

Tropisk styrtregn over København den 2. juli 2011

Alle danske monsterregns moder ...!

Af Flemming Vejen, DMI

Lørdag den 2. juli indtraf den ultimative nedbørkatastrofe i København, som forhåbentlig vil stå som rekorden i regnintensitet i mange år fremover. Den var så voldsom, at gader og stræder i den indre by blev forvandlet til floder, og mange vejstrækninger blev umulige at passere. Transportnettet brød sammen, f.eks. var det nødvendigt at lukke Amagermotorvejen ved Gl. Køge Landevej, og der var ingen vej udenom at aflyse store dele af den lokale togtrafik, da flere skinnestrækninger stod under dybt vand. Mange viadukter, gangtunneler og veje blev oversvømmet, ligesom for et år siden også Ryparken Station (figur 1), og et stort antal kældre

og huse blev svært vandskadede. At der var problemer for trafikken fremgår med al tydelighed af figur 2. Der gik mange dage, førend situationen var nogenlunde normaliseret i Hovedstadsområdet.

Det efterhånden store antal kraftige sommerregn, vi har haft de senere år, bliver åbenbart ved med at overgå sig selv, og lørdag den 2. juli var således ingen undtagelse. Men den overgik til gengæld alle tidligere hændelser så markant, at det er fristende at kalde den "alle monsterregns moder". I det mindste i Danmark. Et lille kuriosum: forrige års kraftige regn i Københavnsområdet kom også på en lørdag...

Spørgsmålet er nu, hvor meget regn der egentlig faldt, og hvor kraftig den var. Traditionelt måles nedbør med nedbørmålere, som imidlertid kun giver regndata i et meget lille punkt på 200 cm². Et traditionelt pro-

blem i kraftig regn er at opgøre nedbørforholdene netop de steder, hvor regnen er faldet, da der ikke er nedbørmålere overalt. Derfor kan nedbøren i vejrtyper som den pågældende være vanskelig at opgøre, da nedbørens mængde og intensitet kan variere betydeligt henover tid og i rum, hvilket kan gøre det nær umuligt at sige noget om nedbøren blot få kilometer fra nedbørmåleren. Det kan også regne så lokalt, at ingen målere får fat i regnen.

Heldigvis har vi en vejrradar, som er et glimrende instrument til måling af nedbørens tidlige og rumlige udbredelse samt dens relative mængde og intensitet. Så lad os i det følgende kaste os over en analyse af nedbøren den 2. juli, hvor vejrradardata trækkes ind for at give svar på: hvor og hvor meget regn kom der, og hvor kraftig var den, da det var værst?



Figur 1. Lyngbyvej og Ryparken Station under vand. Foto Finn Majlergaard. Se også bagsiden af bladet.



Figur 2. Istedgade i København efter skybruddet den 2. juli 2011. Foto: Anne Christine Imer Eskildsen.

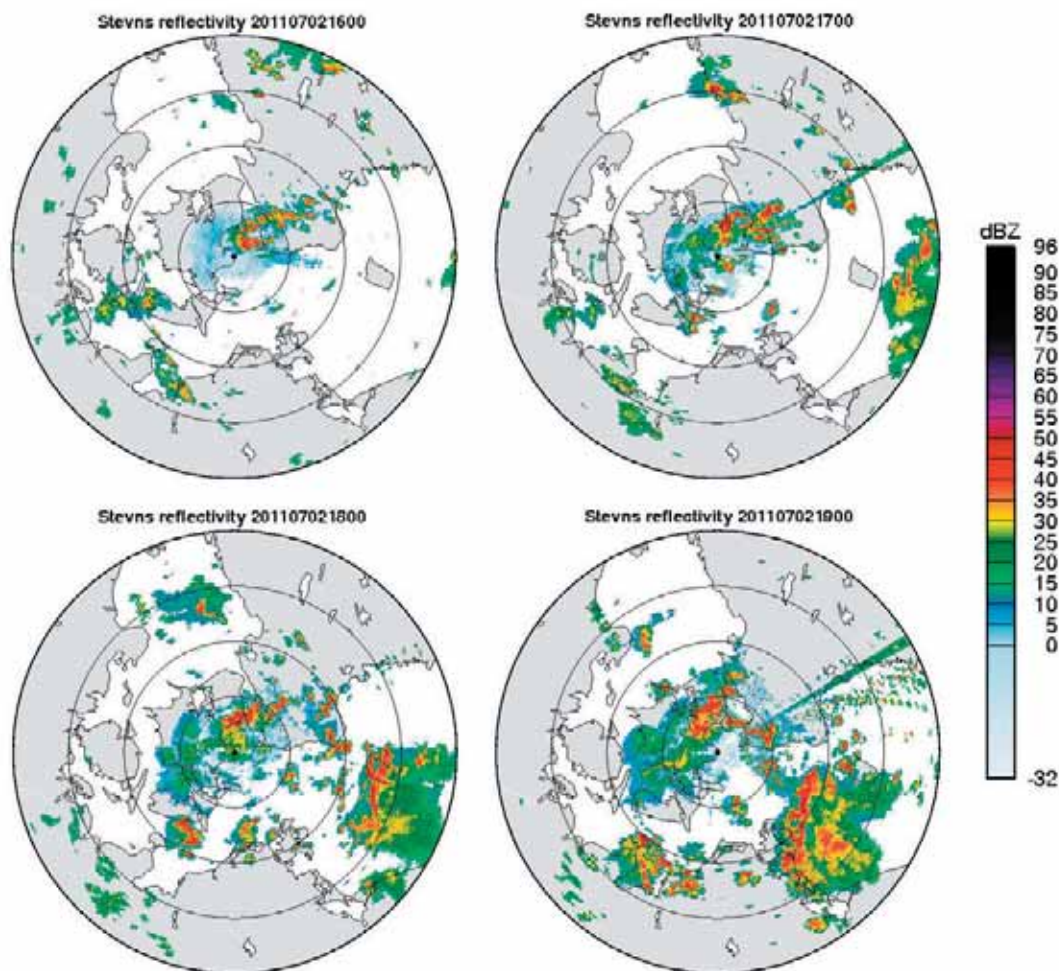
Uvejret trækker op – hvad sker der?

I løbet af eftermiddagen udviklede der sig flere intense bygeceller over det sydlige Sverige, og de trak langsomt ud over Øresund og ind over København, hvor de var næsten stationære og afgav stedvis enorme regnmængder. Figur 3 viser radarbilleder med en times mellemrum fra bygeområdet trak ind over Amager til det klingede af over centrum.

Mange faktorer har betydning for, hvorfor lige netop denne regn blev så kraftig. Senere i bladet er der gjort rede for de dynamiske processer i atmosfæren, der giver en sandsynlig forklaring på hændelsen og dens forløb. Men at uvejret bliver så kritisk rent afløbsteknisk skyldes ikke kun de meteorologiske forhold, men også at afløbssystemerne af gode grunde ikke er gearet til at aflede så store mængder vand på så

kort tid. I tilgift gik regnområdet næsten i stå over København, hvorfor bygesystemet tømte de store mængder vand ud over et forholdsvis begrænset område. Et uheldigt sammenfald af mange faktorer.

Det usædvanlige ved regnvejret var på én gang både spidsintensiteten og regnmængden, og at regnen faldt over et ret stort område. Faktisk var der problemer med oversvømmelser langt

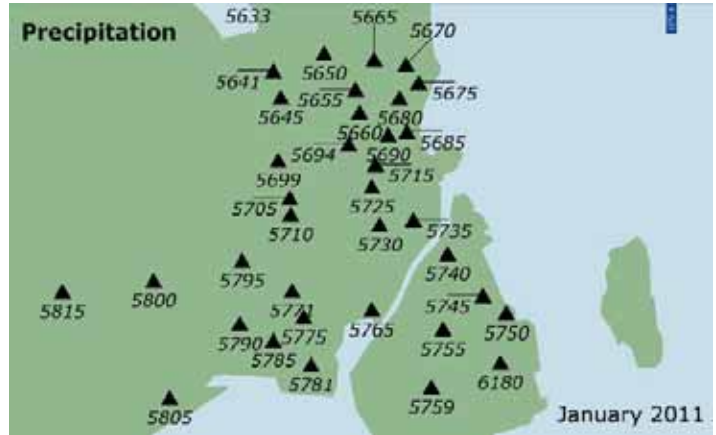


Figur 3. Radarbilleder fra radaren på Stevns 2. juli 2011 kl. 16-19z. Bemærk at tiderne er i z-tid, som er forskudt med to timer i forhold til dansk sommertid. Kl. 16z er kl. 18 og så fremdeles. Billederne minder om dem på side 18 i dette blad, men er scannet lidt anderledes og til lidt andre tidspunkter. Og så viser ovenstående billeder hele radarens dækningsområde.

ud over den indre del af København. Nedbøren var over et stort område meget kraftigere, end et normalt dimensioneret afløbssystem kan håndtere, og mange steder blev afløb og bassiner til opsamling af regnvand fyldte, så vandet kun havde en vej tilbage: op! Og da først vandet "sprang op af jorden", gik det stærkt!

Den største officielle nedbørmængde blev målt i Botanisk Have, hvor der faldt intet mindre end 135,4 mm henover døgnet 2/7 kl. 8 til 3/7 kl. 8 (lokal sommertid). Det er den største døgnmængde de seneste 55 år! En uofficiel måling ved Lynetten meldte endog om endnu mere regn. Regnintensiteten opgjort som en middellintensitet henover 10 minutter slog rekord, idet der ved Ishøj Varmeværk blev målt 3,1 mm/minut. Det slår den seneste rekord fra 11. juli 2008: dengang faldt der 2,5 mm/minut ved Kløvermarksvej på Amager.

Trods et tæt net af nedbørmålere i regionen (figur 4), er der alligevel for få til at beskrive nedbørfordelingen præcist på mange af de kritiske lokaliteter. Der melder sig unægtelig spørgsmålene: hvordan kunne regnintensiteten karakteriseres og hvor store mængder regn kom der? Det er oplagt at belyse regnens omfang og styrke vha. radardata, som netop er velegnede til at registrere nedbørens fordeling, mængde og intensitet: hvor regnbyger f.eks. let kan smutte gennem et konventionelt målnetværk uden at blive »set«, skal de være meget små, førend radaren overser dem. Inden vi kaster os over dette, skal vi lige turen rundt om, hvordan en radar kan give os disse oplysninger.



Figur 4. DMI-stationer der måler nedbør, januar 2011.

Lidt baggrund om vejradarmålinger

En vejradar virker ved at udsende elektromagnetiske pulser i atmosfæren og derefter måle, hvor stor en del af den udsendte stråling, der reflekteres tilbage til radaren af nedbørpartikler. Der er en direkte sammenhæng mellem refleksionens størrelse og nedbørens intensitet. Imidlertid giver uvedkommende objekter såsom skibe, huse, bakker, fly, støv, fugle og insekter også refleksion og kan ind imellem give betydelig støj på den radarmålte nedbørintensitet.

Den returnerede energi P_r , som radaren måler, er relateret til den energi, radaren sender ud, til afstanden r mellem radar og mål, til de reflekterende elementer (nedbør, insekter, osv.) strålen møder på sin vej, til atmosfærefysiske forhold såsom spredningsegenskaber for nedbørpartikler og svækkelsen i atmosfæren af den transmitterede energi, og sidst men ikke mindst til parametre for radarsystemet. Ved at samle alle radar-karakteristika i en konstant C og bibeholde de variable parametre

svækkelsen η , brydningsindeks K og afstanden r , kan den såkaldte reflektivitetsfaktor Z skrives på flg. enkle form (se Battan, 1973):

$$Z = (C^{-1} |K|^{-2} \eta^{-1} r^2) \overline{P_r}$$

Bemærk at det modtagne signal P_r betragtes som en middelværdi af målinger på adskillige radar-pulser for at reducere følsomheden overfor støj og hurtige fluktuationer. Desuden er der for forenklingens skyld sprunget en del mellemregninger over i dette regnestykke. En lille finte er, at K både er konstant og ikke konstant: K er konstant for en given tilstand af en partikel, da is og vand reflekterer hver sin brøkdæl af det modtagne signal. Det er derfor vigtigt at vide, om nedbørpartiklerne er frosne eller smeltede, da vand reflekterer ca. 4.7 gange kraftigere end is ved den bølglængde på 5 cm (C-båndet), DMI's radarer måler i.

Lad os bruge et par ord på Z , der er et mål for den reflekterede energi, og som derfor er den størrelse, vi er interesserede i til nedbørberegning. Som vi har set, afhænger Z af den samlede

refleksion fra nedbørpartikler, som befinder sig inden for et givet volumen luft. Denne afhængighed kan også udtrykkes i forhold til dråbestørrelsesfordelingen i dette volumen, og vigtige størrelser her er antallet af dråber N og disse dråbers diameter D . Hvis størrelsesfordelingen angives i form af diskrete intervaller i af D , og vi antager, at alle partikler i et interval i har samme diameter, kan Z i helt enkel form også formuleres som (Battan, 1973):

$$Z = \sum N_i D^6$$

At dråbediameteren indgår i 6'te potens og at Z er sammensat af to ubekendte får dramatisk effekt: i byger som typisk indeholder få men store dråber, er refleksionen væsentlig kraftigere end i finregn med mange små dråber, også selv når den samlede vandmængde i de to tilfælde er ens. Det er derfor ikke muligt at bestemme nedbørmængde eller nedbørintensitet alene ud fra værdier af Z .

Z kan udledes ved at korrigerer det målte signal P_r for afstanden fra radaren, radarkarakteristika, signaldæmpningen mellem mål og radar og partiklernes tilstandsform. Af praktiske grunde angives Z på logaritmisk skala og benævnes dBZ. Denne størrelse kan spænde over værdier fra -32 til 95 dBZ for DMI's radarer, svarende til Z værdier på 0,00063 til $3,16 \cdot 10^9$ [mm^6/mm^3].

For at få brugbare data ud af radaren, er det nødvendigt at korrigerer for radarstråls svækkelse, der skyldes atmosfæriske gasser, skyer og nedbør. Hagl svækker mest, derefter kommer kraftig regn, så sne fulgt af skydråber, og til sidst atmosfæriske gasser, der kan ignoreres i C-båndet.

DMI's 5 vejradarer måler ekkoer ud til 240 km's afstand, og figur 3 viser dækningsområdet for radaren på Stevns. Det er data fra denne, der er den primære kilde til nedbørberegningerne for København.

Om nedbørberegninger og fejlkilder på disse

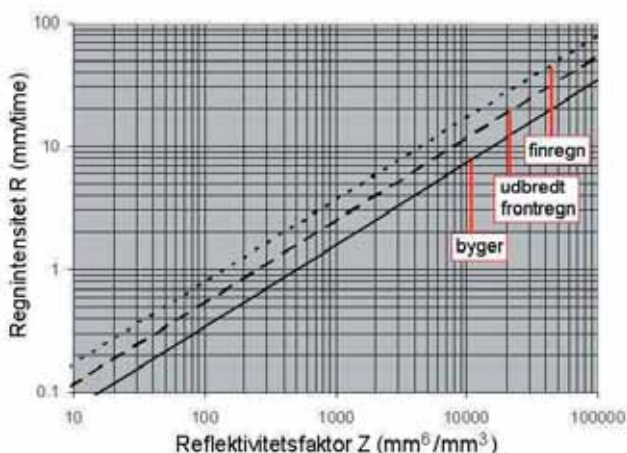
Mindst 6 gange i timen dannes der radarbilleder, hvor hvert billedelement har en rumlig opløsning på op til $2 \times 2 \text{ km}^2$ (en pixel). Et sådant billede giver et snapshot af nedbørfordelingen. Da Z giver den samlede refleksion fra dråber i et stort volumen luft i en eller anden højde over jordoverfladen, mens nedbørintensiteten R bliver målt i et punkt af en nedbørmåler, er det ofte en usikker beskæftigelse at sammenligne øjebliksværdier af Z og R . Usikkerheden afhænger især af nedbørsystemernes rumlige struktur, dvs. de tidslige og rumlige variationer i dråbestørrelsesfordelingen, en variation der kan være meget stor i byger, men er mere begrænset i frontregn.

Som udtrykket for Z antyder, eksisterer der en relation mellem nedbørintensitet R og Z . Talrige empiriske undersøgelser har vist, at relationen er af den generelle form:

$$Z = AR^b$$

hvor A og b er konstanter, der afhænger af, hvilken slags nedbør der er tale om, såsom udbredt regn, sne fra stratiforme skyer, byger eller tordenstorme. Der findes følgelig et stort antal Z - R relationer, og i figur 5 er samlet Z - R relationer for tre almindelige nedbørtyper, der er typiske på vores breddegrader. Det gælder om at vælge den rette Z - R relation til beregning af nedbøren!

En ofte anvendt praksis er at beregne nedbørsum R^* ved at integrere radardata henover passende tidsrum ved brug af standard Z - R relationer såsom $Z = 220R^{1.60}$ for frontregn (Marshall og Palmer, 1948). Selvom denne antagelse om frontregn vil føre til afvigende R^* værdier, hvis nedbørtypen er en



Figur 5. Tre typiske Z - R relationer, der ofte anvendes her i landet til nedbørjustering af radardata.

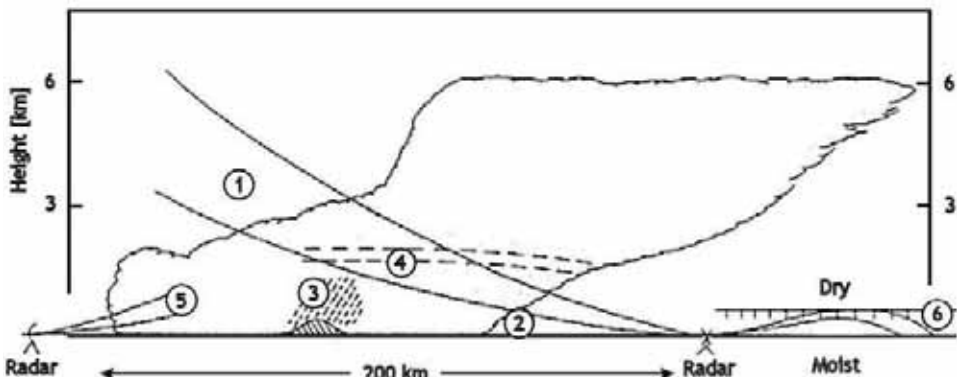
anden, er det muligt via statistiske analyser af bias mellem standardberegnet nedbørsum R^* og målt nedbørsum G at justere R^* ind mod et niveau, der så vidt muligt afspejler de faktiske nedbørforhold. Metoden bygger på at trække oplysninger ind om nedbør og bias indenfor en passende afstand omkring hver pixel i radarbilledet. Desuden skal der tages højde for variationer i observationstætheden og for, at der kan være stor forskel på, hvor repræsentativ en nedbørmåler er i f.eks. byger og udbredt regn. Det er mere kringlet, end det lyder!

Udover den usikkerhed der altid er forbundet med sådanne beregninger, er der en række fejlkilder på selve nedbør- som radarmålingerne. Den største fejlkilde på nedbørmåling kommer af vindens effekt, idet turbulens omkring målerens åbning ved kraftig vind forhindrer en del af nedbøren i at falde ned i måleren og blive målt. På årsbasis er denne fejl typisk tæt på 20 %. I kraftigt regn ved lav vindhastig-

hed er fejlen ubetydelig, så vi kan se bort fra den i tilfældet 2. juli. Fejl af teknisk art kan dog også give problemer med data.

På radarsiden er der fejlkilder, som dels er forbundet til selve radaren, og dels er knyttet til atmosfæriske og udbredelsesfysiske forhold. Radaren kan bidrage til fejl bl.a. som følge af usikkerhed ved antenneforhold, energitab i radarsystemet og bias på elevationen, altså den retning i forhold til horisontalplanen radarstrålen sendes ud i. Det er vigtigt at have styr på retningen, da radarstrålen af forskellige grunde normalt afbøjes med en lidt større krumningsradius end Jordens, så radarmålingerne bliver foretaget gradvis højere oppe i atmosfæren ved stigende afstand fra radaren. På stor afstand er radarmålingerne derfor mindre repræsentative for nedbøren ved jordoverfladen end tættere på, og oftest bør man holde kvantitative nedbørberegninger inden for ca. 100 km fra radaren. Det er muligt med rimelige resultater at justere R^* for denne type fejl.

Refleksionsforholdene i atmosfæren og de meteorologiske processer i nedbørsystemet kan være kilde til betydelige fejl, og de vigtigste fysiske fejlkilder er opsummeret i figur 6. Nedbøren underestimeres, hvis radarstrålen skyder henover lave nedbørområder og overser dem (1), eller der sker fordampning af nedbørpartikler under radarstrålen (2). Forstærkes nedbøren pga. orografi (3), uden at radaren opdager det, fås der for lave nedbørværdier, men hvis radarstrålen rammer et lag smeltende snekrystaller, fås der uforholdsmæssig kraftig refleksion (kaldet bright-band) og for høje værdier (4). I forbindelse med justering af radardata vha. en standard $Z-R$ relation kan fravær af store dråber i finregn mere specielt betyde underestimeret nedbør (5). I vejr-situationer, hvor f.eks. temperaturen modsat det normale stiger med højden, kan afbøjningen af radarstrålen være så kraftig, at den rammer jordoverfladen (6) og resulterer i "falsk nedbør". Dette fænomen optræder som



Figur 6. Oversigt over nogle fejlkilder på radardata: (1) radarstrålen skyder henover overfladenær nedbør, især på lang afstand, (2) fordampning nær jordoverfladen under radarstrålen, (3) orografisk forstærkning af nedbør, som sker under radarstrålen, (4) bright-band effekten, (5) underestimering af intensiteten for finregn pga. fraværet af store dråber, (6) afbøjning af radarstrålen ved specielle atmosfæriske forhold, f.eks. temperaturinversion, så strålen rammer land eller hav (fra Browning, 1978, i Collier, 1989).

oftest under højtryksvejr og er heldigvis fraværende, når det regner.

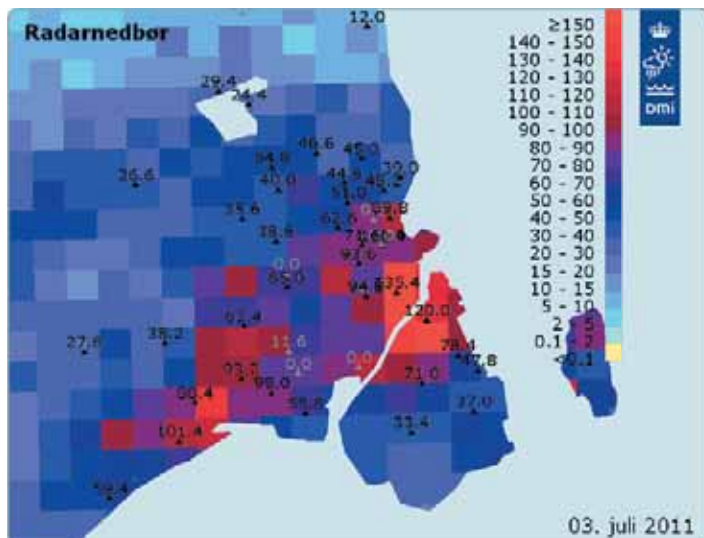
Andre fejlkilder, der kan have stor betydning, er stationære objekter på jordoverfladen. Disse vil tæt på radaren give forholdsvis svag, men konstant støj, eller kan i visse tilfælde helt eller delvist blokere for radarstrålen, så denne taber energi og får nedbøren til at se svagere ud, end den er i virkeligheden. Det gælder derfor om at placere radaren sådan, at den er fri af sådanne støjkilder, om end byggeri, vindmøller og trævækst ad åre kan give problemer. Til sidst skal nævnes, at fremmede sendere i visse tilfælde kan give endog betydelig støj.

Heldigvis kan der gøres meget for at dæmpe fejlkilderne på radar- og nedbørmålinger, og erfaringen viser da også, at der i de fleste tilfælde kan trækkes "noget fornuftigt" ud i den anden ende.

Så meget nedbør faldt der

På omtalte vis er nedbørens mængde og intensitet beregnet for Københavnsområdet. Figur 7 giver en grafisk fremstilling af nedbørfordelingen i området beregnet vha. radar sammen med den samlede døgnnedbør ved et antal nedbørstationer. Det ses, at den indre by samt det nordlige Amager har været hårdest ramt, men at der også er andre områder med store nedbørmængder, f.eks. er der store mængder i et område lidt længere mod vest med op omkring 100 mm.

Et vigtigt forhold at pointere i forståelsen af forskellen mellem de to målemetoder radar og nedbørmåler er, at ingen af systemerne dybest set kan siges



Figur 7. Nedbørmængde i Storkøbenhavn beregnet vha. Stevns radardata for det meteorologiske døgn 2-3. juli 2011 kl. 8 til 8 (sommertid). Talværdierne viser målt nedbør ved nedbørmålere i området. De grå tal er fra fejlbehæftede målere.

at give den sande nedbør: mens radaren giver en fladeværdi, er nedbørmåleren kun et ubetydeligt punkt, der godt nok er nogenlunde præcis i punktet, men ikke kan sige noget om fladen. Tænk på hvor mange nedbørmålere der kan stå i en radarpixel på 4 km²! Hvis man interpolerer sig frem til en nedbørfordeling ud fra punktnedbør, er man nødt til at antage en jævn fordeling af nedbøren mellem nedbørmålerne, og det holder sjældent stik i virkeligheden, når nedbøren er konvektiv. Her kan byer let smutte gennem et tæt net af nedbørmålere, uden at disse opdager, at der er noget i gære.

Pointen er, at der i bygesituationer kan være endog meget store forskelle i nedbørens mængde og intensitet inden for en enkelt radarpixel. Det bringer os frem til kritiske spørgsmål: hvor i en pixel skal en nedbør-

måler stå for at repræsentere nedbørforholdene bedst muligt? Og hvem siger, at midten er det bedste sted? Af figur 7 fremgår, at kun de færreste målere står i midten af en pixel, flere står tæt på eller oveni grænsen mellem to pixels. Hvilken pixel skal en nedbørmåler da knyttes til i beregningerne?

En måde at komme ud over dette problem på er at kæde hver eneste nedbørsumpixel i et radarbillede sammen med nedbørmålere indenfor en passende omegn. Det er muligt at beregne størrelse af denne omegn vha. geostatistiske analyser. Efter en nøjere opskrift tildeles hver måler en vægt – eller betydning - i forhold de andre målere, hvorefter pixlen kan justeres op eller ned til en nedbørmængde, der i højere grad svarer til det faktisk målte. Husk her, at radarnedbøren til at begynde med er beregnet vha. en

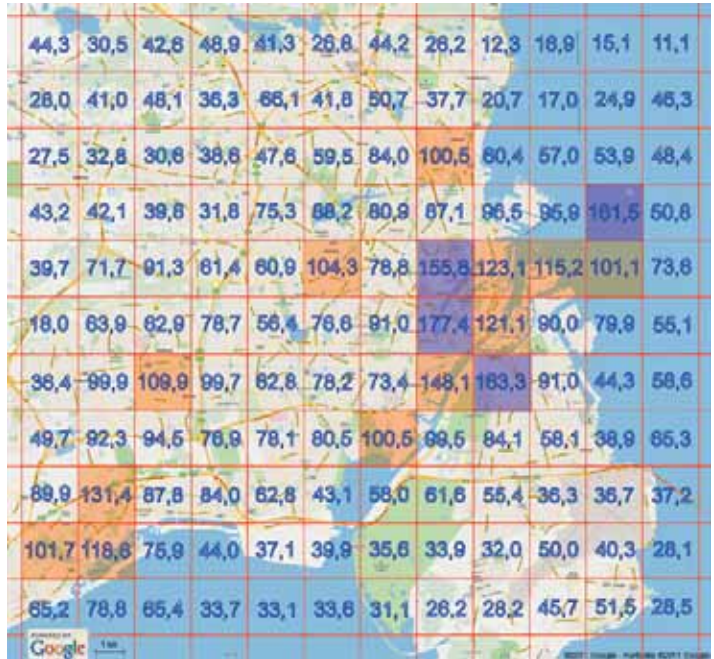
standard Z-R relation, som ikke nødvendigvis repræsenterer den aktuelle vejr-situation. Metoden gør, at der praktisk taget altid vil være et offset (andet ville være "snyd") mellem en nedbørmåling og den pixel, måleren står i.

Det fremgår af figur 7, at selv med et tæt net af nedbørmålere i Storkøbenhavn er det ikke muligt at give en fyldestgørende beskrivelse af nedbørfordelingen. Det står klart, når der sammenlignes med figur 8, der viser talværdierne for radarnedbørmængden i hver enkelt pixel. Ifølge radaren er der f.eks. et område (en pixel) i den sydvestlige del, der har fået omkring 130 mm. Den nærmeste nedbørmåler giver 88,4 mm jfr. figur 7, men det bemærkes, at måleren står akkurat på grænsen mellem to pixels, og den har åbenbart ikke haft en chance for at opdage cellen umiddelbart mod øst.

Et rigtig godt eksempel er de pixels, der ligger omkring nedbørmåleren i Botanisk Have. Denne måler var dagens topscorer med 135,4 mm. Det skal altid, specielt for konvektiv



Figur 9. Radarnedbør for pixels omkring nedbørmåleren i Botanisk Have (rød prik).



Figur 8. Nedbørmængde i udsnit af Storkøbenhavn. Lilla og orange gridceller markerer nedbørmængder på over hhv. 150 og 100 mm. Kortudsnit: Google Maps.

nedbør, med i vurderingen af radarnedbør, at da en pixel giver et middeltal for et areal, kan der lokalt sagtens være endnu større regnmængder, end middeltallet angiver. Radarnedbøren i de fire pixels omkring den pågældende nedbørmåler er derfor meget plausibel, især fordi måleren ligger omtrent i krydsfeltet mellem de fire pixels (figur 9).

Man vil måske bemærke en forskel i gridcellernes placering mellem figur 7 og 8. Det har fig. forklaring: mens figur 8 er baseret på positioner fra Stevns radaren, som giver de rigtigste pixelkoordinater, er figur 7 et udsnit fra et kompositbillede, som er sammensat af data fra alle DMI's radarer. Der kan ved

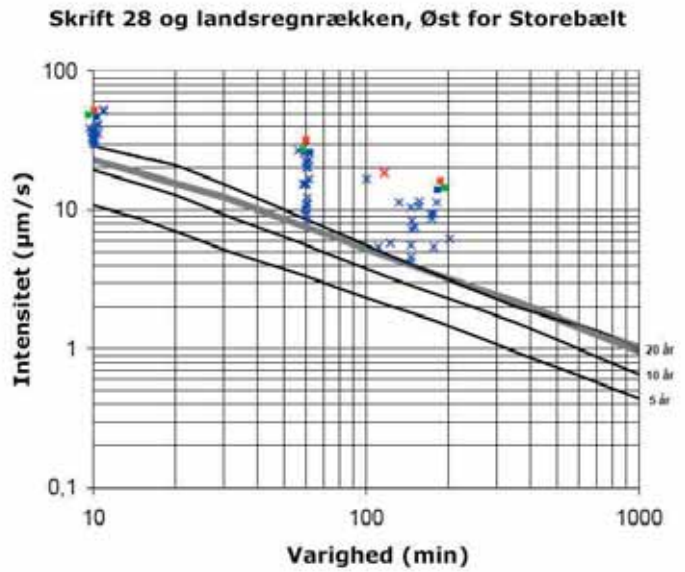
transformation af Stevnsdata over i kompositbilledet ske en mindre forskydning på op til omkring en halv pixel. Denne forskydning har ingen praktisk betydning for beregningerne.

Til sidst skal nævnes, at der ifølge figur 8 har været et mindre antal lokale områder med særlig store regnmængder: især et i syd-vest og så det markante over den indre by. Her er der tre pixels med mere end 150 mm, heraf en med helt op omkring 177 mm!

Hvor kraftig var nedbøren så?

Nu er regnmængder i sig selv uinteressante set i et oversvømmelsesperspektiv. Det afgørende for, om regnen giver problemer,

Figur 10. Regnintensiteter for forskellige varigheder sammenlignet med regnkurver fra SVK-skrift 28 [SVK 2006] (grå kurve) samt landsregnkurverne [SVK 1974] (sorte kurver) for regionen Øst for Storebælt. Figuren viser gentagelsesperioden for forskellige intensiteter og varigheder. Der er vist intensiteter henover 10 og 60 minutter samt hele hændelsen for de 3 højeste radarberegnete intensiteter for pixels omkring Botanisk Have (grøn, blå og rød firkant) samt nedbørstationer med 10 minuts intensiteter $\geq 30 \mu\text{m}/\text{sek}$ (blå kryds). Det røde kryds angiver en 2 timers intensitet for nedbørmåleren i Botanisk Have.

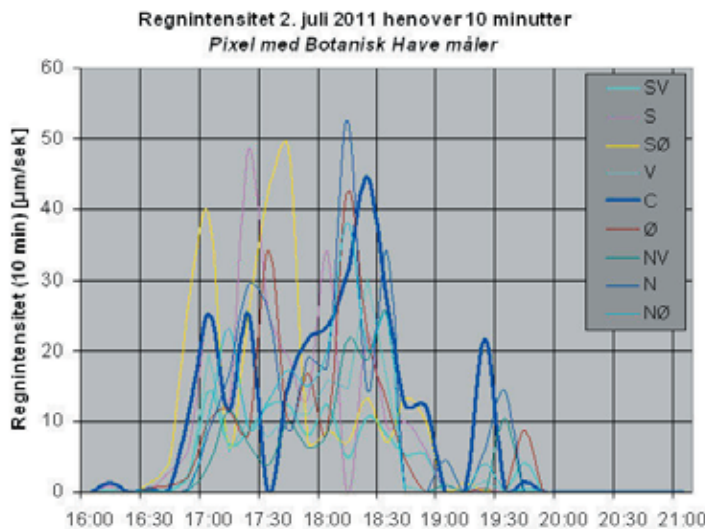


er: (i) hvilke muligheder har vandet for at strømme af og samle sig, (ii) over hvor lang tid er regnen faldet, (iii) hvor kraftig har den været i de enkelte tidsafsnit i hændelsens løb. Der er derfor beregnet regnintensiteter for forskellige varigheder, hvorefter disse er sat i forhold til de såkaldte landsregnrækker, der angiver, hvor ofte forskellige intensiteter forekommer statistisk set for en given lokalitet. Intensiteten angives i $\mu\text{m}/\text{sek}$, en i afløbsteknisk sammenhæng ofte benyttet enhed.

Figur 11 Radarberegnet regnintensitet henover 10 minutter for 9 pixels omkring Botanisk Have i det indre af København. Bemærk at tiderne er i utc, som er to timer bagud i forhold til dansk sommertid. Den fremhævede blå streg er for pixelen med 177,4 mm radarnedbør, de øvrige pixels er placeret sydvest, vest, nordvest osv. for denne.

Figur 10 viser nedbørintensiteter for hændelsen i forhold til statistisk hyppighed af regnintensitet for 5, 10 og 20 års hændelser. For Botanisk Have er vist radarberegnete intensiteter

og en målt intensitet henover 2 timer samt intensiteter for de nedbørmålere i Storkøbenhavn, der har 10 minutters intensiteter på $30 \mu\text{m}/\text{sek}$ eller mere. Det interessante er, at nedbøren om-



kring Botanisk Have og indre by ser ud til at være den kraftigste, om end nogle få stationer har 10 og 60 minutters intensiteter på omkring samme niveau. Desuden har måleren i Botanisk Have en 2 timers intensitet, der svarer pænt til de radarberegne.

Intensitetsniveau er ekstremt, der hvor det går løs. Det usædvanlige er ikke kun intensiteten på den korte tidsskala, men også at det blev ved i så forholdsvis lang tid. Hændelsen har de fleste steder haft en samlet udstrækning på godt to og op imod tre timer med konstant regn af varierende styrke. Figur 11 viser forløbet af regnintensiteten for de 9 pixels omkring Botanisk Have. Der ses store variationer i intensiteten, hvilket kan have at gøre med en mulig passage af konvektive celler som omtalt af Niels Woetmann Nielsen i den efterfølgende artikel. Intensiteten henover 10 minutter når toppen ved lidt over 50 $\mu\text{m}/\text{sek}$, godt 30 $\mu\text{m}/\text{sek}$ henover en

time, mens den højeste værdi for hele hændelsen er 15,78 $\mu\text{m}/\text{sek}$. Dette fremgår af figur 12, som viser et tilsvarende diagram, men for 3 timer, eller i praksis for hele hændelsen. Der er tale om helt ekstreme og sjældne intensiteter, men det er vanskeligt at bedømme den statistiske sandsynlighed for disse. Af diagrammet i figur 10 må det dog stå klart, at vi er ude i hyp-pigheder sjældnere end én gang pr. århundrede.

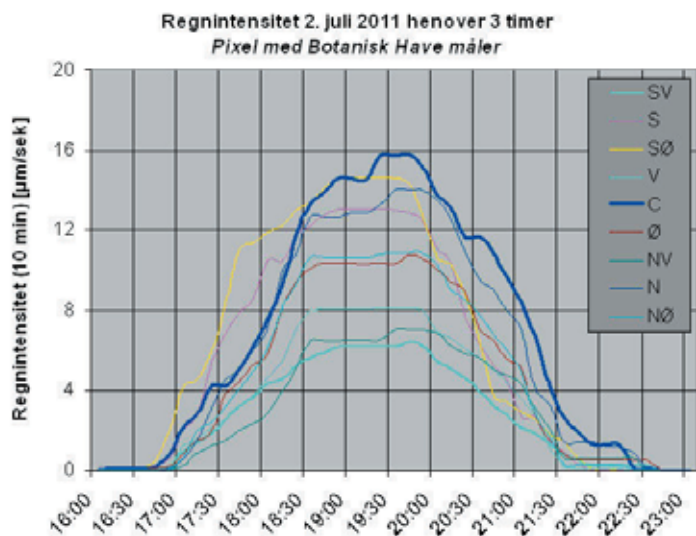
Tanker om estimatets usikkerhed

Der er flere metoder til at vurdere usikkerheden i beregningerne. En er at sende radarnedbøren gennem en model for afløbs-systemerne for at se, hvor tæt på den målte afstrømning en beregnet ditto kommer. Dette vil dog føre for vidt her, så der benyttes en anden og mere traditionel tilgang til evaluering: sammenligning mellem målt og beregnet nedbør.

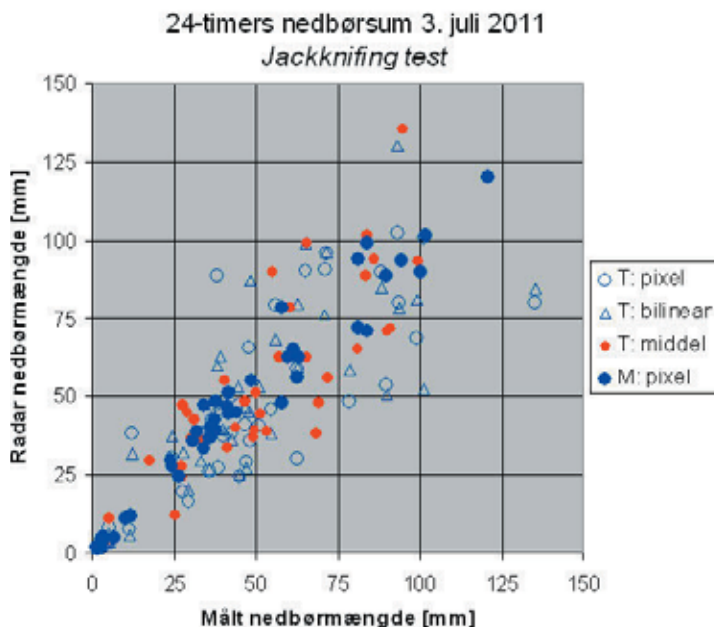
Det er dog vanskeligt at sammenligne datatyper, der er så forskellige som pærer og bananer: det er punkt-areal diskussionen om igen. Det er nok de færreste af nedbørmålerne, der står repræsentativt i de enkelte pixels. Derfor må vi gøre den antagelse, at den støj der må være mellem de to målemetoder, sandsynligvis er tilfældig og ikke systematisk. Det betyder, at hvis bare der er tilstrækkeligt med nedbørmålere i analysen, bliver verifikationen også forholdsvis robust.

Til verifikation kræves imidlertid uafhængige data, altså data som har været holdt ude af beregningerne. Det giver det prekære problem, at hvis et passende antal nedbørmålere skal reserveres til en sådan test, er det resterende antal målinger i DMI's nuværende nedbørnet formentlig for tyndt til valide beregninger. Derfor er der lavet en såkaldt jackknifing test, som går ud på efter tur at fjerne en nedbørmåling, hvorefter resten af data bruges til at beregne den fjernede uafhængige værdi. Beregningerne gentages for hver eneste nedbørmåler.

Testen er foretaget for den samlede regnmængde, men ikke for intensiteterne. Det antages, at hvis den beregnede mængde er signifikant, er det også rimeligt at regne intensitetsberegningerne for realistiske. Figur 13 viser resultatet af testen for 44 nedbørmålere i Københavnsområdet.



Figur 12. Som figur 11, men for 3-timers rullende middelintensitet.



Figur 13. Resultatet af en jackknifing test. De blå punkter er den modelberegnete radarnedbør, mens de røde punkter og åbne cirkler og trekanteder er tre forskellige bud på, hvordan radarnedbørmængden omkring en nedbørmåler kan beregnes: pixelværdi, bilinear resampling eller middelværdi.

De blå punkter viser de modelberegnete værdier, svarende til dem der er vist i figur 8. De øvrige punkter viser testresultatet for tre forskellige måder at udtrække nedbørmængden på fra radarbilledet. Den ene måde er at tage den pixel, nedbørmåleren står i (pixel). Den anden er at arealvægte med nedbørmængden i nabopixels for at tage højde for, at en nedbørmåler kun sjældent står i midten (bilinear). Den sidste er at tage middelværdien af nabopixels inkl. den pixel, nedbørmåleren står i (middel).

Testresultatet for de tre metoder ses af tabel 1. Det ses, at modellen kan forklare hovedparten af variationen mellem målt og beregnet nedbør, svarende til en god korrelation. Afvigelsen mellem målt og beregnet nedbør er

opgjort på en lidt speciel måde. Da de store rumlige variationer i nedbørens mængde, også internt i de enkelte pixels, gør det vanskeligt præcist at sammenligne punkter med arealer pixel for pixel, er det valgt at anlægge en mere arealmæssig betragtning, nemlig at holde den totale nedbørsum for de to målemetoder op imod hinanden. Det svarer til at tage den samlede

	R ²	r	Målt	Beregnet	Afvigelse
pixel	0,6720	0,8197	2143,6	2080,3	-2,95 %
bilinear	0,6642	0,8150		2160,7	0,80 %
middel	0,7869	0,8870		2123,2	-0,95 %

Tabel 1. Resultatet af en jackknifingtest af radarnedbørberegninger 2-3. juli 2011 kl. 6 til 6 utc. R² = forklaringsgrad, r = korrelationskoefficient, Målt = samlet sum for 44 nedbørmålere, Beregnet = samlet radarnedbørsum for 44 pixels, Afvigelse = % afvigelse mellem målt og beregnet nedbør; pixel, bilinear og middel er forklaret i teksten.

højde af de to nedbørsøjler, når bidragene fra de enkelte punkterarealer er lagt ovenpå hinanden. Afhængig af hvordan den beregnede nedbørmængde trækkes ud af radarbilledet, ses der kun en lille afvigelse mellem målt og beregnet totalsum.

Nu mangler der kun en enkelt test. Radaren er en logaritmisk receiver, hvilket vil sige, at enhver forøgelse af dBz-værdien med én giver en stadig større tilvækst i Z og R. Ved lave værdier giver en forøgelse af dBz en tilvækst på R på få 10' dele mm/time, men ved høje værdier er forøgelsen på mange mm/time pr. dBz spring. Derfor er radarens evne til at bestemme regnintensiteten nøjagtigt dårligere ved høje regnintensiteter. Hvilken effekt har det på beregningerne? Opløsningen på radardata er 0,5 dBz svarende til 1 count. Figur 14 viser en følsomhedsanalyse af, hvilken effekt det har på intensitetsberegningerne at øge eller mindske den målte refleksion med én count. Der ses en tydelig effekt særlig ved høje intensiteter, men da denne langt fra er dramatisk, og da jackknifingtesten viser signifikante resultater med acceptable afvigelser fra de målte nedbørmængder, må radarberegningerne alt i alt regnes for rimeligt pålidelige.



Figur 14. Følsomhedstest af radarberegnet regnintensitet for den pixel, der indeholder nedbørmåleren ved Botanisk have. Se tekst for forklaring.

Hvad kan vi lære af dette?

Regnen den 2. juli 2011 overgår næsten fantasien og står som den vel nok værste monsterregn, Danmark endnu har oplevet. Som følge af de forventede klimaændringer regnes monsterregn fra mange sider for at være fremtidens virkelighed. Det er realiteter, der allerede nu bør tages forholdsregler for, og der udføres et stort analysearbejde rundt om for at finde ud af, hvad der bør gøres for at imødegå følgevirkningerne af et ændret nedbørklima. Forventet øget grundvandsstand vil gøre flere områder uegnede til beboelse, og dette sammen med den øgede risiko for oversvømmelser kan gøre det nødvendigt at opgive eksisterende beboelser.

Det bliver om muligt endnu vigtigere at forudsige og dokumentere kraftig regn. Radarmålinger anviser veje til sådanne oplysninger. Når nedbørparametre er beregnet, mangler der principielt "kun" at undersøge, om de hydrologiske betingelser for oversvømmelser har været eller vil være til stede i en given situation. Er det lokale afvandingsområde af en sådan beskaffenhed og i en sådan tilstand, at store vandmængder kan opsuges og afstrømning forsinkes? Er afløbssystemer, reguleringsmekanismer og bassinkapaciteter i byområder i stand til at forsinke og tilbageholde vandet, så oversvømmelser undgås eller minimeres? Forskningsprojekter, som DMI er med i, søger at afklare flere af disse spørgsmål.

Litteratur

Battan, L. J. (1973): Radar observation of the atmosphere. The University of Chicago Press, Chicago.

Collier, C. G. (1989): Applications of weather radar systems. Ellis Horwood, p. 294.

Marshall, J. S. and Palmer, W. McK. (1948): The distribution of raindrops with size. *J. Meteor.*, vol. 5, pp. 165-166.

SVK (1974): Bestemmelse af regnrækker. Dansk Ingeniørforening, IDA Spildevandskomiteén. Skrift nr. 16.

SVK (2006): Regional Variation af Ekstremregn i Danmark – Ny bearbejdning (1975-2005). Dansk Ingeniørforening, IDA Spildevandskomiteén. Skrift nr. 28.