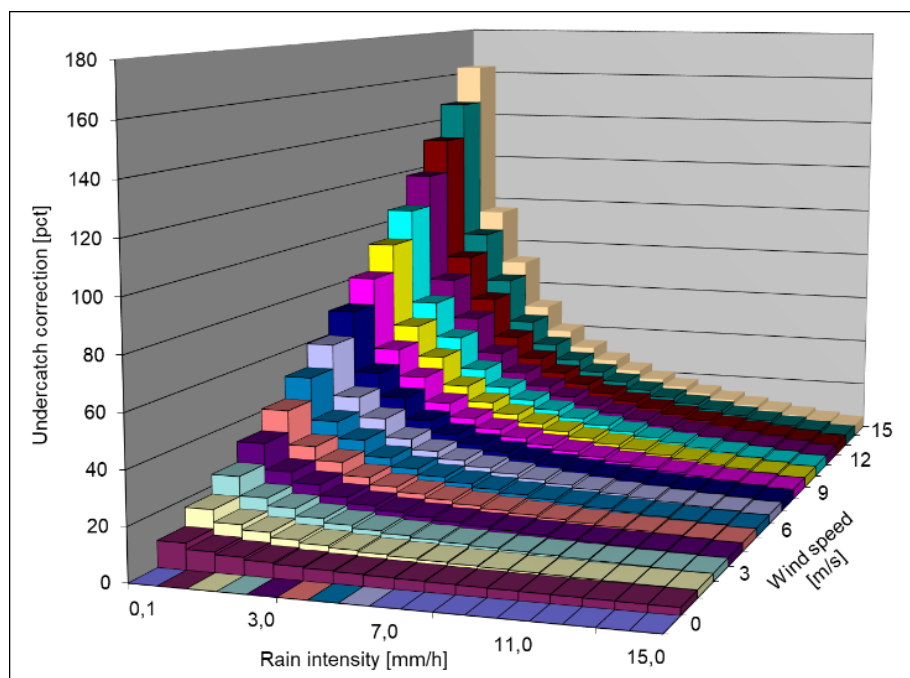




# Korrektion af observeret nedbør i Danmark

## DMI-rapport 21- 39

Flemming Vejen, Henrik Vedel og Michael Scharling



## Kolofon

<b>Serietitel</b>	DMI-rapport 21-39
<b>Titel</b>	Korrektion af observeret nedbør i Danmark
<b>Undertitel</b>	
<b>Forfatter(e)</b>	Flemming Vejen, Henrik Vedel og Michael Scharling
<b>Andre bidragsydere</b>	
<b>Ansvarlig institution</b>	Danmarks Meteorologiske Institut
<b>Sprog</b>	Dansk
<b>Emneord</b>	Pluvio, Hellmann, observeret nedbør, korrigeret nedbør
<b>URL</b>	<a href="https://www.dmi.dk/publikationer/">https://www.dmi.dk/publikationer/</a>
<b>ISSN</b>	2445–9127
<b>Versionsdato</b>	1-3-2021
<b>Link til hjemmeside</b>	<a href="http://www.dmi.dk">www.dmi.dk</a>
<b>Copyright</b>	Danmarks Meteorologiske Institut

## Indhold

<b>1</b>	<b>Abstract</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Resumé</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Introduktion</b> .....	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Datagrundlag</b> .....	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>Analysemetode</b> .....	<b>7</b>
<b>6</b>	<b>Resultater</b> .....	<b>9</b>
	6.1 Beregning af parametre til brug for analyser .....	9
	6.2 Korrektion af regn .....	9
	6.3 Korrektion af sne .....	14
	6.4 Korrektion af blandet nedbør (slud eller regn og sne) .....	16
<b>7</b>	<b>Konklusion</b> .....	<b>17</b>
<b>8</b>	<b>Referencer</b> .....	<b>18</b>
<b>9</b>	<b>Tidligere rapporter</b> .....	<b>19</b>

## 1 Abstract

## 2 Resumé

I denne rapport fokuseres der på udvikling af nye empiriske konstanter i korrektionsmodellen for sne, blandet nedbør og regn, så nedbør målt vha. Pluvio<sup>2</sup> kan korrigeres for effekten af turbulens omkring nedbørmåleren. Til brug herfor er der analyseret detaljerede nedbørmålinger og relevante meteorologiske parametre fra et testfelt drevet af HOBE-projektet 2009-2019. Korrektionsmodellen har brug for målinger af vindhastighed, lufttemperatur, regnintensitet og nedbørtype.

Imidlertid var datagrundlaget utilstrækkeligt for både sne og regn, da især vindregimet ved testfeltet var for snævert til at udvikle en model med et gyldighedsområde, der er repræsentativt for almindelige vejrforhold i Danmark. Usikre estimater for regnintensitet gjorde det desuden umuligt at etablere en model, der var fysisk plausibel i forhold til vind og regnintensitet.

Der er for regn tidligere fundet en generel underestimering på 2,15 % for Pluvio i forhold til Hellmann baseret på parallelle målinger med Hellmann og Pluvio for et stort antal nedbørstationer i perioden 2009-2010. Da korrektionsmodellen skal kunne virke i praksis, var det nærliggende at tilføje denne underestimering som en ny konstant i den eksisterende korrektionsmodel for Hellmann svarende til at justere for bias på korrektionen for Pluvio. Dette begrundes med, at korrektionerne for data 2009-2010 er foretaget med NOVANA-modellen, der benyttes i praksis for nedbørmålere, der er placeret "realistisk", dvs. som de faktisk står rundt om i landet med de udfordringer, der er mht. læforhold og turbulens lokalt.

For sne antyder HOBE-data en overestimering af korrigeret nedbør, men der er ikke nok data til at etablere nye empiriske konstanter til korrektion af snenedbør. For 47 sneobservationer kunne der konstateres en overestimering af snekorrektionen på ca. 11 %. Der skal dog flere data til, før nye og tilstrækkeligt sikre empiriske konstanter, eller alternativt en generel faktor for overestimering, kan beregnes.

Afslutningsvis var der hverken for regn eller sne tilstrækkeligt med data til at udvikle nye empiriske konstanter til brug for korrektion af nedbørmålinger med Pluvio. Det anbefales, at der på sigt udvikles nye konstanter på basis af testfeltmålinger ved lokaliteter, hvor forholdene er mere repræsentative for det generelle vindklima i Danmark.

## 3 Introduktion

Ved anvendelse af nedbørmålinger til opgørelse af vandbalance er det godtgjort, at det er nødvendigt at korrigere nedbørmålingerne for tab af nedbør for at få vandbalancen til at gå op (Plauborg et al, 2002). Turbulens omkring måleren er den primære faktor til dette tab. Internationalt er der udviklet mange modeller til en sådan korrektion.

I Danmark benyttes en model, der forener korrektion af sne, slud og regn for vindens effekt i en og samme model, der er sammensat af et led til korrektion af regn og et andet til korrektion af sne. Delmodellen for regn er udviklet i et WMO-projekt i 1970'erne på basis af målinger i Danmark (Allerup, Madsen, 1980, Sevruk, 1982, Sevruk, Hamon, 1984), mens den samlede model, eller "comprehensive correction model" (CMM), for alle typer nedbør inkl. sne er udviklet i et WMO-projekt 1985-1998 på basis af data fra Jokioinen i Finland (Allerup, Madsen, Vejen, 1997). Resultaterne af WMO-projektet for korrektion af snenedbør er dokumenteret i Goodison, Louie, Yang, 1998). Modellen kan korrigere sne, regn og blandet nedbør (slud, eller sne og regn i måleperioden), hvis vindhastighed, regnintensitet, lufttemperatur og andelen af nedbør faldet som sne er kendt for perioden med nedbør (Allerup, Madsen, Vejen, 1997).

Selvom snemodellen er udviklet på basis af data fra Finland og måske ikke er repræsentativ for danske klimaforhold, er det antaget, at korrektionsniveauet for måling af sne og slud i Danmark er på samme niveau i forhold til vind og temperatur som i Finland. Denne antagelse kan diskuteres, idet sne her i landet formentlig er vådere og tungere og dermed mindre vindpåvirket end i Finland. Hvis det er tilfældet, ville det betyde systematisk overkorrektur af snenedbør i Danmark, og der bør i så fald udvikles nye empiriske konstanter for sne i Danmark.

En nedbørmålers design er af stor betydning for dens aerodynamiske egenskaber og dens evne til at opsamle nedbør (Sevruk, Klemm, 1989). Bl.a. har eksperimenter i en vindtunnel vist, at målerens åbningsareal og målerkantens længde har betydning (Sevruk, Hertig, Spiess, 1989).

Nedbørskorrekturen skal derfor være målerspecifikke. Der er udviklet empiriske konstanter til CCM, så der kan korrigeres målinger fra Geonor med Alter vindskærm, Rimco uden skærm og Hellmann (Førland et al, 1996). Der er ikke beregnet konstanter for Pluvio<sup>2</sup> (herefter blot benævnt Pluvio), som er hjørnestenen i DMI's automatiske nedbørnet, men det er antaget, at konstanterne for Hellmann kan repræsentere Pluvio, idet der i produktinformation for Pluvio har været angivet en målenøjagtighed på  $\pm 5\%$  i forhold til Hellmann uden angivelse af evt. bias (OTT, 2007). Der er dog siden fremkommet evidens for, at der er mere turbulens omkring en måler af form som Pluvio end omkring en tønndeformet måler som Hellmann (Colli et al, 2018). Det har dog hidtil været uvist, hvor meget, eller lidt, dette betyder for korrektionsniveauet.

Ud over vindeffekten er nedbørmålingerne også udsat for et tab af nedbør som følge af fordampning (fra nedbørens fri vandoverflade i måleren) og wetting (en lille del af nedbøren bliver hængende inde i måleren pga. adhæsion og fordamper). Disse fejlkilder er adresseret i flere WMO-undersøgelser af manuel måling af nedbør (Sevruk og Hamon, 1984, Goodison, Louie, Yang, 1998). Korrektion for wettingtab for Hellmann kan beregnes vha. en model, der tager højde for tabets årstidsvariation i Danmark, mens korrektion for fordampningstab kan ignoreres, da dette er ubetydeligt for denne måler (Allerup og Madsen, 1979). For automatiske målere forholder det sig anderledes. Ifølge Rasmussen et al (2012) er nedbørmålere, der som Pluvio vejer nedbøren, ikke påvirket af wetting i modsætning til volumetriske nedbørmålere som Hellmann. Der er ikke fundet litteratur om, hvorvidt målere som Pluvio trods alt har et wettingtab, hvor begrænset dette end måtte være, og i givet fald hvilken størrelse det har.

Korrektionsmodellens matematiske struktur er fastlagt ved analyser af empiriske data for både sne, slud og regn (Allerup, Madsen, Vejen, 1997). Arbejdet med korrektioner handler derfor *ikke* om at finde en ny struktur for modellen, men om at bestemme nye empiriske konstanter, der giver en bedre beskrivelse af bias på nedbør målt med Pluvio. Dette er vigtigt, da DMI's manuelle nedbørnet bestående af Hellmann-målere ved årsskiftet 2010/2011 blev erstattet af et automatisk net med Pluvio som hjørnesten.

Der er således flg. målsætning for afklaring af korrektionsforholdene for Pluvio:

- Etablering af nye empiriske konstanter i korrektionsmodellen for Pluvio baseret på måling af sne og regn i Danmark med henholdsvis standardopstillede Pluvio og referencemålere.

## 4 Datagrundlag

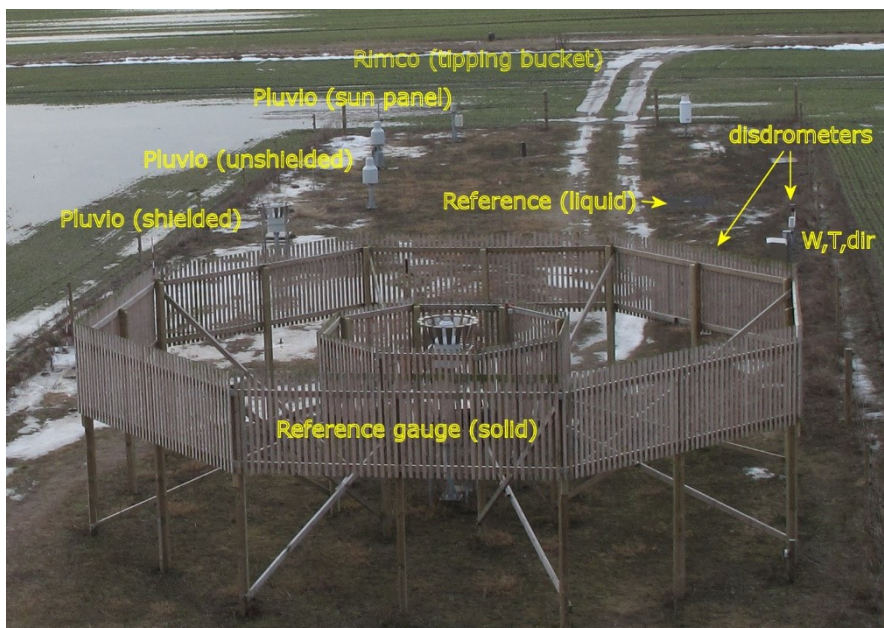
I forbindelse med forskningsprojektet HOBE (Jensen, Illangasekare, 2011) blev der etableret et målefelt i Voulund i Vestjylland (figur 1), hvor der i perioden 2009-2019 er målt en række meteorologiske parametre, herunder måling af nedbør med Pluvio uden skærm og Rimco samt referencemålere for hhv. sne og regn. Der er målt vindhastighed i samme højde som nedbørmålerne med 6 anemometre samt lufttemperatur og vejrtype. I det meste af perioden er vejrtypen målt med et disdrometer. Det er et instrument, der vha. optiske metoder kan detektere dråbestørrelsesfordelingen og ud fra analyse af denne kan give en pålidelig bestemmelse af

nedbørens type. Tidsopløsningen er et minut på de fleste parametre, bl.a. nedbør og vejrtype. På baggrund af disse data kan korrektionsforholdene for Pluvio analyseres.

Referencemåleren for regn er en Pluvio placeret i et hul på en sådan måde, at måleråbningen er præcis i terrænhøjde, hvilket eliminerer forstyrrende turbulens omkring måleren. Hullet er dækket med et 2×2 m<sup>2</sup> metalgitter med målerens åbning placeret i midten for at forhindre splash-in ved relativt kraftig nedbør. En sådan opstilling er en international reference for måling af regn (Sevruk, Hamon, 1984) og kaldes en "pit gauge".

Referencemåleren for sne er en Pluvio forsynet med Tretyakov-skærm i 3 m højde, der er omgivet af to koncentriske "cirkler" af læhegn i op til 3,5 m højde. Deres funktion er dels at dæmpe turbulensen omkring måleren mest muligt, og dels at hindre snefygning i at korrumpere målingerne. Dette er den internationale referencemåler for sne (Goodison, Louie, Yang, 1998, Nitu et al, 2018) og kaldes en "Double Fence Intercomparison Reference" (DFIR), eller blot "DFIR-måleren".

Læhegnene kan dog ikke dæmpe vindens effekt på snemålingen fuldstændigt. Yang (2014) har præsenteret transferfunktioner for snedata målt med DFIR og en såkaldt "bush gauge"<sup>1</sup>, og disse benyttes til at korrigere DFIR for vindeffekten. Ved lave snemængder måler DFIR omtrent den sande snemængde, men ved 6-7 m/s måler DFIR 93 % i forhold til "bush gauge". Korrektionen er valid op til 9 m/s.



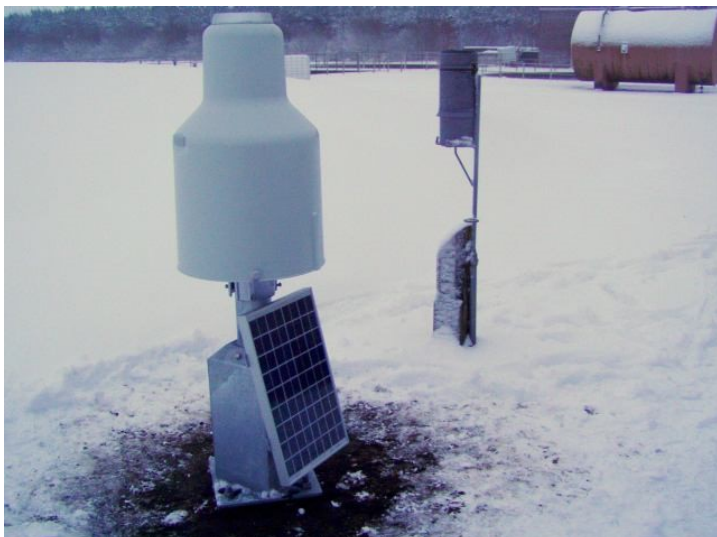
**Figur 1.** HOBE-testfeltet i Voulund, Vestjylland. W, T og dir angiver måling af vindhastighed, lufttemperatur og vindretning. Nedbør er målt med Pluvio (med skærm, uden skærm og med solpanel) og Rimco. Nedbørtypen er målt med to disdrometre.

Pluvio-måleren er fuldautomatisk (figur 2) og giver en præcist afgrænset observationsperiode. I figuren er vist en Pluvio, i øvrigt med solpanel, som er den måde, Pluvio er installeret på ved de af DMI's nedbørstationer, der er uden ekstern strømforsyning. Måleren er en såkaldt vejemåler, hvor nedbørens opsamles i en beholder inde i måleren. Denne opsamlingsenhed er i princippet placeret

<sup>1</sup> En bush gauge regnes for at være den sande referencemåler for sne. Der findes så vidt vides kun én i hele verden, og den er placeret i Valdai, Rusland. Referencemåleren består af en manuel Tretyakov-måler 2 m over terræn, som er placeret i et 3 ha stort område bevokset med 2-4 m høje buske. Indenfor 12 m diameter beskæres buskene rutinemæssigt til 2 m højde, hvilket sikrer optimale læforhold. Denne måler er accepteret som den mest optimale referencemåler for sne (WMO/CIMO, 1991). Nær måleren er der placeret to DFIR-målere (Goodison, Louie, Yang, 1998).



på en vægt, som består af en avanceret vejecelle, der giver nedbørmængden i en opløsning på 0,01 mm. Måleren er forsynet med frostvæske, hvilket betyder, at fast nedbør som sne straks bliver fastholdt i måleren og ikke kan blæse op af den igen. En avanceret algoritme i måleren sørger for at filtrere falske nedbørsignaler fra. Sådanne kan skyldes urenheder, der lander i måleren, eller vibrationer fra vindpåvirkning. Til korrektion for vindeffekten for Pluvio er benyttet empiriske konstanter for Hellmann-måleren, som er vist i figur 2.



**Figur 2.** Opstilling af Hellmann og Pluvio ved Ribe Rensningsanlæg. Bemærk det sydvendte solpanel, der sørger for opladning af batteri og dermed strømforsyning. Set fra VSV den 6/1-2010.

## 5 Analysemetode

Formlen for korrektion af nedbør er veletableret. Data fra HOBE-testfeltet analyseres i forhold til denne model for sne og regn. Regnmodellen analyseres i forhold til målte værdier af nedbørmængde ( $P_m$ ), referencemålinger for regn ( $P_{pit}$ ), regnintensitet ( $I$ ), og middelvindhastighed under nedbør ( $V_{midd}$ ), mens snemodellen analyseres i forhold til målt nedbørmængde ( $P_m$ ), referencemålinger af snenedbør ( $P_{DFIR}$ ), middelvindhastighed under nedbør ( $V_{midd}$ ) og middel af lufttemperatur under nedbør ( $T_{midd}$ ).

Analyserne for regn udføres for døgnværdier, hvilket er konsistent med det datagrundlag, der blev benyttet til udvikling af den eksisterende korrektionsmodel for regn (Allerup og Madsen, 1980). Desuden er det denne opløsning, der arbejdes med i leverancer til NOVANA<sup>2</sup>. Analyserne for sne udføres for 12-timers perioder, hvilket er konsistent med udvikling af delmodellen for sne (Allerup, Madsen og Vejen, 1997).

Nedbørtyper for en given måleperiode opgøres ved at beregne et indeks,  $\alpha$ , der angiver, hvor stor en del af nedbøren, der er faldet som sne. Hvis  $\alpha = 1$ , har al nedbøren været sne, hvis  $\alpha = 0$  har det været regn, og ellers blandet nedbør (sne og regn, og/eller slud). Nedbørtyper klassificeres ud fra disdrometerdata, og hvis disse data mangler ud fra lokalt målte temperaturer og analyse af nedbørtype og vejr-situation vha. nærliggende vejrstationer.

Forholdet mellem referencemålinger af mængden af sne/regn og nedbørmængden målt med en vilkårlig nedbørmåler er givet ved korrektionsfaktor  $K = P_{ref}/P_m$ , hvor  $P_{ref}$  = nedbørsum i referencemåler, som er  $P_{pit}$  for regn og  $P_{DFIR}$  for sne, og  $P_m$  = nedbørsum målt i Pluvio.

<sup>2</sup> Det Nationale Overvågningsprogram for Vandmiljø og Natur. Se <https://mst.dk/natur-vand/overvaagning-af-vand-og-natur/>.

Korrektionsmodellen forudsiger  $K$  som funktion af vindhastighed,  $V$ , lufttemperatur,  $T$ , regnintensitet,  $I$ , og nedbørtype,  $\alpha$ . Korrektionsmodellens struktur er allerede etableret for sne, blandet nedbør og regn (Allerup, Madsen og Vejen, 1997):

$$K_{\alpha} = \alpha k_s + (1 - \alpha)k_r \quad \text{hvor} \quad \begin{cases} k_r = \exp(a_1 V + a_2 \ln I + a_3 V \ln I + a_4) \\ k_s = \exp(b_1 V + b_2 T + b_3 VT + b_4) \end{cases} \quad (1)$$

Hermed kan korrektionsfaktoren,  $K_{\alpha}$ , beregnes for enhver nedbørtype,  $\alpha$ . De empiriske konstanter  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  og  $b_4$  kan fastlægges for en hvilken som helst nedbørmåler, hvis blot der er adgang til samhörrende målinger fra denne og referencemålere for sne og regn. Der er for Rimco, Geonor og Hellmann allerede fastlagt sådanne konstanter for regn (Allerup og Madsen, 1980, Førland et al, 1996) og sne (Allerup, Madsen og Vejen, 1997, Førland et al, 1996).

Det gælder således "blot" om at finde nye empiriske konstanter  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  og  $b_4$  for Pluvio, hvor der for kombinationer af  $I$ ,  $V$  og  $T$  etableres en relation mellem beregnet og målt korrektionsfaktor,  $K_{\alpha}$ . Dette gøres ved korrelationsanalyse, der sørger for at minimere forskellen mellem beregnet og målt  $K_{\alpha}$ . Når de nye konstanter er etableret, analyseres forskellen mellem nedbør korrigeret vha. beregnet  $K_{\alpha}$  og sand nedbør målt med referencemåleren.

Data er underkastet en serie automatiske og manuelle kvalitetstests. For regn er der en del outliers, hvor enten  $P_m \gg P_{pit}$  eller  $P_m \ll P_{pit}$ . De fleste af disse kan spottes automatisk ved at teste, om den aktuelle forskel mellem målt og beregnet  $k_r$  er realistisk i forhold til, hvad korrektionsmodellen forudsiger. Herefter vurderes det, om observationen er fejlbehæftet. Samme type kvalitetscheck er udført for sne og slud ud fra vurderinger af målt og beregnet  $k_s$ .

Idet testfeltet er et målefelt for test af alle vandbalancens komponenter, er det også accepteret, at markvanding indgår som en komponent på testfeltet. Nedbørmålinger i perioder med vanding er frasorteret. Data fra pit-måleren er frasorteret i perioder efter sne og frost i tilfælde, hvor data fra pit-måleren tyder på falsk nedbør pga. snefygning, eller smeltende rester af is eller sne fra snowcapping<sup>3</sup>. Fejlmarkerede værdier er eftersat manuelt, medmindre de har været meget ekstreme og kan fejlflages automatisk. Sandsynligheden for fejl i mistænkelige værdier er vurderet i forhold til den generelle vejr-situation, nabostationer og vejradardata. Der har været perioder med tekniske fejl på såvel Pluvio som pit-måleren. DFIR-måleren er stort set gået fri af tekniske fejl.

Godkendte data danner grundlag for etablering af nye konstanter. Det er et krav, at de nye konstanter frembringer sammenhænge, der er konsistente og meteorologisk-fysisk plausible, f.eks. at korrektionsfaktoren for regn,  $k_r$ , øges ved stigende vindhastighed og faldende regnintensitet. Desuden skal modellen være repræsentativ for realistiske kombinationer af de styrende variable, dvs. helst have samme gyldighedsområde som den gamle model for især vind, men også for regnintensitet og lufttemperatur.

I modsat fald undersøges der alternative løsninger for etablering af en korrektionsmodel for Pluvio. En løsning har som omdrejningspunkt, at korrektion af Pluvio med den gamle model fører til systematisk for lave værdier, både i forhold til pit-måleren i HOBE-data og i forhold til Hellmann-måleren i en overgangsperiode 2009-2010 mellem det manuelle og automatiske nedbørmåle-net (Vejen et al, 2021).

Forsøg på etablering af nye konstanter foretages kun for regn, idet antallet af snehændelser 2009-2019 skønnes at have været for lavt til en robust analyse.

<sup>3</sup> Snowcapping betyder, at måleråbningen helt eller delvis er lukket til af et låg af sne.



## 6 Resultater

### 6.1 Beregning af parametre til brug for analyser

I korrektionsmodellen indgår regnintensitet,  $I$ , samt middelværdier under nedbør af vindhastighed,  $\bar{V}$ , og lufttemperatur,  $\bar{T}$ . Pluvio giver nedbørsignal i en opløsning på 1 minut. Denne information kan bruges til at beregne nedbørperiodens længde samt middelværdier af  $V$  og  $T$  inden for den valgte akkumulationsperiode for nedbør på 24 timer for regn og 12 timer for sne.

Det viser sig imidlertid, at de forskellige Pluvio-målere på testfeltet i flere tilfælde er ret uenige om præcis hvornår, og i hvor lang tid, der er faldet nedbør. Det gælder både DFIR, pit-måleren og Pluvio uden skærm. Det tilføjer usikkerhed til estimererne af  $I$ ,  $\bar{V}$  og  $\bar{T}$ . Forklaringen ligger muligvis i Pluvios interne filtreringsalgoritme, der er designet til at fjerne forskellige former for støj i data, så kun reel akkumulation af nedbør bliver registreret.

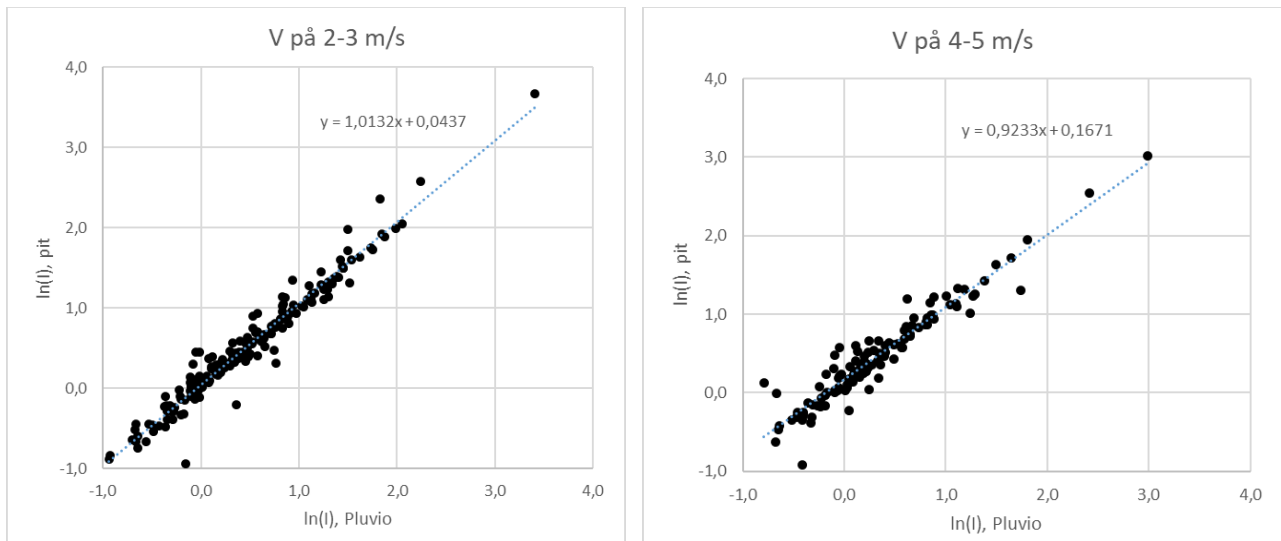
Typiske støjkilder er vindpåvirkning, der kan få måleren til at vibrere, wind pumping, hvor vinden kan få opsamlingsenheden inde i måleren til at "hoppe", og partikler, der falder i måleren, men som ikke er nedbør. Disse fænomener kan generere falske nedbørsignaler, som algoritmen forsøger at identificere og eliminere. Hypotesen er, at algoritmen i nogle tilfælde skal bruge ekstra tid til at klassificere det målte signal korrekt som enten nedbør eller støj, hvilket fører til forsinkelser i, hvornår et givet signal bliver registreret som nedbør. En forklaring på de observerede forskelle i timing kan være, at den uens opstilling af målerne (terrænhøjde, 1,5 m højde, DFIR i 3 m højde) kan resultere i forskellig støjpåvirkning og dermed uens datagrundlag for filtrering, hvilket antages at bidrage til usikkerheden i den detekterede nedbørperiode. Da algoritmen er "confidential" (K. Nehmet, OTT Hydrometrie, pers. komm.), er dette kun en antagelse.

Feltet er bestykket med en Rimco-måler. Til brug for analyser af regnintensitet og beregning af regnrækker er denne måler gennemprøvet (se f.eks. Spildevandskomitéen, 2006), og det er besluttet at undersøge, om Rimco-data kan anvendes til bestemmelse af nedbørperioden. Idet Rimco er en vippekarsmåler, som måler i enheder af 0,2 mm, fortæller den tidspunkt for vip, men ikke for start, pause eller ophør af nedbør. Rimco-data har derfor den ulempe, at det især for svag nedbør kan være vanskeligt og i visse tilfælde umuligt at afgrænse nedbørperioden præcist.

En usikkert bestemt nedbørperiode  $t$  vil være kilde til usikkerhed på både  $I$ ,  $\bar{V}$  og  $\bar{T}$  og dermed på beregning af nye empiriske konstanter.

### 6.2 Korrektion af regn

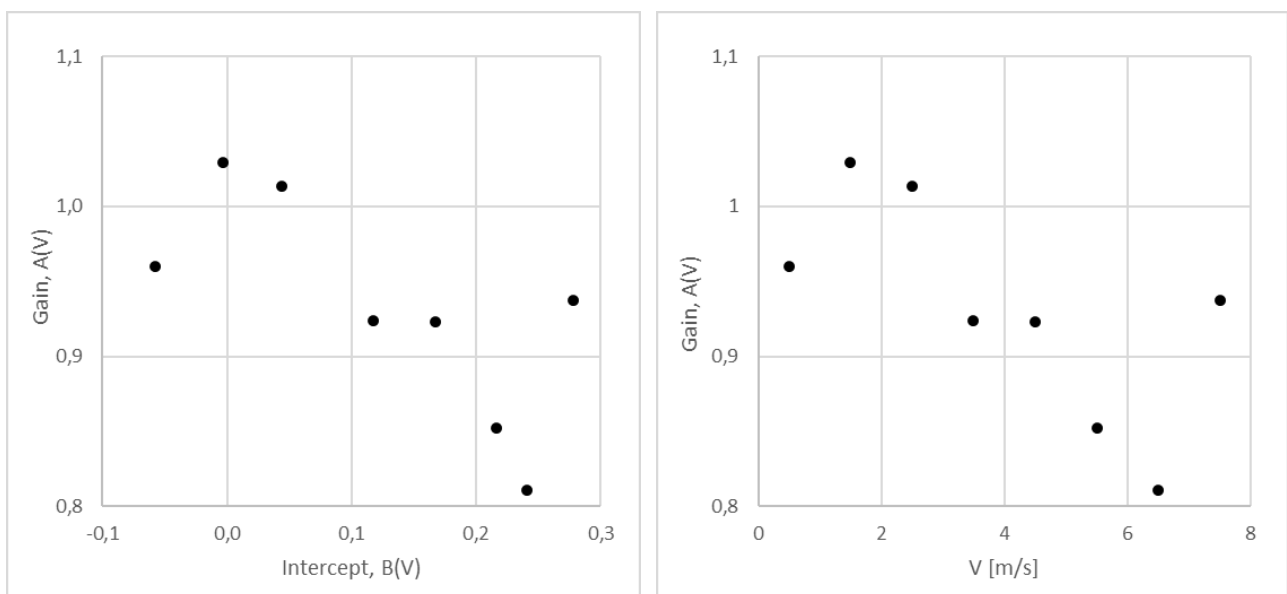
Sammenhængen mellem  $V$ ,  $I$  og korrektionsfaktoren for regn, herefter blot kaldet  $CF$ , analyseres for nedbør målt med pit-måleren,  $P_{ref}$ , og Pluvio,  $P_m$ . Suffix refererer til, at nedbøren måles i hhv. terrænhøjde og 1,5 m højde. Det er tidligere fundet, at intensiteterne for referencemåleren i terrænhøjde og måleren over terræn i et logaritmisk domæne hænger lineært sammen og er systematisk relateret til  $V$  via relationen  $\ln(I_{ref}) = A_V \cdot \ln(I_m) + B_V$ , hvor  $I_{ref}$  og  $I_m$  er intensiteterne for de to målere, og  $A_V$  og  $B_V$  er gain og intercept for given vindhastighed,  $V$  (Allerup og Madsen, 1980). Det er videre fundet, at  $A_V$  og  $B_V$  er lineært relateret til hinanden, og at  $A_V$  hænger lineært sammen med  $V$ . Dette er efterprøvet med data fra Voulund for at se, om disse data er i overensstemmelse med den datastruktur, der i sin tid lå til grund for udvikling af korrektionsmodellen for regn.



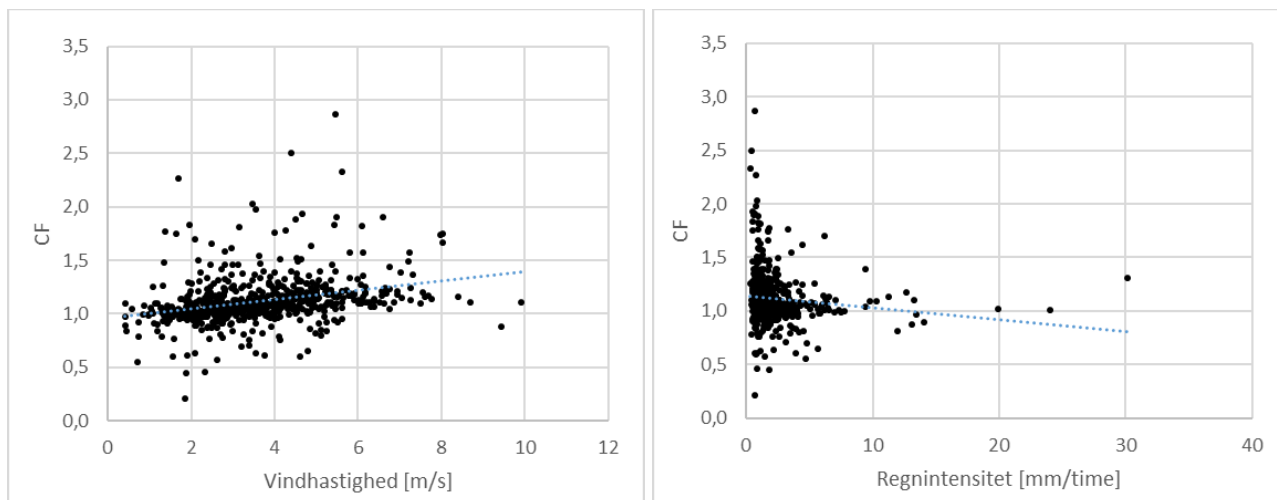
**Figur 3.** Regnintensitet for pit og Pluvio for vindhastighedsklasserne 2-3 m/s og 4-5 m/s.

Figur 3 for vindklasserne 2-3 og 4-5 m/s viser et eksempel på den lineære struktur for de logaritmisk transformerede værdier af  $I$  for pit- og Pluvio-måleren. Pointen er, at linjens hældning afhænger af  $V$ , og at  $CF$  dermed afhænger systematisk af både  $I$  og  $V$  og kan bygges ind i korrektionsmodellen. Dette bør gælde generelt for regn, og vi burde kunne efterprøve og verificere modelstrukturen vha. HOBE-data for Pluvio.

Det viser sig ganske rigtigt, at hhv.  $A_V$  og  $B_V$  samt  $A_V$  og  $V$  hænger indbyrdes sammen præcis, som vi forventer. Eller næsten. Den lineære struktur fremgår ret tydeligt af figur 4, bortset fra to vindklasser, 0-1 og 7-8 m/s, der afviger fra det generelle billede. Det karakteriserer disse klasser, at antallet af observationer er beskedent, hhv. 12 og 13 værdier, og støj derfor kan påvirke disse vindklasser uforholdsmæssigt meget i forhold til de andre klasser, der har noget flere data.



**Figur 4.** Tv.: Relationen mellem  $A_V$  (gain) og  $B_V$  (intercept) for 8 vindklasser i intervallet 0-1 til 7-8 m/s. Th.: Relationen mellem vindhastighed  $V$  og  $A_V$  for de samme vindklasser. Data fra Voulund, 2010-2019 for regn.



**Figur 5.** Tv.: Vindhastighed ( $V$ ) vs korrektionsfaktor  $CF$ . Th.: Vegnintensitet ( $I$ ) vs  $CF$ . Data fra Voulund, 2010-2019 for regn.

Et simpelt plot af observerede værdier af  $CF$  mod  $V$  og  $CF$  mod  $I$  (figur 5) viser, at data ganske rigtigt lider under en del støj, som kan være forklaringen bag de forholdsvis svage relationer i figur 4. Men nok så vigtigt viser figur 5, at antal data med vindhastighed  $V > 7$  m/s er meget begrænset. Trods støjen ses der for  $V$  en systematisk sammenhæng med  $CF$ , men en sådan er svær at se for  $I$ . Hvis vi alligevel beregner nye konstanter, forsvinder intensitetsledet ud af modellen, og vi står tilbage med, at kun vindledet og produktledet mellem  $I$  og  $V$  står tilbage i modellen, der reduceres til  $CF = \exp(a_1 V + a_3 \ln(I) + a_4)$ . Det kan forklares med, at  $I$  pga. den megen støj praktisk taget ikke bidrager med noget signifikant til modellen, og resultatet er en model, hvor  $CF$  stort set kun afhænger af  $V$ .

Signalet fra  $I$  er så svagt, at det synes tilfældigt, hvorvidt  $CF$  og  $I$  er realistisk forbundet for given værdi af  $V$ , og faktisk bliver sammenhængen mellem  $I$  og  $V$  modsat det forventede. Det er jo ikke fysisk plausibelt med en model, der forudsiger, at små dråber som i finregn er mindre påvirkede af vinden end store tunge regndråber. De udledte empiriske konstanter er således *ikke* realistiske. Svagheden i data tilskrives den upræcise beregning af regnintensitet.

Datamaterialet efterlader os med to udfordringer: (1) vindregimet i Voulund er for begrænset til at udvikle konstanter, der er lige så repræsentative for vindklimaet i Danmark som den gamle model, (2) det svage og urealistiske intensitetssignal i modellen fører til betydelig underestimering af korrektionen for svag regn og tilsvarende overestimering for kraftig regn. Der er således ikke tilstrækkeligt datagrundlag til at udvikle nye generelt gældende konstanter for regn.

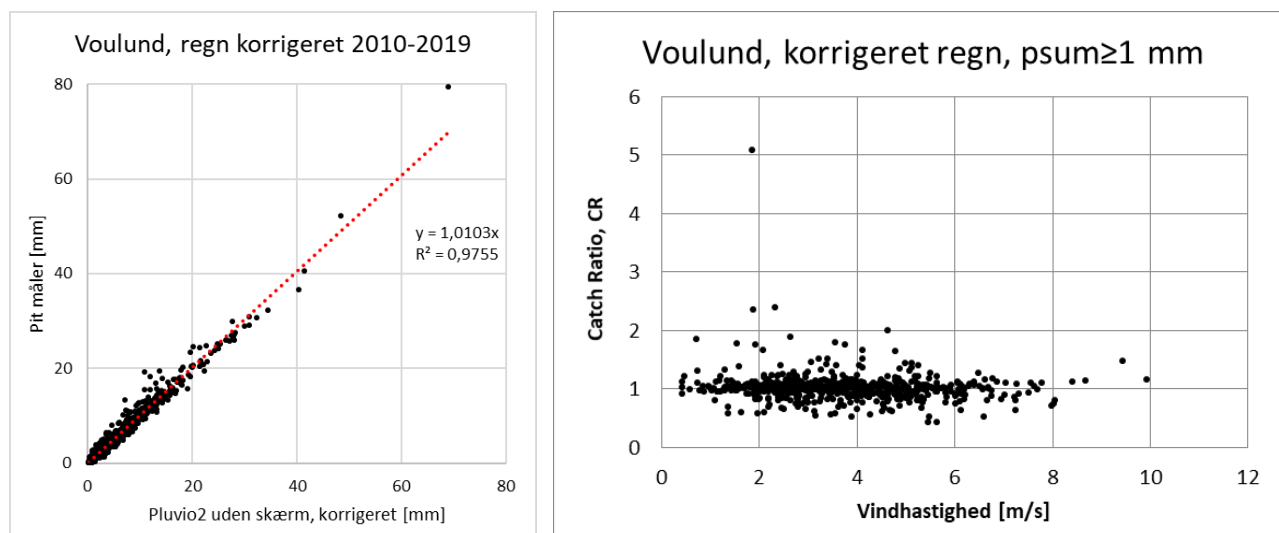
Der er herefter afsøgt andre løsninger. Af figur 6 ses, at korrektionen af Pluvio ved brug af de gamle konstanter ligger meget tæt på pit-måleren. Der er dog en lille forskel, om end den er svær at vurdere ud fra spredningen i diagrammet. Den samlede korrigerede nedbørsum 2010-2019 er 5008,9 mm mod 5061,6 mm i referencen svarende til en underestimering af korrektionen for Pluvio på 1,04 %.

I figur 6 ses vindhastighed vs catch ratio,  $CR = P_k / P_{pit}$ , der angiver forholdet mellem korrigeret nedbør,  $P_k$ , og sand nedbør målt med referencemåleren,  $P_{pit}$ .  $CR$  ligger generelt tæt på 1, men som nævnt tidligere med et lille offset, der gemmer sig i spredningen. Jfr. udfordringerne med registrering af nedbørperiodens længde er det næppe overraskende, at der ikke kan findes en relation mellem underestimering og regnintensitet. Visuelt bedømt kan der måske anes en svag relation til vindhastigheden, men test viser, at der i data ikke er grundlag for at påstå en sådan

afhængighed. Vi kan således ikke afvise, at underestimeringen ikke afhænger af regnintensitet eller vindhastighed.

Pointen er, at vi tillader os at antage, at underestimeringen af korrektionen for Pluvio er konstant, da der jo netop ikke kunne påvises en signifikant afhængighed af regnintensitet og vindhastighed. Dermed kan offset bygges ind i den eksisterende korrektionsmodel som en ny konstant, der justerer for den beskedne bias i korrektionen for Pluvio. Præcis på samme måde som korrektionen af regn for Geonor (Førland et al, 1996), hvor der blev tilføjet en konstant  $c = -0,05$  til den eksisterende model for Hellmann.

Resultatet er, at der med de eksisterende konstanter bibeholdes en fysisk plausibel relation mellem  $CF$ ,  $I$  og  $V$ , mens  $c$  ophæver den konstaterede bias i korrektionen. Konstantens størrelse kan diskuteres, men faktum er, at vindeffekten på Pluvio er større end for Hellmann, hvor stor eller lille denne end måtte være. Dette resultat er i overensstemmelse med Colli et al (2018), der med modelberegninger af vindflow omkring nedbørmålere viste, at turbulensen omkring måleråbningen er større for Pluvio end for en tøndeformet måler, uden dog at angive en ekstakt størrelse for, hvor meget  $CR$  ville være påvirket.



**Figur 6.** Tv.: Pluvio korrigeret med de gamle empiriske konstanter sammenlignet med pit-måler.  $CF$  er baseret på døgnsummer af regn. Th.: Catch-ratio for Pluvio i relation til vindhastighed. Nedbørmængder under 1 mm/døgn er frasorteret for at mindske problemer med diskretisering.

Vi finder, at korrektionen for Pluvio generelt bliver underestimeret med ca. 1 %, hvilket er et mål for, hvordan korrektionen rent faktisk fungerer. Det er nærliggende at anvende dette tal i modellen som en konstant korrektionsfaktor  $c$ , eftersom data fra HOBE ikke tillader en robust estimering af sammenhængen mellem  $V$  og  $I$ :

$$k_r = \exp(a_1 V + a_2 \ln I + a_3 V \ln I + a_4 + c) \quad (2)$$

Modellen skal dog også fungere i praksis. I en undersøgelse af effekten af instrumentskift er det fundet, at korrektionen for Pluvio-målinger af regn er 2,15 % lavere end for Hellmann (Vejen et al, 2021). Dette er baseret på 31 stationer med samtidige målinger af regn i perioden marts-november 2010, herefter kaldet overlapsperioden. Korrektion af Hellmann kan her betragtes som en referencemåler, idet den "sande" nedbør jo netop er bestemt ved korrektionen. Ved korrektion af Hellmann er der også korrigeret for wettingtab, der varierer henover året i et interval mellem ca. 0,1 og 0,4 mm pr. nedbørdøgn (Allerup og Madsen, 1979). Det introducerer en lille fejlkilde, at Pluvio kan registrere nedbørmængder mindre end wettingtabet i modsætning til Hellmann.

At afvigelsen er større for overlapsperioden end for HOBE-data skyldes flere forhold. I HOBE er referencemåleren en WMO-certificeret referencemåler for regn, men i overlapsperioden er det Hellmann-målere. I HOBE er regnintensiteten målt lokalt. Det samme er vindhastigheden, der er givet som middelværdi under nedbør.

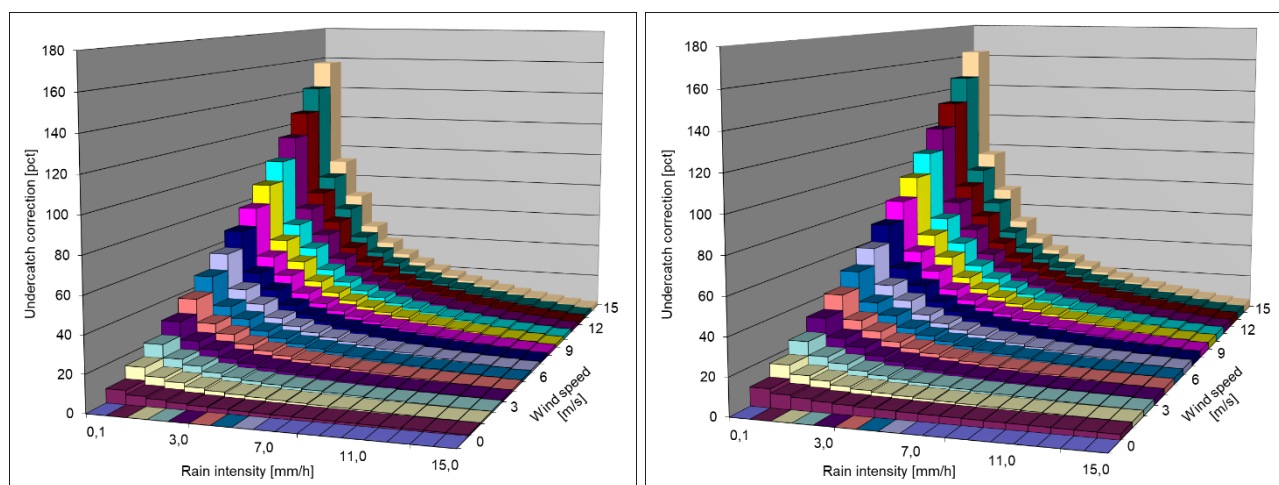
For data i overlapsperioden er benyttet den såkaldte NOVANA-metode, hvor døgnmiddel af vindhastighed er givet ved 20x20 km<sup>2</sup> gridværdier, og regnintensiteten er baseret på klimatologi. Dertil kommer, at begge nedbørmålere i overlapsperioden er placeret "realistisk", dvs. som de faktisk står rundt om i landet med de udfordringer, der er mht. læforhold og turbulens lokalt, mens målerne i HOBE-testfeltet står optimalt uden at lokale lægivere kan forstyrre vindfeltet.

Det kan påvises, at døgnmiddel af  $V$  i gennemsnit er lavere end middelværdi af  $V$  under nedbør, hvilket betyder systematisk lavere korrektioner for overlapsdata i forhold til HOBE-data. Dette gælder for korrektion af både Hellmann og Pluvio i overlapsdata. Ved at anvende afvigelsen fra overlapsperioden inddrages effekterne af, at nedbørmålerne i praksis ikke altid står optimalt placeret.

I praksis er den ny korrektionsmodel for Pluvio-målerne som den gamle korrektionsmodel for Hellmann, men med tilføjelse af  $c=0,021272$ , svarende til afvigelsen på 2.15 % mellem målerparrene Hellmann-Pluvio i overlapsperioden (Vejen et al, 2021). Ændringen er illustreret i figur 7, som viser korrektionsfladen som funktion af  $V$  og  $I$  med og uden konstanten  $c$ . I tabel 1 ses konstanterne i korrektionsmodellen. Det ses, at brug af konstanterne for Hellmann sikrer en realistisk relation mellem korrektionsniveauet og regnintensiteten for given vindhastighed, og at konstanten  $c$  justerer for bias mellem Pluvio og Hellmann, som blev konstateret i overlapsdata.

**Tabel 1.** Konstanterne for Pluvio i korrektionsmodellen for regn.

$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$c$
0,034331	-0,00101	-0,01218	0,007697	0,021272



**Figur 7.** Tv.: Korrektionsfladen for den gamle korrektionsmodel. Th.: Tilsvarende, men med tilføjelse af konstanten  $c$ .

### 6.3 Korrektion af sne

Selvom det første år i testfeltet i Voulund lagde ud med to kolde vintre med en hel del sne på landsplan, ville tilfældet, at dette ikke kom testfeltet til gode. Området var i disse vintre relativt snefattigt.

Der er valgt en tidsopløsning på 12 timer for at vride så mange værdier ud af data som muligt selvom dette betyder flere samples med meget små snemængder, der må forkastes pga. problemer med diskretisering. Snemængder mindre end 0,5 mm er således udeladt af analyserne. Snemodellen er baseret på 12-timers data fra et testfelt i Finland og er repræsentativ for  $V \leq 7$  m/s og  $T \geq -12$  °C (Allerup, Madsen, Vejen, 1997).

Som tabel 2 viser, var antal 12-timers perioder med sne ret begrænset for alle relevante klasser af vindhastighed,  $V$ , og lufttemperatur,  $T$ . Det er åbenbart, at nye konstanter til korrektion af sne målt med Pluvio på dette datagrundlag ville være ganske usikre og repræsentere et vind- og temperaturregime, der er langt mere begrænset end for den eksisterende model. Den højeste middelværdi af  $T$  ved sne var 0,29 °C, mens den laveste var -6,48 °C. Datagrundlaget på 31 snesamples fra HOBE-testfeltet i Voulund skal holdes op imod, at 321 snesamples fra WMO-testfeltet i Finland udgør grundlaget for snemodellen (Allerup, Madsen, Vejen, 1997).

**Tabel 2.** Antal nedbørmålinger med sne i Voulund 2009-2019 i forskellige klasser af vindhastighed og lufttemperatur. Nedbørmængden er målt henover 12 timer. Højeste værdi af  $T$  ved sne var 0,29 °C.

		Klasser for vindhastighed							I ALT
		]0-1[	[1-2[	[2-3[	[3-4[	[4-5[	[5-6[	[6-7[	
Klasser for temperatur	$[\infty, 0[$	0	1	1	2	2	1	0	7
	$[0, -2[$	1	1	3	3	4	0	1	13
	$[-2, -4[$	0	1	3	0	2	2	0	8
	$[-4, -6[$	1	1	1	0	0	0	0	3
	$[-6, -8[$	0	0	0	0	0	0	0	0
I ALT		2	4	8	5	8	3	1	31

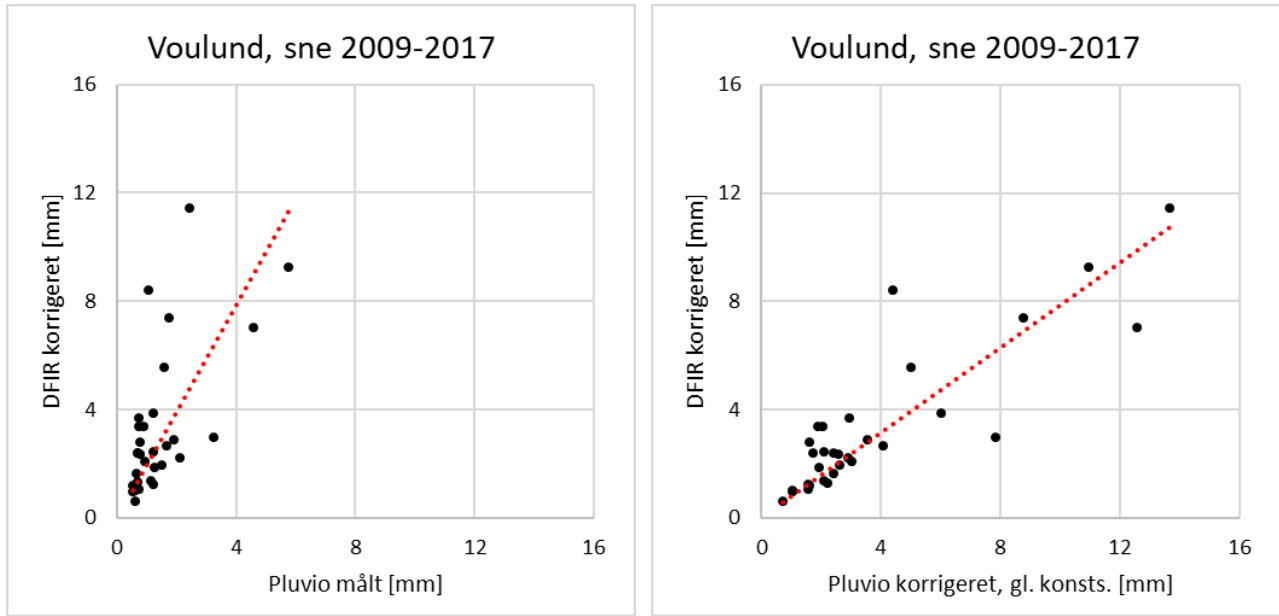
I figur 8 ses, at den målte snenedbør generelt kun er ca. det halve af den mængde sne, der er faldet ifølge DFIR. For at få en ide om, hvordan snekorrektionen fungerer, er Pluvio korrigeret vha. Hellmann-konstanter for 12-timers perioder med sne og derefter sammenlignet med DFIR-målinger korrigeret for en beskeden vindeffekt. Det ses i figur 8, at den korrigerede snemængde generelt ser ud til at være noget overestimeret. Den samlede korrigerede snemængde for Pluvio ender på 114,9 mm, men den burde ifølge DFIR være 102,9 mm svarende til en overestimering på ca. 11 %.

I figur 9 (venstre del) ses en sammenligning mellem vindhastighed og observeret hhv. beregnet korrektionsfaktor  $CF = P_{DFIR} / P_m$  for 4 temperaturklasser. Korrektionsmodellen for sne forudsiger, at for given vindhastighed øges korrektionsniveauet, når lufttemperaturen falder. Trods det begrænsede antal samples i hver temperaturklasse ser dette med lidt god vilje ud til også at være tilfældet for de målte data, men de få data og den ret store spredning i hvert  $T$ -klasse har umuliggjort etablering af realistiske empiriske konstanter for sammenhængen mellem  $CF$ ,  $V$  og  $T$ .

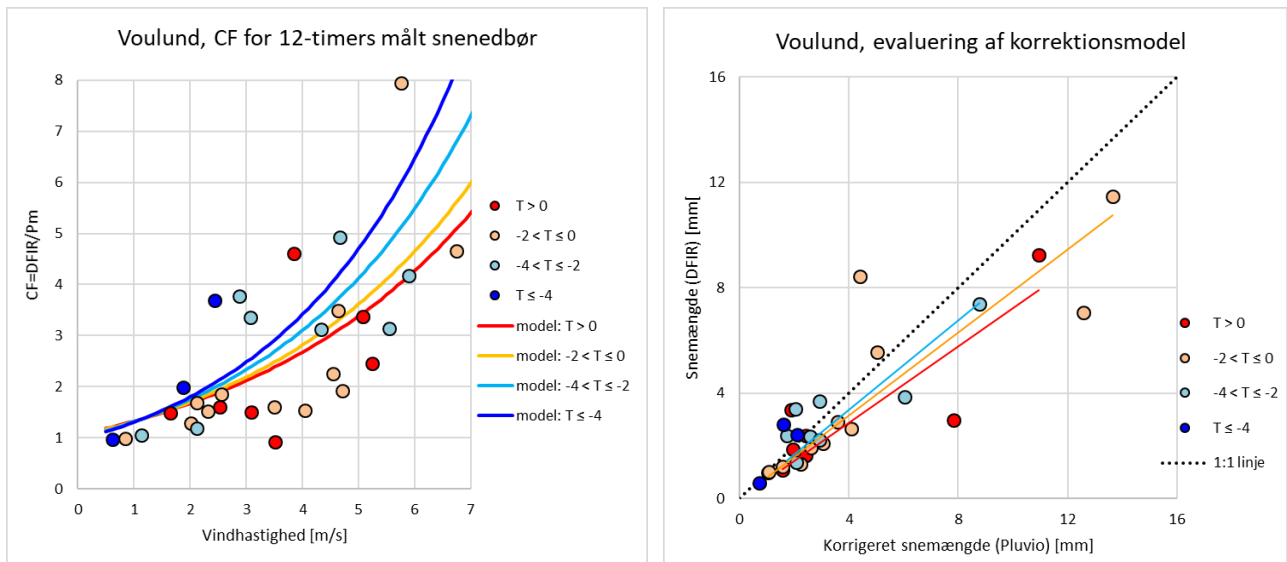
I figur 9 (højre del) er vist korrigeret snemængde versus referencemålinger af sne (DFIR) for præcis samme data som i figur 8, og sorteret efter temperaturklasser. Selvom det er usikkert at konkludere noget på det ret begrænsede datagrundlag, kan der anes en svag tendens til, at



overestimeringen af snekorrektionen aftager, når lufttemperaturen er lavere. Det giver mening, hvis "kold" sne i Danmark i højere grad end "varm" sne er associeret med luftmasser af arktisk oprindelse. Det ville betyde, at sneens aerodynamiske egenskaber ved lavere temperaturer nærmer sig de meteorologisk forhold i Finland, som snemodellen er baseret på. Det kræver dog flere data at verificere denne hypotese.



**Figur 8.** T.v.: Observeret nedbør i forhold til referencemåler for sne (DFIR) for 12-timers perioder 2009-2017. T.h.: Korrigeret nedbør i forhold til DFIR ved brug af de gamle empiriske konstanter for sne.



**Figur 9.** Venstre: Målt korrektionsfaktor for sne,  $CF=DFIR/P_m$  i forhold til vindhastighed for 4 klasser af lufttemperatur. Til sammenligning er vist den modelberegnete CF for samme temperaturklasser. Højre: Korrigeret snemængde målt med Pluvio versus snemængde målt med referencemåleren for sne (DFIR), der er korrigeret for en beskeden vindeffekt. Den stiplede sorte linje viser identitetslinjen. De tre farvede linjer viser bedste lineære fit for den korrigerede snemængde i 3 temperaturklasser:  $T > 0$  (rød linje),  $-2 < T \leq 0$  (orange linje) og  $-4 < T \leq -2$  °C (lyseblå linje).

Trods det ret begrænsede datagrundlag tyder HOBE-snedata på, at brug af Hellmann-konstanter til korrektion af Pluvio resulterer i en overestimering af korrektionen. En analyse for overgangsdata 2009-2010 viser, at Pluvio måler ca. 11 % mere sne end Hellmann (Vejen et al, 2021). Dette er ved første øjekast uventet, da Pluvio iflg. modelberegninger af windflow har mere turbulens omkring måleråbningen end en tøndeformet måler (Colli et al, 2018) som Hellmann.

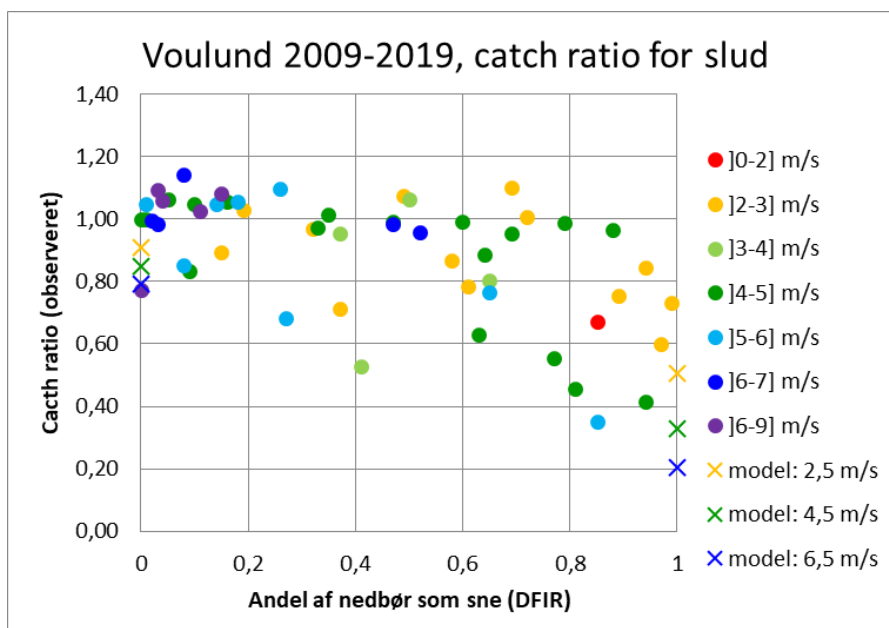
Dette tal for snemåling bør dog tages med et gran salt, da Pluvio alene af tekniske årsager vil være tilbøjelig til at måle mere sne end Hellmann. Hellmann-måleren er i vinterhalvåret forsynet med et såkaldt snekors for at dæmpe turbulens, så sne i højere grad fastholdes i måleren. Derimod er Pluvio forsynet med en frostvæskeblanding, som er langt mere effektiv end et snekors til at fastholde *al snenedbør* i måleren. Desuden er Hellmann-måleren udfordret ved store snemængder. Dens maksimale kapacitet er ca. 35 mm sne, hvis der antages en vandækvivalens på 1/10. Efterhånden som måleren fyldes med sne, øges også risikoen for, at sne blæser op af måleren trods snekorset. Dette problem ses ikke for Pluvio pga. frostvæsken.

For overlapsdata er den korrigerede snenedbør for Pluvio 5 % højere end for Hellmann (Vejen et al, 2021). De tekniske forskelle mellem de to målere og de vidt forskellige forhold, overlapsdata og HOBE-data er målt under, gør dog resultaterne for korrigeret nedbør nærmest usammenlignelige.

Sne forekommer efterhånden kun sjældent i Danmark og udgør normalt kun en begrænset del af den årlige nedbør. For perioden 1989-2010 har andelen af snenedbør i gennemsnit været 7-8 % af den korrigerede nedbør (Vejen et al, 2014). For 2011-2020 er andelen af sne for korrigeret nedbør ikke endeligt opgjort, men forventes at ligge i nærheden af 4 %. For den samlede årsnedbør vil en for høj snekorrektion fra 2011 og frem derfor kun have mindre relativ betydning.

#### 6.4 Korrektion af blandet nedbør (slud eller regn og sne)

Det er undersøgt, hvordan den samlede korrektionsmodel, der også kan korrigere blandet nedbør og slud, fungerer for Pluvio. Korrektionsfaktoren,  $K_\alpha$ , for forskellige typer nedbør (sne, slud og regn) er jfr. ligning (1) forenet i et og samme udtryk, hvor den forenende parameter er andelen af nedbør faldet som sne,  $\alpha$ , givet ved et tal mellem 0 og 1.



**Figur 10.** Catch ratio,  $CR = P_m/P_{DFIR}$ , som funktion af andel af nedbør faldet som sne,  $\alpha$ . CR er givet for forskellige intervaller af vindhastighed. Desuden er med kryds angivet modelberegne værdier af CR for hhv. regn ved  $I = 1$  mm/time og sne ved  $T = 0$  °C.

Det blev påvist ud fra finske data, at  $k_{\alpha}$  for givne værdier af  $V$ ,  $T$  og  $I$  er lineært relateret til  $\alpha$ . Det er undersøgt, om dette mønster kan genfindes i data fra Voulund. Resultatet fremgår af figur 10. Her er catch-ratio givet som forholdet mellem målt nedbør i Pluvio og DFIR, og er i figuren vist som funktion af andelen af sne for et antal vindklasser. Antallet af punkter i hver vindklasse er for lavt til at konkludere noget sikkert, men der tegner sig dog et billede, der understøtter modelstrukturen. Catch-ratio for regn og sne er beregnet med de gamle konstanter i korrektionsmodellen.

## 7 Konklusion

Det har hidtil været antaget, at de empiriske konstanter i korrektionsmodellen for sne, slud og regn for Hellmann-måleren også kan benyttes til korrektion af nedbørmålinger med Pluvio-måleren, men der er nu rejst berettiget tvivl om dette. Målet med nærværende undersøgelse har derfor været at etablere nye korrektionskonstanter for Pluvio.

I HOBE-projektet er der blevet målt nedbør med Pluvio, Rimco og referencemålere for sne og regn i perioden 2009-2019. Der er desuden målt en række andre meteorologiske parametre, der er relevante for etablering af nye empiriske konstanter for Pluvio i korrektionsmodellen. Imidlertid har det vist sig, at datagrundlaget er utilstrækkeligt til at udvikle en model, der har samme gyldighedsområde for vind og temperatur som den gamle model og samtidig er repræsentativ for almindelige vindforhold i Danmark. Dette gælder både for sne og regn.

HOBE-data viser, at for regn er korrektion af Pluvio ved brug af de empiriske konstanter for Hellmann underestimeret med ca. 1 % i forhold til referencemåleren for regn. HOBE-data muliggør imidlertid ikke en robust beregning af nye korrektioner med hensyn til vindhastighed og regnintensitet. Dels har vindforholdene i måleperioden ikke været repræsentative for det generelle vindklima, dels er der påvist uforholdsmæssig stor usikkerhed i beregning af regnintensitet, hvilket ville resultere i en fysisk urealistisk korrektionsmodel. Der kunne ikke påvises en sikker sammenhæng mellem den generelle underestimering på ca. 1 %, vindhastighed og regnintensitet. Det er derfor nærliggende at tilføje underestimeringen som en ny konstant i den eksisterende korrektionsmodel for Hellmann, hvilket svarer til at justere for bias på korrektionen for Pluvio.

Resultatet på 1 % er mindre end den underestimering på 2,15 % for Pluvio i forhold til Hellmann, som blev fundet i overlapsdata 2009-2010. Det skyldes flere forhold, der er relateret til, at målerne i HOBE-data er opstillet under optimale forhold, mens korrektionerne for overlapsdata er foretaget med NOVANA-modellen for nedbørmålere, der er placeret "realistisk", dvs. som de faktisk står rundt om i landet med de udfordringer, der er mht. læforhold og turbulens lokalt.

Idet korrektionsmodellen skal kunne virke i praksis, indarbejdes de 2,15 % i modellen som en ny konstant  $c=0,021272$ .

For sne antyder HOBE-data en overestimering af korrigeret nedbør, men der er ikke datagrundlag til fastlæggelse af et mere præcist estimat heraf, eller til beregning af nye empiriske konstanter for sne målt med Pluvio. I perioden 2009-2019 blev der foretaget 47 snemålinger med mindst 0,5 mm sne henover 12 timer. Den samlede korrigerede snemængde var 114,9 mm mod 102,9 mm i referencemåleren for sne svarende til en overestimering på ca. 11 %. Idet korrektionen for sne er meget følsom over for vindhastighed og lufttemperatur, er det tvivlsomt, om 47 målinger er repræsentative for de normale variationer i vind og temperatur. Der skal flere data til, før nye og tilstrækkeligt sikre empiriske konstanter, eller alternativt en generel faktor for overestimering, kan beregnes. Det vurderes, at en overestimering af snenedbør kun har mindre betydning for den samlede korrigerede nedbørmængde i Danmark, især i perioden efter 2010.

Korrektionsmodellens struktur er undersøgt vha. HOBE-data for blandet nedbør (slud eller en blanding af sne og regn henover måleperioden). Trods et begrænset datamateriale er der ikke

grundlag for at betvivle, at korrektionsmodellerne for sne og regn kan bindes sammen af et indeks, der angiver andelen af nedbør faldet som sne.

Alt i alt var der ikke grundlag i HOBE-data til beregning af nye empiriske konstanter for sne og regn gældende for Pluvio. Det er ikke optimalt, at det har været nødvendigt at tilføje en generel biaskorrektion baseret på et overlapsdatasæt for målere, hvis opstilling ikke opfylder WMO's krav for sammenligning af nedbørmålere. Det anbefales derfor, at der på sigt udvikles nye konstanter for Pluvio gældende for regn og sne ved etablering af testfeltmålinger ved lokaliteter med et vindregime, som er repræsentativt for det generelle vindklima i Danmark. Om muligt i samarbejde med andre institutioner, det være sig udenlandske meteorologiske institutter eller indenlandske institutioner med behov for korrigerede nedbørsestimater.

## 8 Referencer

- Allerup, P. and H. Madsen, 1979: Accuracy of point precipitation measurements. Danish Meteorological Institute, Climatological Papers, No. 5, Copenhagen 1979, 84 pp.
- Allerup, P. and H. Madsen, 1980: Accuracy of point precipitation measurements. *Nordic Hydrology*, 11, p. 57-70.
- Allerup, P., Madsen, H., and Vejen, F., 1997: A Comprehensive Model for Correcting Point Precipitation. *Nordic Hydrology*, vol. 28, 1-20.
- Colli, M., Pollock, M., Stagnaro, M., Lanza, L. G., Dutton, M. and O'Connell, E., 2018: A Computational Fluid-Dynamics Assessment of the Improved Performance of Aerodynamic Rain Gauges. *Water Resources Research*, **54**, 779-796.
- Førland, E. J. (ed), P. Allerup, B. Dahlström, E. Elomaa, T. Jónsson, H. Madsen, J. Perälä, P. Rissanen, H. Vedin and F. Vejen, 1996: Manual for Operational Correction of Nordic Precipitation Data. Nordic Working Group on Precipitation, Det Norske Meteorologiske Institut, Report Nr. 24/96.
- Goodison, B., Louie, P., and Yang, D., 1998: WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison-Final Report. WMO, Geneva, Switzerland.
- Jensen, K. H., Illangasekare, T.H. (2011): HOBE – a hydrological observatory in Denmark. *Vadose Zone Journal*. 10:1-7, doi:10.2136/vzj2011.0006.
- OTT, 2007: Productinfo. OTT Pluvio 2 – All Weather Precipitation Gauge. *Meteorology* June 2007, 70.020.020.9.0, OTT Messtechnik GmbH & Co, 2 pp.
- Plauborg F., Refsgaard, J. C., Henriksen, H. J., Blicher-Mathiesen, G., Kern-Hansen, C., 2002: Vandbalance på mark- og oplandsskala. DJF rapport. Markbrug nr. 70.
- R. Nitu, Y.-A. Roulet, M. Wolff, M. Earle, A. Reverdin, C. Smith, J. Kochendorfer, S. Morin, R. Rasmussen, K. Wong, J. Alastrué, L. Arnold, B. Baker, S. Buisán, J.L. Collado, M. Colli, B. Collins, A. Gaydos, H.-R. Hannula, J. Hoover, P. Joe, A. Kontu, T. Laine, L. Lanza, E. Lanzinger, GW Lee, Y. Lejeune, L. Leppänen, E. Mekis, J.-M. Panel, A. Poikonen, S. Ryu, F. Sabatini, J. Theriault, D. Yang, C. Genthon, F. van den Heuvel, N. Hirasawa, H. Konishi, H. Motoyoshi, S. Nakai, K. Nishimura, A. Senese and K. Yamashita, 2018: WMO Solid Precipitation Intercomparison Experiment (SPICE) (2012 - 2015). Instruments and Observing Methods Report No. 131, WMO 2018, 1445 pp.
- Rasmussen, R., Rasmussen, R., B. Baker, J. Kochendorfer, T. Meyers, S. Landolt, A. P. Fischer, J. Black, J. M. Theriault, P. Kucera, D. Gochis, C. Smith, R. Nitu, M. Hall, K. Ikeda, and E. Gutmann, 2012: How well are we measuring snow? The NOAA/FAA/NCAR Winter Precipitation Test Bed. *BAMS*, June 2012, 811-829.

Sevruk, B. (WMO), 1982: Methods of Correction for Systematic Error in Point Precipitation Measurement for Operational Use (B. Sevruk). Operational Hydrology Report No. 21 (WMO-No. 589). Geneva.

Sevruk, B., and Hamon, W. R. (WMO), 1984: International Comparison of National Precipitation Gauges with a Reference Pit Gauge. WMO, Instruments and Observing Methods, Report No. 17, WMO/TD-No. 38, Secretariat of the World Meteorological Organisation, Geneva, Switzerland, 139 pp.

Sevruk, B. and Klemm, S., 1989: Types of standard precipitation gauges. WMO, IAHS, ETH, International Workshop on Precipitation Measurement, St. Moritz, 1989 Switzerland, 227-232.

Sevruk, B., Hertig, J.-A., and Spiess, R., 1989: Wind field deformation above precipitation gauge orifices. Atmospheric Deposition (Proceedings of the Baltimore Symposium, May 1989), IAHS Publ. No. 179, 65-70.

Spildevandskomitéen, 2006: Regional Variation af Ekstremregn i Danmark – Ny bearbejdning (1979-2005). IDA Spildevandskomitéen. Skrift nr. 28.

WMO/CIMO, 1991: International Organizing Committee for the WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison, Final Report of the Fifth Session, Valdai, Russia. WMO, Geneva, 31 pp.

Vejen, F., Schmidt, T., Vedel, H., Scharling, M., og Vedel, H., 2021: Betydning af instrumentskift ved overgang fra manuel til automatisk måling af nedbør. DMI rapport 21-38, 2021.

Yang, D., 2014: Double Fence Intercomparison Reference (DFIR) vs. Bush Gauge for “true” snowfall measurement, J. Hydrol., 509, 94–100, doi:10.1016/j.jhydrol.2013.08.052, 2014.

## 9 Tidligere rapporter

Tidligere rapporter fra Danmarks Meteorologiske Institut kan findes på adressen:  
<https://www.dmi.dk/publikationer/>