil blive tildelt for stor vægt i den regionale model.

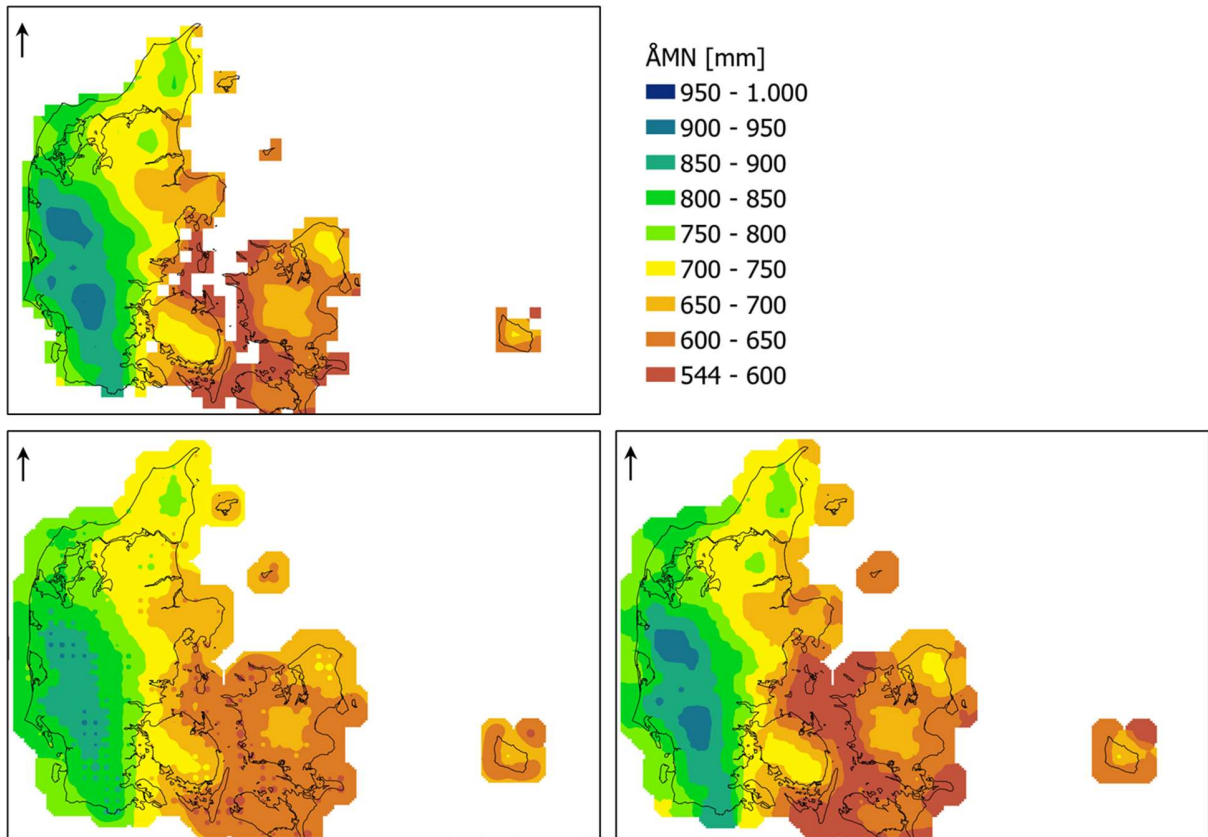
I denne bearbejdning er metoden til estimering af den spatiale korrelation blevet anvendt på en række datasæt for at validere den hidtil anvendte metode, der i de tidligere skrifter kun er blevet beregnet baseret på SVK regnmålere. I Thomassen et al. (2022) sammenlignes de spatiale egenskaber af ekstremhændelser målt på SVKs regnmålere med målte radardata og data fra højopløste klimamodeller. Hovedkonklusionen af dette arbejde er, at der er fin overensstemmelse mellem de spatiale korrelationer beregnet ud fra data fra SVK regnmålerne og radardata fra DMIs Stevnsradar, hvilket understøtter, at den hidtidige metode er egnet til at beskrive korrelationerne. Tabel 4 viser resultat af sammenligningen, hvor der er brugt data fra samme region og samme måleperiode. I forhold til usikkerheden er overensstemmelsen mellem de beregnede værdier rigtig god.

Tabel 4 Korrelationslængder (e-folding distancer) beregnet for en række varigheder for data fra Spildevandskomiteens regnmålersystem og radardata fra DMIs Stevnsradar for to udpluk med fuldt tidsligt og stedligt overlap. En eksponentialfunktion er tilpasset til data for at beskrive korrelationerne og udregne e-folding afstanden, svarende til den afstand, hvor korrelationen er mindre end $1/e$. Baseret på Thomassen et al. (2022).

Varighed	Spildevandskomiteens regnmålersystem	DMIs Stevnsradar	Enhed
15 min	2	4	[km]
30 min	4	5	[km]
60 min	7	8	[km]
180 min	12	12	[km]
360 min	19	20	[km]
720 min	23	28	[km]
1440 min	34	29	[km]
2880 min	46	32	[km]

3.5 Opdateret interpolation af forklarende variable

I Skrift nr. 30 blev der anvendt to forklarende variable til at beskrive den regionale variation: årsmiddelnedbøren og den ekstreme døgnedbør. Værdien for en given lokalitet er baseret på data fra Klimagrid Danmark (Scharling, 2012). Dette datasæt har en opløsning på $10 \times 10 \text{ km}^2$. Imellem gridpunkterne blev værdierne interpoleret ved hjælp af en metode, der anvendte den reciproke kvadrat af afstanden som vægt, men som inkluderede gridpunkter fra hele Danmark i beregningen. I denne version bruges fortsat det reciproke kvadrat af afstanden som vægt, men søgeradius begrænses, så kun gridpunkter inden for en afstand af 15 km fra punktet inkluderes i vægtningen. Figur 4 illustrerer betydningen af denne ændring. Det fremgår af figuren, at den tidligere fremgangsmåde visse steder i landet indførte en u hensigtsmæssig bestemmelse af værdien af de forklarende variable. Bortset fra denne ændring i beregningen af værdierne af de to variable for en given lokalitet anvendes de forklarende variable på samme måde som i Skift nr. 30.



Figur 4 Årsmiddelnedbøren estimeret på baggrund af Klimagrid Danmarks 10x10 km² grid (øverst), estimeret baseret på interpolationen i Skrift nr. 30 (nederst til venstre), og estimeret ved hjælp af den nye reducerede søgeradius (nederst til højre). På de to nederste delfigurer er der anvendt et grid på 2x2 km.

4 Opdaterede regionale estimater for ekstremregn

Alle resultater i dette afsnit repræsenterer det gennemsnitlige klima i måleperioden 1979-2019, som det har været tilfældet i tidligere bearbejdnings. Den regionale model repræsenterer dermed en klimanormal med en tidsmæssig udstrækning på 40 år med midtpunkt i år 2000. I afsnit 5 angives en metode til fremskrivning af estimaterne fra år 2000 til f.eks. år 2023 eller senere.

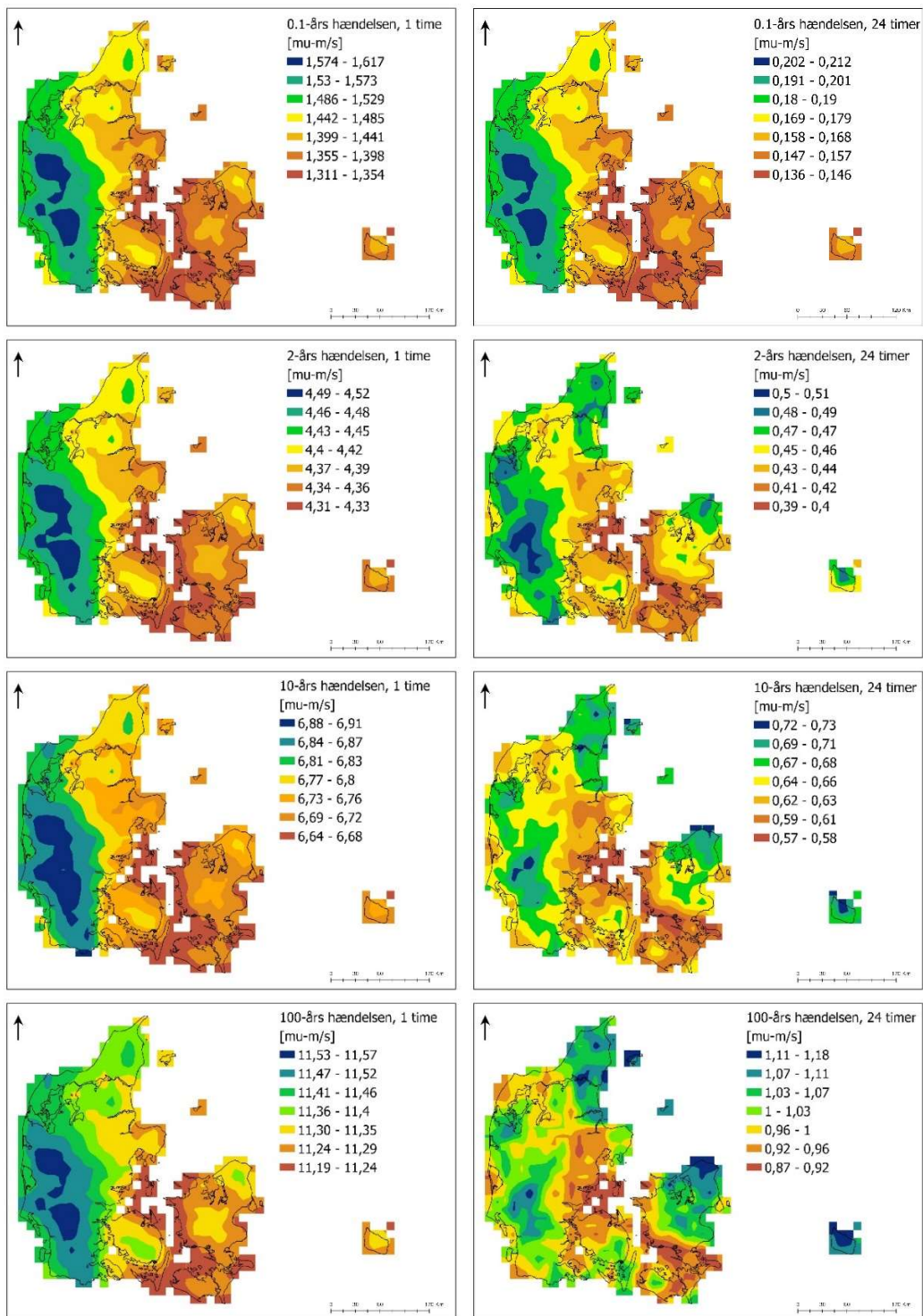
4.1 Regionale estimater

Figur 5 viser intensiteterne for 0,1-, 2-, 10- og 100-års hændelserne for 1 og 24 times varighed beregnet med den nye regionale model.

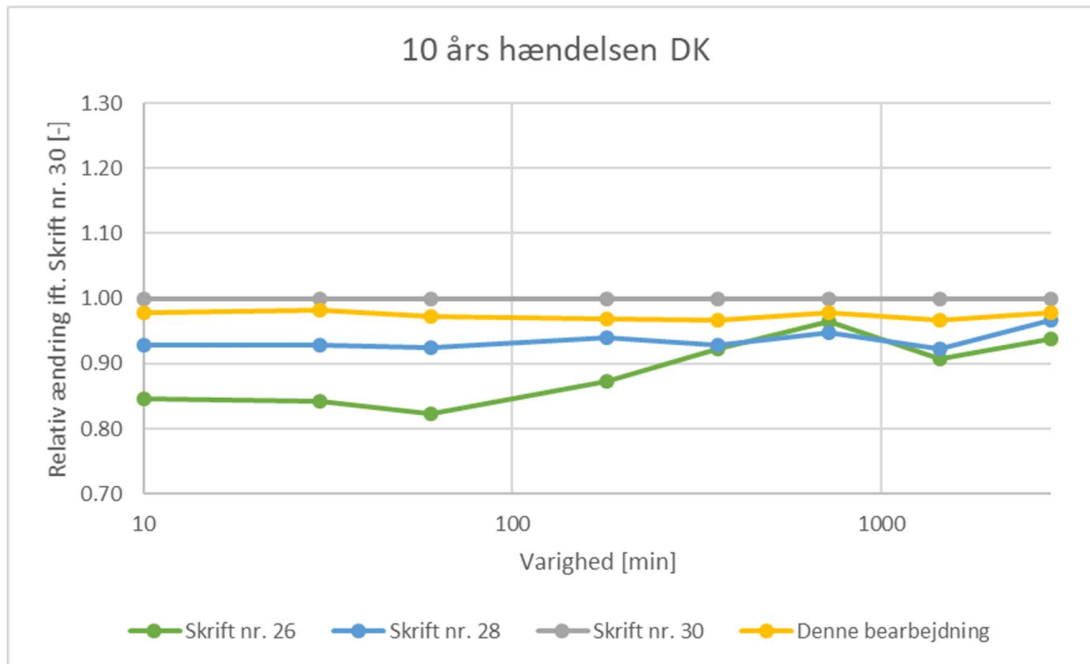
4.2 Sammenligning med tidligere skrifter

Den opdaterede regionale model giver i gennemsnit lidt lavere dimensionsgivende intensiteter end i Skrift nr. 30, som til gengæld var højere end i både Skrift nr. 26 og Skrift nr. 28, se Figur 6. Der er dog regionale forskelle, således at nogle lokaliteter i Danmark vil opleve en mindre stigning, andre et fald i forhold til Skrift nr. 30, se Figur 7.

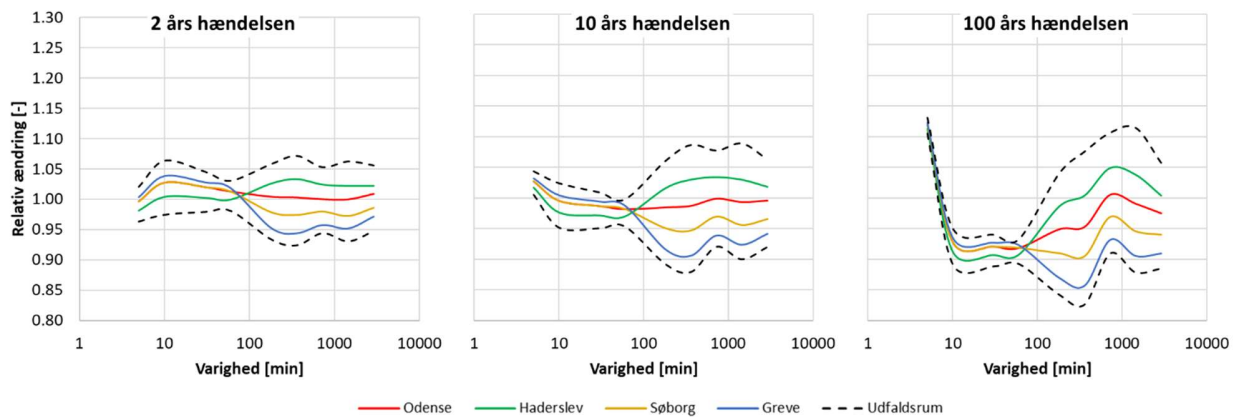
Sammenlignet med Skrift nr. 30 ændres estimaterne i den regionale model kun lidt, se Figur 6 og Figur 7, men udelukkelsen af regnsrækker kortere end 25 år og ændringen af afskæringsniveauerne har den tydelige effekt, at estimaterne bliver mere robuste, resulterende i et mere snævert usikkerhedsbånd, se Figur 8 og Figur 9. Ændringerne i størrelsen på usikkerhedsbåndene er entydigt faldende, dvs. estimatet på intensiteterne er for alle varigheder og gentagelsesperioder (med undtagelse af 2 minutter) bedre bestemt af den nye regionale model sammenlignet med Skrift nr. 30; i gennemsnit er forbedringen i størrelsesordenen 30 % (se Figur 8).



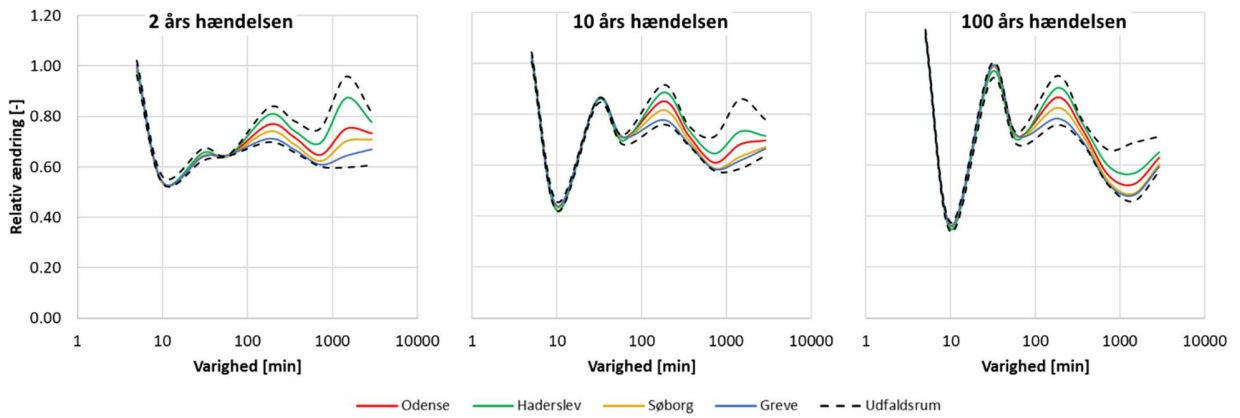
Figur 5 Den regionale variation i ekstremregn i henhold til den nye regionale model for udvalgte varigheder og gentagelsesperioder. Bemærk, at skalaen på figurerne ikke er ens.



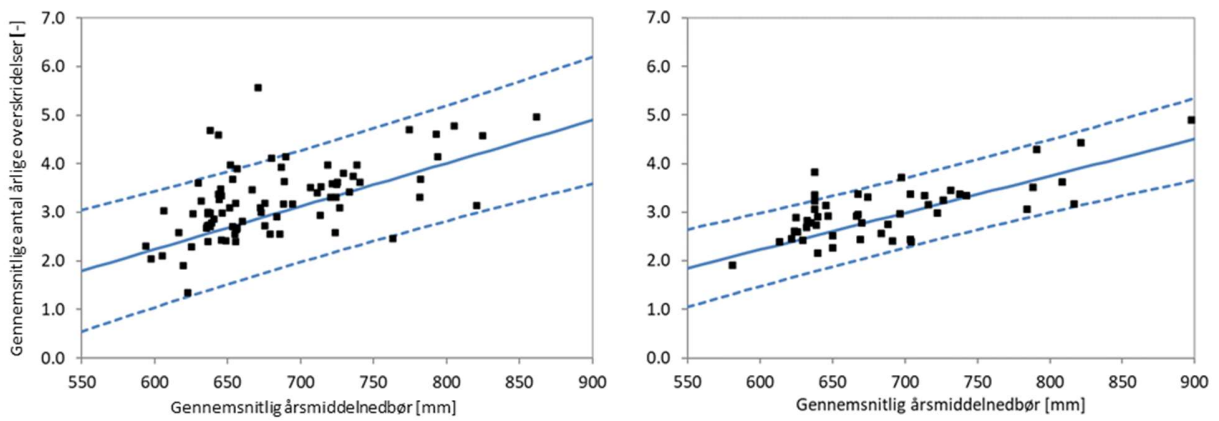
Figur 6: Gennemsnitlige dimensionsgivende intensiteter for 10 års gentagelsesperiode målt relativt i forhold til Skrift nr. 30. Gennemsnittet er beregnet ved at beregne gennemsnittet for alle de gridpunkter, som anvendes af den regionale model. Det ses, at denne bearbejdning giver resultater, der ligger lidt under gennemsnittet for modellen anvendt i Skrift nr. 30, men til gengæld højere end i både Skrift nr. 26 og Skrift nr. 28.



Figur 7: Den relative ændring i middelværdien af 2-, 10- og 100-års hændelserne mellem Skrift nr. 30 og den nye regionale model. En værdi over 1 betyder en stigning i intensiteten i den nye regionale model set i forhold til Skift nr. 30. For hver varighed repræsenterer de stiplede linjer den lokalitet i Danmark, hvor ændringen er hhv. mindst (grå) og størst (sort). De stiplede linjer repræsenterer dermed ikke den samme lokalitet for alle varigheder.



Figur 8 Den relative ændring af spredningen på 2-, 10- og 100-års hændelserne mellem Skrift nr. 30 og den nye regionale model. En værdi over 1 betyder en stigning i spredningen i den nye regionale model set i forhold til Skrift 30. For hver varighed repræsenterer de stiplede linjer den lokalitet i Danmark, hvor ændringen er hhv. mindst (grå) og størst (sort), det er således ikke den samme lokalitet for alle varigheder.



Figur 9 Antal årlige overskridelser for 24-timers hændelser for den regionale model i Skrift 30 (venstre) og for denne bearbejdede (højre).

5 Model for historiske og forventede fremtidige klimaforandringer

Brug af klimafaktorer i forbindelse med analyse og dimensionering af afløbssystemer er beskrevet i Skrift nr. 29 og Skrift nr. 30. I forbindelse med introduktionen af DMI's KlimaAtlas (DMI, 2018) og projektet VÆRDI er det blevet præciseret i Gregersen et al. (2021), at det er de til enhver tid gældende anbefalinger fra Spildevandskomiteens skrifter, der er bør anvendes, når klimaforandringer skal tages i betragtning ved analyse og dimensionering af afløbssystemer.

I relation til KlimaAtlas er der endvidere udført et PhD-projekt med fokus på ekstremregn på urban skala (Thomassen, 2023). Undersøgelserne har indbefattet analyser af:

- Hvor gode er den seneste generation af højtopløselige klimamodeller til at repræsentere ekstreme regnhændelser? (Thomassen et al., 2021).
- Hvilken øget værdi tilfører disse højtopløselige klimamodeller til vores forståelse af ekstremregn? (Médus et al., 2022).
- Hvor gode er disse højtopløselige klimamodeller til at producere output, der er direkte sammenlignelige med observationer? (Thomassen et al., 2022).
- Om der er (endnu-)mere værdi at hente ved at øge opløsningen på klimamodellerne yderligere, så disse får et niveau, der er sammenligneligt med radar-data? (Thomassen et al., 2023).

Herudover har der været flere fællesnordiske studier af betydningen af højtopløselige klimadata i forhold til ekstremregn baseret på de samme datasæt (Dyrrdahl et al., 2022; Olsson et al., 2022). De oplyste undersøgelser har ikke givet anledning til, at der på nuværende tidspunkt kan anbefales nye eller mere differentierede klimafaktorer, og anbefalingen vedrørende brug af klimafaktorer er derfor uændret i forhold til tidligere.

5.1 Brug af klimafaktorer til justering af resultater fra den regionale model

Til brug for beregning af klimafaktorer for ekstremregn i den regionale model foreslås det i simple tilfælde at anvende en parametriseret udgave af standard-klimafaktorerne fra Skrift nr. 29. I henhold til de tidligere anbefalinger er en eventuel afhængighed af varigheden ikke medtaget, hvorved klimafaktoren, $k_{T,x}$, kan beskrives som funktion af gentagelsesperioden T og fremskrivningshorisonten x . Følgende funktion giver en god beskrivelse for fremskrivningshorisonten på 100 år:

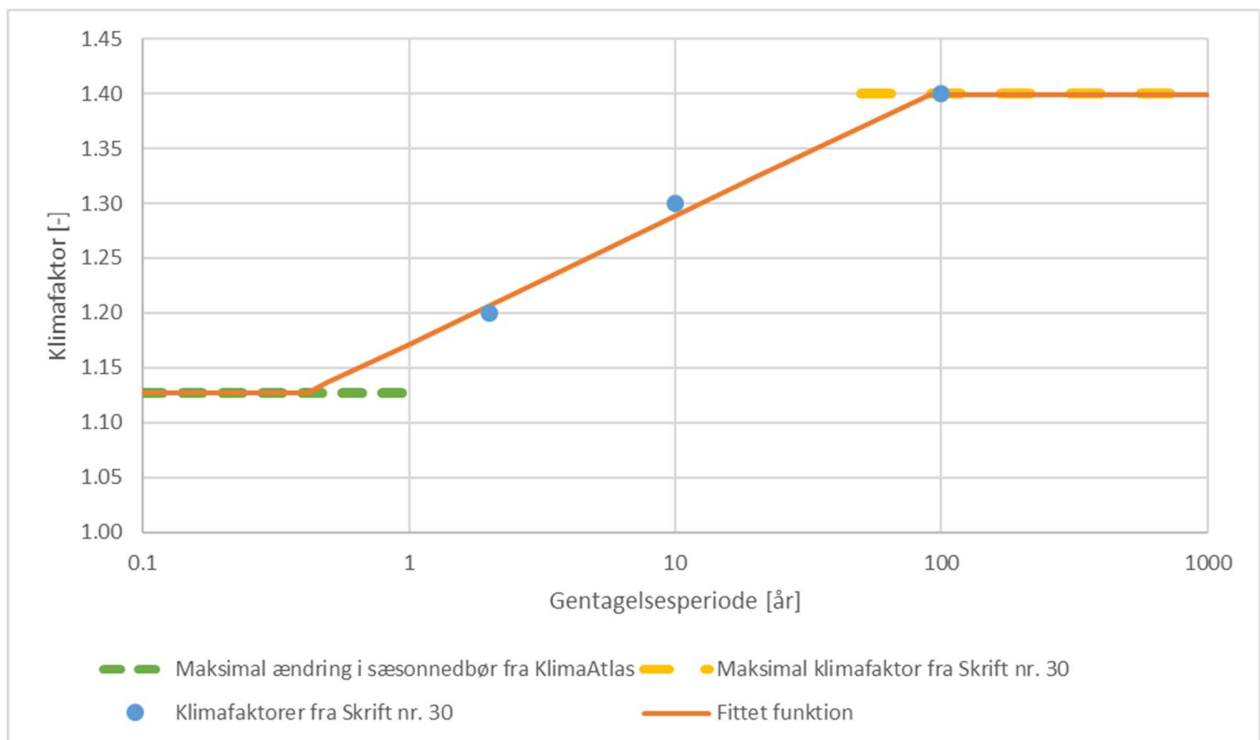
$$k_{T,100} = 1,1718 + 0,0506 * \ln(T)$$

Funktionen er bestemt på baggrund af rekommandationen af gentagelsesperioder for 2, 10, og 100 år. Som grænser for ekstrapolation til hhv. højere og lavere gentagelsesperioder anvendes følgende begrænsninger:

1. For små gentagelsesperioder benyttes funktionen indtil den får en værdi, der svarer til den estimerede maksimale ændring af sæsonnedbøren i DMI's KlimaAtlas, her beregnet til 1,13 (Danmarks Meteorologiske Institut, 2023). Denne værdi er i god overensstemmelse med den klimafaktor, der er medtaget for gentagelsesperioden 0,15 år i Skrift nr. 30.
2. For høje gentagelsesperioder anvendes klimafaktoren for $T=100$ år angivet i Skrift nr. 30, her angivet til 1,4, da skriftet ikke giver en rekommandation for gentagelsesperioder højere end $T=100$ år.

- Værdien af x har varieret mellem 90 og 110 år for de klimamodeller, der har været benyttet til at bestemme klimafaktoren. På den baggrund er den maksimale værdi af x sat til 123 år, svarende til, at fremskrivningen sker maksimalt frem til år 2123, altså 100 år efter at dette skrift er udgivet.

De værdier af klimafaktoren for en fremskrivningshorisont på 100 år, som fremkommer ved brug af denne metode, er angivet i Tabel 5. Modellen bør anvendes med en vis forsigtighed, idet der kun er tale om en ekstrapolation af standard-klimafaktorerne, som angiver den forventede middelværdien af klimaeffekten. Modellen giver dermed ikke en vurdering af usikkerheden på klimasignalet.



Figur 10 Parametriseret version af klimafaktorerne fra Skrift nr. 30 der kan anvendes ved justering af den regionale regnrække med en fremskrivningshorisont på 100 år. Den angivne formel anvendes indenfor de værdier af gentagelsesperioden, der ikke er begrænset nedadtil af de beregnede sæsonændringer i KlimaAtlas og opadtil af den højeste standard-klimafaktor.

For fremskrivningshorisonter under 100 år foreslås det at anvende en lineær fremskrivning af klimaændringerne over tid. Dette er i overensstemmelse med de publicerede studier, der er baseret på de danske klimafaktorer, f.eks. Olsen et al (2015). Som øvre og nedre grænser for værdierne af klimafaktorerne anvendes de lineært skalerede værdier, der begrænser funktionsudtrykket for fremskrivningshorisonten på 100 år. Konkret sker det ved at anvende følgende formel:

$$k_{T,x} = \frac{x}{100} (k_{T,100} - 1) + 1$$

hvor T er gentagelsesperioden og x er fremskrivningshorisonten. For gentagelsesperioderne imellem grænserne kan de to formler kombineres til følgende udtryk:

$$k_{T,x} = 1 + 0,01 * x (0,1718 + 0,0506 * \ln(T)), \text{ for } 0,4 < T < 92 \text{ år og } 0 < x < 123 \text{ år}$$

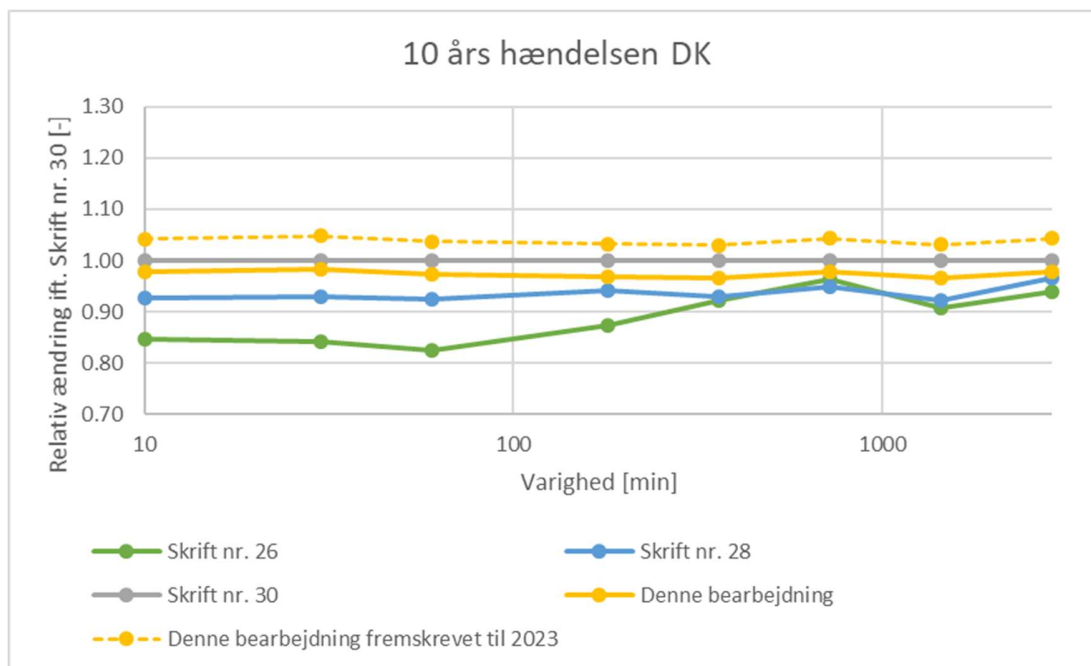
Som specificeret i afsnit 4 er den regionale model i nærværende bearbejdning repræsentativ for midtpunktet af måleperioden, dvs. år 2000. Ønskes repræsentative statistikker for en periode herefter, må der anvendes en klimafaktor, beregnet ud fra den ønskede fremskrivningshorisont. Dette indebærer, at det fremhæves, at klimafaktoren beregner en fremskrivningen frem til et konkret år. Endvidere medfører det også, at klimaet principielt ændrer sig hvert år, så de ekstreme intensiteter gradvist forøges. Anvendelse af denne metode indebærer, at den regionale models estimerer for spredninger ikke er retvisende, idet fremskrivningerne fra periodens midtpunkt til et fremtidigt tidspunkt kun er gældende for middelværdierne. Det er sikkert, at spredningen vil være større end angivet for den regionale model, men det er ikke muligt at komme med præcise skøn for hvor meget større disse usikkerheder er ud fra den nuværende viden om klimaændringer.

Klimafaktorerne indgår som et væsentligt led i fastlæggelsen af den operationelle faktor for simple dimensioneringer². I Tabel 5 og på Figur 11 er angivet hhv. klimafaktorer som funktion af gentagelsesperioden og de gennemsnitlige intensiteter, der beregnes for år 2023 sammenlignet med dels den regionale bearbejdning og tidligere skrifers anbefalinger. I Tabel 5 er endvidere angivet klimafaktorer for år 2100.

Tabel 5 Eksempel på beregnede klimafaktorer der kan anvendes ved korrektion af den regionale model fra klimanormal til aktuelt niveau i hhv. år 2023 og år 2100. Klimafaktoren for år 2000 er 1,00 for alle gentagelsesperioder..

Gentagelsesperiode [år]	Klimafaktor for år 2023 [-]	Klimafaktor for år 2100 [-]
0,1	1,029	1,13
0,3	1,029	1,13
0,5	1,031	1,14
1	1,040	1,17
2	1,048	1,21
5	1,058	1,25
10	1,066	1,29
20	1,074	1,32
50	1,085	1,37
100	1,093	1,40

² I Arnbjerg-Nielsen og Illeris (2023) anbefales det fremadrettet at anvende termen *Operationel faktor* som den faktor, der indeholder følgende bidrag: 1) *Sikkerhedsfaktor på afstrømning*, som beskriver den samlede usikkerhed på regn, afstrømning og hydraulisk model, 2) *Scenariefremskrivning*, som beskrives ved en klimafaktor på nedbør samt en beskrivelse af byfortætning (enten i form af en fortætningsfaktor eller ved ændringer i planmodellen), samt 3) Eventuelt en *Biasfaktor* til at beskrive forskellen mellem den regionale model for regn og en lokal (observeret) regnserie.



Figur 11 Konsekvens af fremskrivning af den regionale model til 2023 for middlestimerne af 10-års hændelsen. Det ses, at allerede nu har klimaændringer formentlig medført, at ekstremregn er kraftigere end beregnet i Skrift nr. 30.

5.2 Brug af SVKs Regnserieværktøj til sammenligning af historiske regnserier mod den regionale model

Der er udviklet et hjælpeværktøj til bestemmelse af afvigelse mellem målte intensiteter i en given regnserie og den nye regionale model for typiske varigheder og gentagelsesperioder. I forbindelse med udarbejdelsen af dette skrift er hjælpeværktøjet, SVKs Regnserieværktøj (tidligere benævnt Rain Analyst), blevet opdateret med den nye regionale model. SVKs Regnserieværktøj kan benyttes til at sammenligne regnserier med den regionale model ved at beregne U -værdier og f -faktorer i henhold til metoderne angivet i hhv. Skrift nr. 26 og Skrift nr. 28 og anvende dem i henhold til beskrivelsen i Skrift nr. 30.

Beskrivelsen i Skrift nr. 30 omfatter en metode til at korrigere en regnserie, efter at det er bestemt, at denne regnserie er egnet til at beskrive klimaet på den angivne lokalitet, varighed og gentagelsesperiode. Nærværende projekt har undersøgt, om det har været muligt at udarbejde en generel vejledning til at udvælge hvilken blandt flere mulige regnserier, der bedst repræsenterer middelklimaet for en given periode ved en given lokalitet, for alle varigheder og gentagelsesperioder samt anbefale en tilsvarende f -værdi. Det er vanskeligt, blandt andet fordi regnserierne anvendes til meget forskellige formål, hvoraf nogle også afhænger af andre forhold end regnens gennemsnitlige intensitet for en række gentagelsesperioder. Derfor stilles værktøjet til rådighed, men uden en rekommandation for dets konkrete anvendelse i forbindelse med dimensionering.

6 Sammenfatning

Der er estimeret en ny regional model for ekstremregn, baseret på et opdateret datasæt af observationer fra Spildevandskomiteens regnmålersystem fra perioden 1979-2019. Den nye regionale model ligner i struktur den foregående, men der er foretaget en række større og mindre ændringer, der samlet gør, at bearbejdningen forbedrer den regionale model markant. I forhold til den seneste bearbejdning i Skrift nr. 30 var det i særlig grad vigtigt at undersøge, hvorvidt den konstante stigning i antallet af ekstremhændelser fortsatte eller blev erstattet af et fald. Der er konstateret et fald i antallet af ekstremhændelser pr. år siden 2012, hvilket har været inddraget i vurderingen af validiteten af de opstillede modeller.

Følgende ændringer i den nye bearbejdning kan især fremhæves:

- Kravet til minimumsobservationsperioden, for at en regnserie kan indgå i estimeringen af den regionale model, er hævet til 25 år.
- Definitionen af en ekstremhændelse er blevet skærpet, så den bedre passer til datamaterialet. Det indebærer, at den regionale model igen er baseret på data, hvor alle hændelser forekommer med en hyppighed på ca. 3 pr. år.
- Der er udarbejdet en supplerende analyse, der muliggør, at man kan estimere ekstremregn op til hyppigheder på 10 pr. år.
- Der er suppleret med en bearbejdning af varigheder på 7 døgn. På baggrund af resultaterne heraf er det besluttet, at denne varighed ikke skal anvendes ved beregning af de regionale regnrækker. Tilsvarende er det vurderet, at en bearbejdning på 1 minut ikke skal indgå i den regionale regnrække.
- Regionaliseringen af de forklarende variable er ændret, så den i højere grad anvender lokale forhold ved beregning af den regionale regnrække.
- Tidligere bearbejdninger har skønnet ekstreme nedbørsintensiteter for en historisk periode, og det er implicit antaget, at de statistiske egenskaber ved nedbøren har været konstant i denne periode. Måleperioden i nærværende bearbejdning er nu tæt på 40 år, hvilket er en lang periode i forhold til en antagelse om konstant klima. Den lange periode giver til gengæld mulighed for at kompensere for den meget dominerende cyklus, som er observeret i de historiske data.
- Der er angivet en metode til at korrigere den regionale model for hele klimanormalen for 1979 – 2019 med en klimafaktor. Der tages her udgangspunkt i midtpunktet af måleperioden frem til det tidspunkt, som fremskrivningshorisonten specificerer. Ved at anvende denne metode og den anbefalede korrektion skønnes det, at i år 2023 er regnrækken for en gentagelsesperiode på 10 år forøget med 7% i forhold til den regionale model for perioden 1979-2019. Ved fremskrivning til år 2100 kan de hidtil anbefalede klimafaktorer anvendes direkte, idet de repræsenterer en fremskrivning på 100 år. Denne metode giver en robust fremskrivning af middelværdier af ekstremregn. I lighed med tidligere skrifter er der ikke nogen specifik anbefaling vedrørende skøn for usikkerheden på fremskrivningerne.

Samlet indebærer ændringerne, at de beregnede intensiteter i den nye regionale model er en smule lavere end i Skrift nr. 30, men at ved fremskrivning til år 2023 er denne reduktion allerede ”spist op” af den generelle stigning i måleperioden.

Den nye regionale model giver lokalt mere præcise estimater end tidligere, især fordi stikprøveusikkerheden fra korte og mindre repræsentative regnserier er udeladt fra analysen. Bilag B beskriver betydningen af den nye regionale model for Spildevandskomiteens værktøjer. I forhold til fremtidige bearbejdningsmålinger forventes, at den regionale regnrække af "nutidens klima" generelt vil være stigende, efterhånden som klimaændringers effekter vil blive observeret.

En vigtig faktor ved opstilling af modellen er beskrivelse af korrelationen mellem forskellige lokaliteter for ekstremregn for forskellige varigheder. Ved at sammenligne med radardata er det påvist, at de spatiale korrelationer, udregnet på baggrund af observationer fra Spildevandskomiteens regnmålersystem, er repræsentative for danske forhold.

Analyser baseret på den nyeste generation af højtopløselige klimamodeller har ikke givet anledning til nye eller mere differentierede klimafaktorer.

7 Referencer

- Arnbjerg-Nielsen, K. og Illeris, T. S. 2023. Rapport om håndtering af usikkerheder ved beregning af regnafstrømning i byer. Del 1: Begrebsafklaring og problembeskrivelse. Rapport for IDA Spildevandskomiteén/Det Faglige Udvalg/ Undergruppen vedr. usikkerheder i forbindelse med dimensionering. Spildevandskomiteén, København, 2023.
- Belušić, D., de Vries, H., Dobler, A., Landgren, O., Lind, P., Lindstedt, D., Pedersen, R.A., Sánchez-Perrino, J.C., Toivonen, E., van Ulfet, B., Wang, F., Andrae, U., Batrak, Y., Kjellström, E., Lenderink, G., Nikulin, G., Pietikäinen, J.-P., Rodríguez-Camino, E., Samuelsson, P., van Meijgaard, E., Wu, M. (2020). "HCLIM38: a flexible regional climate model applicable for different climate zones from coarse to convection-permitting scales". *Geosci. Model Dev.* 13, 1311–1333.
- Danmarks Meteorologiske Institut (2018). "Vejledning i anvendelse af udledningsscenerier". Udarbejdet af DMI i samarbejde med MST. September 2018, København.
- Danmarks Meteorologiske Institut (2023). "Excel-fil som dækker hele Danmark og alle 98 kommuner", [https://www.dmi.dk/fileadmin/klimaatlas/excel/DMI Klimaatlas Alle kommuner v2022a.xlsx](https://www.dmi.dk/fileadmin/klimaatlas/excel/DMI_Klimaatlas_Alle_kommuner_v2022a.xlsx) tilgået 10-03-2023.
- Dyrredal, A. V., Olsson, J., Médus, E., Arnbjerg-Nielsen, K., Post, P., Aņiskeviča, S., Thorndahl, S., Førland, E., Wern, L., Mačiulytė, V., Mäkelä, A. (2021). "Observed changes in heavy daily precipitation over the Nordic-Baltic region". *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 38, [100965].
- Gregersen, I. B., Madsen, H., Rosbjerg, D. and Arnbjerg-Nielsen, K. (2014). Long term variations of extreme precipitation in Denmark and Southern Sweden. *Clim. Dyn.* 44, 3155-3169.
- Gregersen, I. B., Madsen, H., Rosbjerg, D., Arnbjerg-Nielsen, K. (2017). "A regional and nonstationary model for partial duration series of extreme rainfall", *Water Resources Research*, 53, 2659– 2678.
- Gregersen, I. B., Arnbjerg-Nielsen, K., Pedersen, R. A. (2021). "Sammenligning af klimafaktorer udarbejdet af Spildevandskomiteén og Klimaatlas og anbefaling af praksis for dimensionering og analyse af afløbssystemer", Spildevandskomiteén, Ingeniørforeningen i Danmark – IDA, og Danmarks Meteorologiske Institut.
- Gregersen, I. B., Madsen, H., Arnbjerg-Nielsen, K., Sørup, H. J. D. (2023a). "Baggrundsrapport om ny regional model for ekstremregn udført i VÆRDI-projektet".
- Gregersen, I. B., Arnbjerg-Nielsen, K., Sørup, H. J. D., Paludan, B., Thorndahl, S. L., Møllerup, A. L., Illeris, T. S. og Rosbjerg, D. (2023b) "Bassindimensionering med SVKs regnrækkeværktøj".
- Lind, P., Belušić, D., Christensen, O. B., Dobler, A., Kjellström, E., Landgren, O., Lindstedt, D., Matte, D., Pedersen, R. A., Toivonen, E., Wang, F. (2020). "Benefits and added value of convection-permitting climate modeling over Fenno-Scandinavia". *Clim. Dyn.* 55, 1893–1912.
- Madsen, H. (1998). "Ekstremregn i Danmark. Statistisk bearbejdning af nedbørsdata fra Spildevandskomiteéns Regnmålersystem 1979-96". Baggrundsrapport til skrift 26. DTU. Institut for Miljøvidenskab.

Madsen, H., Arnbjerg-Nielsen, K. (2006). "Statistisk bearbejdning af nedbørsdata fra Spildevandskomiteens Regnmålersystem 1979-2005". Baggrundsrapport til skrift 28. DHI.

Médus, E., Thomassen, E. D., Belušić, D., Lind, P., Berg, P., Christensen, J. H., Christensen, O. B., Dobler, A., Kjellström, E., Olsson, J., Yang, W. (2022). "Characteristics of precipitation extremes over the Nordic region: added value of convection-permitting modeling". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(3), 693-711.

Nielsen, J. E., Thorndahl, S., Rasmussen, M. R. (2014). "A numerical method to generate high temporal resolution precipitation time series by combining weather radar measurements with a nowcast model". *Atmos. Res.* 138, 1–12.

Olsen, A. S., Zhou, Q., Linde, J. J., Arnbjerg-Nielsen, K. 2015. Comparing Methods of Calculating Expected Annual Damage in Urban Pluvial Flood Risk Assessment. *Water*, 7, 255-270.

Olsson, J., Dyrddal, A. V., Médus, E., Södling, J., Aniskeviča, S., Arnbjerg-Nielsen, K., Førland, E., Mačiulytė, V., Mäkelä, A., Post, P., Thorndahl, S. L., Wern, L. (2022). "Sub-daily rainfall extremes in the Nordic–Baltic region". *Hydrology Research*, 53(6), 807-824.

PH-consult, 2000, "Winregn Version 1.0".

Scharling, M. (2012). "Climate Grid Denmark - Dataset of use in research and education – Daily and monthly values 1989-2010." Technical report 12-10. Danish Meteorological Institute, Ministry of Climate and Energy. Copenhagen, Denmark.

Spildevandskomiteen (1950). "Bearbejdelse af diagrammer fra de af Stads- og Havneingeniørforeningen opstillede selvregistrerende regnmålere for årene 1933-47, skrift nr. 2", Spildevandskomiteen, Ingeniørforeningen i Danmark – IDA.

Spildevandskomiteen (1953). "Bestemmelse af regnrækker for regn af større hyppighed end fem gange årligt samt angivelse af formler og diagrammer til dimensionering af regnvandsbassiner, skrift nr. 6", Spildevandskomiteen, Ingeniørforeningen i Danmark – IDA.

Spildevandskomiteen (1974). "Bestemmelse af regnrækker, skrift nr. 16", Spildevandskomiteen, Ingeniørforeningen i Danmark – IDA.

Spildevandskomiteen (1999). "Regional variation af ekstremregn i Danmark, skrift nr. 26", Spildevandskomiteen, Ingeniørforeningen i Danmark – IDA.

Spildevandskomiteen (2005). "Funktionspraksis for afløbssystemer under regn, skrift nr. 27", Spildevandskomiteen, Ingeniørforeningen i Danmark – IDA.

Spildevandskomiteen (2006). "Regional variation af ekstremregn i Danmark – ny bearbejdning 1979-2005, skrift nr. 28", Spildevandskomiteen, Ingeniørforeningen i Danmark – IDA.

Spildevandskomiteen (2008). "Forventede ændringer i ekstremregn som følge af klimaændringer, skrift nr. 29", Spildevandskomiteen, Ingeniørforeningen i Danmark – IDA.

Spildevandskomiteen (2014). "Opdaterede klimafaktorer og dimensionsgivende regnintensiteter, skrift nr. 30", Spildevandskomiteen, Ingeniørforeningen i Danmark – IDA.

Sørup, H. J. D., Gregersen, I. B., Arnbjerg-Nielsen, K. (2015). "Teknisk dokumentation og brugervejledning til programmet "DTU Rain Analyst" version 1.0.2". DTU Miljø.

Sørup (2023a) "Brugervejledning og teknisk dokumentation til "Spildevandskomiteens Regionale Regnrækkeværktøj" – version 2023", DTU Sustain – Institut for Miljø- og Ressourceteknologi, Danmarks Tekniske Universitet.

Sørup (2023b) "Brugervejledning og teknisk dokumentation til "Spildevandskomiteens Regnserieværktøj" – version 2023", DTU Sustain – Institut for Miljø- og Ressourceteknologi, Danmarks Tekniske Universitet.

Thomassen, E. D. (2023). "Spatio-temporal characteristics of precipitation in very high-resolution climate models". PhD Thesis. DTU Sustain – Department of Environmental and Resource Engineering, Technical University of Denmark, & National Centre for Climate Research, Danish Meteorological Institute.

Thomassen, E. D., Kendon, E. J., Sørup, H. J. D., Chan, S. C., Langen, P. L., Christensen, O. B., Arnbjerg-Nielsen, K. (2021). "Differences in representation of extreme precipitation events in two high resolution models". *Climate Dynamics*, 57, [3029–3043].

Thomassen, E. D., Thorndahl, S. L., Andersen, C. B., Gregersen, I. B., Arnbjerg-Nielsen, K., & Sørup, H. J. D. (2022). "Comparing spatial metrics of extreme precipitation between data from rain gauges, weather radar and high-resolution climate model re-analyses". *Journal of Hydrology*, 610, [127915].

Thomassen, E. D., Arnbjerg-Nielsen, K., Sørup, H. J. D., Langen, P. L., Olsson, J., Pedersen, R. A., Christensen, O. B. (under revision). "Spatial and temporal characteristics of extreme rainfall: Added benefit with sub-kilometre resolution climate model simulations?" *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.

Thorndahl, S., Nielsen, J. E., Rasmussen, M.R. (2014). "Bias adjustment and advection interpolation of long-term high resolution radar rainfall series". *J. Hydrol.* 508, 214–226.

Bilag A Anvendte SVK-stationer til bestemmelse af den regionale model

Stationsnummer	Stationsnavn	Startdato	Slutdato	Observationsperiode [år]
5025	Frederikshavn Materielgård	19-04-1990	31-12-2019	27,32
5027	Frederikshavn Centralrenseanlæg	24-04-1990	31-12-2019	28,33
5047	Sulsted	01-01-1979	31-12-2019	37,09
5052	Aalborg Østerport Pumpestation	28-02-1990	31-12-2019	29,84
5061	Svenstrup J.	08-01-1979	31-12-2019	31,9
5175	Trankær Renseanlæg	05-09-1989	31-12-2019	30,84
5177	Viby J. Renseanlæg	01-01-1979	31-12-2019	38,95
5180	Egå Renseanlæg	05-09-1989	31-12-2019	30,24
5192	Silkeborg Vandværk	01-01-1979	31-12-2019	39,88
5211	Horsens Centralrenseanlæg	20-08-1982	31-12-2019	37,47
5235	Vejle Centralrenseanlæg	14-09-1994	31-12-2019	35,85
5251	Kolding Forrenseanlæg	01-01-1979	31-12-2019	39,78
5279	Herning Centralrenseanlæg	01-01-1979	31-12-2019	39,07
5340	Esbjerg Renseanlæg Vest	04-01-1979	31-12-2019	38,53
5359	Tønder Centralrenseanlæg	09-02-1994	31-12-2019	25,75
5370	Sønderborg Damgade Pumpestat.	01-01-1979	31-12-2019	39,77
5390	Haderslev Renseanlæg	01-01-1979	31-12-2019	37,94
5415	Odense Nv Renseanlæg	01-01-1979	31-12-2019	38,21
5417	Ejby Mølle Renseanlæg	01-01-1979	31-12-2019	28,53
5419	Odense Vandværk	01-01-1979	31-12-2019	37,99
5422	Bolbro Højdebeholder	01-01-1979	31-12-2019	38,16
5465	Svendborg Centralrenseanlæg	04-10-1994	31-12-2019	25,86
5540	Holbæk Centralrenseanlæg	01-01-1979	31-12-2019	40,33
5570	Sydkystens Renseanlæg	23-01-1979	31-12-2019	40,39
5580	Hillerød Centralrenseanlæg	03-06-1991	31-12-2019	28,26
5590	Frederikssund Centralrenseanlæg	16-01-1992	31-12-2019	27,82
5600	Måløv Renseanlæg	01-01-1979	31-12-2019	39,83
5625	Vedbæk Renseanlæg	01-01-1979	31-12-2019	39,64
5633	Furesø Park	01-01-1979	31-12-2019	39,12
5670	Ordstrup Kirkegård	14-10-1991	31-12-2019	26,61
5694	Søborg Vandværk	01-01-1979	31-12-2019	39,7
5710	Rødovre Vandværk	01-01-1979	31-12-2019	40,04
5730	Landbohøjskolen	08-05-1992	31-12-2019	27,85
5740	Kløvermarksvej	01-01-1979	31-12-2019	39,71
5750	Tårnby Renseanlæg	10-01-1979	31-12-2019	37,56

5755	Tårnby Pumpestation 4	01-01-1979	31-12-2019	40,18
5759	Tårnby Pumpestation 10	23-02-1979	31-12-2019	40,3
5765	Kongens Enghave	01-01-1979	31-12-2019	39,77
5775	Hvidovre Vandværk	01-01-1979	31-12-2019	39,6
5781	Hvidovre Pumpestation	01-01-1979	31-12-2019	39,36
5790	Brøndbyvester Vandværk	10-04-1990	31-12-2019	28,4
5795	Glostrup Essedal	23-01-1979	31-12-2019	39,23
5800	Albertslund Materielgård	28-10-1993	31-12-2019	26,79
5805	Ishøj Varmeværk	02-11-1992	31-12-2019	27,27
5810	Mosedede Renseanlæg	01-01-1979	31-12-2019	39,56
5845	Roskilde Renseanlæg	01-01-1979	31-12-2019	39,15
5925	Næstved Centralrenseanlæg	01-01-1979	31-12-2019	38,28
5955	Nakskov Renseanlæg	01-01-1979	31-12-2019	39,82
5980	Nykøbing F. Renseanlæg	01-01-1979	31-12-2019	39,36
5990	Rønne C	09-11-1989	31-12-2019	30,59

Bilag B Opdaterede værktøjer fra Spildevandskomiteen

Opdateringen af den regionale model har medført, at værktøjerne, som understøtter anvendelsen af den regionale model, ligeledes er blevet opdateret. Ud over selve opdateringen af datagrundlaget har værktøjerne også gennemgået revisioner, der påvirker brugeroplevelsen og funktionaliteten. Hvad det specifikt betyder for de enkelte værktøjer, behandles i de følgende afsnit.

B.1 Spildevandskomiteens Regionale Regnrækkeværktøj v2023

Ud over at selve den regionale model, og de tilhørende regnrækker, er blevet opdateret, som beskrevet i afsnit 3, er der foretaget en række ændringer i værktøjets brugergrænseflade:

- Beregningerne er delt ud på to faner, én for CDS-regn og én for bassindimensionering. De relevante figurer er tilføjet de enkelte faner, så brugeren ser resultatet direkte imens indtastning sker.
- Der er tilføjet mulighed for at få en udglattet top på CDS-regnen til modelberegninger.
- Der er tilføjet en fane, der formaterer CDS-regnen i et format passende for direkte import i MIKE+.
- Der er tilføjet en beregning af tømmetiden på bassinet under antagelse af, at det ikke regner under tømningen.
- Der er fjernet mulighed for at hente 1-min intensiteter ud af modellen.
- Der er tilføjet hjælpende tekst og advarsler både i Excel arksceller og på nogle af figurerne.
- Der er tilføjet en fane hvor klimafaktoren, som angivet i afsnit 5, kan beregnes for en vilkårlig gentagelsesperiode og planlægningshorisont.

Yderligere detaljer om opdateringen kan findes i Gregersen et al. (2023a) og der er også tilføjet en brugermanual i form af Sørup (2023a).

B.2 Spildevandskomiteens Regnserieværktøj v2023

Spildevandskomiteens Regnserieværktøj v2023 bygger direkte på det tidligere værktøj DTU RainAnalyst (Sørup et al., 2015). Dette værktøj er bevaret som en enkelt fane ("Analyser regnserie") i det nye værktøj, dog oversat til dansk i forhold til tidligere.

SVKs Regnserieværktøj kan benyttes til at sammenligne regnserier med den regionale model ved at beregne U -værdier og f -faktorer jf. Skrift nr 26 og Skrift nr 28. Sammenligningen sker ved at beregne en lokal model for ekstremerne baseret på den lokale måleserie og sammenligne den med den regionale regnrække efter principperne beskrevet i Skrift nr. 28. En beregnet f -faktor på 1,0 (svarende til at $U = 0$) indebærer, at intensiteterne i den regionale model er identiske med intensiteterne i modellen for regnserien for den pågældende gentagelsesperiode og varighed.

SVKs Regnserieværktøj sammenligner den historiske regnserie med den regionale model, altså svarende til år 2000. Ønsker man at sammenligne regnserierne i forhold til det forventede gennemsnitlige klima på et senere tidspunkt skal der korrigeres for dette ved at beregne, hvilken f -værdi, der svarer til klimaet for den pågældende fremskrivning.

Herudover er der tilføjet en funktionalitet, hvor der kan genereres km²-filer med en alternativ minimum tørvejsperiode mellem hændelserne (fanen "Lav ny km²-fil"). Funktionaliteten blev oprindeligt udviklet i programmet "WinRegn" (PH-consult, 2000), men har ikke været videreført siden da.

Yderligere detaljer om opdateringen kan findes i Gregersen et al. (2023a) og der findes tillige en brugermanual i form af Sørup (2023b).

B.3 LAR-regnearket v2023

LAR-regnearket er en overbygning til "Spildevandskomiteens Regionale Regnrækkeværktøj". Derfor er LAR-regnearket ligeledes udgivet i en ny version hvor den opdaterede regionale model udgør beregningsfundamentet for LAR-dimensioneringen.

Konkret er følgende elementer i LAR-regnearket opdateret:

- Parametrene der definerer den regionale model er opdateret på fanen "Tables" og "help3"
- Kommuneliste er opdateret med gældende kommunenavne, og alle kommuner er nu repræsenteret ved deres geografiske midtpunkt. De konkrete Northing/Easting koordinater er angivet for hver kommune i fanen "Kommuneliste".
- IDF-beregningerne er opdateret på samme vis som i "Spildevandskomiteens Regionale Regnrækkeværktøj", så resultater i fanen "IDF" giver samme værdier for enslydende koordinater.

Brugergrænsefladen i LAR-regnearket er ikke ændret.