

SIMULERING AV AVLOPPSFLÖDEN MED REGNDATA FRÅN MOBILTELEFONNÄT I STOCKHOLM

SIMULATING URBAN DRAINAGE FLOWS WITH RAINFALL DATA DERIVED FROM MOBILE PHONE NETWORKS IN STOCKHOLM



Mathias von Scherling¹, Carl Jonsson², Jafet Andersson³, Remco (C.Z.) van de Beek³, Jonas Hansryd⁴

¹ Tyréns, 118 86 Stockholm, mathias.vonscherling@tyrens.se

² Stockholm Vatten och Avfall, Bryggerivägen 10, 106 36 Stockholm, carl.jonsson@svoa.se

³ Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut (SMHI), Folksborgsvägen 17, 60176, Norrköping, jafet.andersson@smhi.se, remco.vandebeek@smhi.se

⁴ Ericsson AB, Lindholmospiren 11, 417 56 Göteborg, jonas.hansryd@ericsson.com

Abstract

Municipal water utilities often only have access to a sparse network of rain gauges (ca. 10 in Stockholm). With sparse networks there is a risk to under- or overestimate sewer flow calculations when showers pass between gauges, or when a spatially concentrated shower hits a gauge. Moreover, significant resources are required to keep the gauge network operational and reliable. Microwave links in telecommunication networks can measure rainfall. The link network is much denser than the gauge network (here we study 500 links in Stockholm), and is continuously maintained. Such links can hence be a valuable complement to gauges. This study initially compares link-based and gauge-based rainfall data. Generally, we observed lower maximum intensities for the links compared with the gauges: the shorter the duration the larger the difference. Subsequently, we investigate how increasing network density and different types of rain data affects runoff, pipe flow and overflow in the sewer network using a hydraulic model. The results show large differences in calculated flow between varying network densities (sometimes +/-80 %), and that doubling the density often was sufficient during the seven studied rain events. Increasing the density using microwave links also gave better correspondence with measured inflow to the Henriksdal sewage treatment plant. In summary, operational telecommunication networks have a large potential to complement rain gauges for water utilities.

Keywords: Rain measurement, Commercial Microwave Links, Urban drainage modelling

Sammanfattning

Kommunala VA-organisationer har ofta endast tillgång till ett glest nät med regnmätare (ett tiotal regnstationer i Stockholm). I glesa nät finns en risk att modellberäknade avloppsflöden under- eller överskattas när regnskurar passerar där det inte finns någon station, eller när en areamässigt liten skur träffar en station. Att hålla stationsnätet fungerande och tillförlitligt är dessutom en resurskrävande uppgift.

Mikrovågs-länkar i mobiltelefonnät kan mäta regn. Länknätverket är mycket tätare än regnstationerna (här undersöks 500 länkar i Stockholm), och underhålls kontinuerligt. Länkarna kan därför utgöra ett värdefullt komplement till regnstationer. Studien jämför initialt regndata från länkar och regnstationer. Generellt observerades lägre maximala regnintensiteter för länkar än för regnstationer: ju kortare regnvaraktighet desto större skillnad. Studiens andra del undersöker hur en ökad täthet på och olika typer av regndata påverkar avrinning, flöden och bräddning i avloppsnätet m.h.a. en hydraulisk modell. Resultaten visar på stora skillnader i beräknat flöde mellan nät med olika täthet (ibland +/-80 %), och att en dubblerad täthet var tillräcklig vid de sju studerade regntillfällena. Förtätning av nätet m.h.a. länkar gav också en bättre överensstämmelse med uppmätt inflöde till Henriksdals reningsverk. Sammanfattningsvis har operativa mobilnät stor potential att komplettera regnstationer i VA-verksamhet.

1 Inledning

Regn kan mätas på många olika sätt. Från ett enkelt mätglas till mätning med radar. SMHI har ett utbrett stationsnät av kvalitetskontrollerade regnmätare men det nätet är gles, sett till att kunna fånga lokala skurar. För många stationer saknas också högre tidsupplösning. Totalt finns ca 120 högupplösta SMHI-mätare i hela Sverige. VA-verksamheter har ofta ett antal egna regnstationer utplacerade inom kommunen för sina tillämpningar. Trots ett tätare stationsnät så missar mätarna en del regnskurar och driftavbrott och kvalitetsbrister i datainsamlingen är vanliga. Trots att skötseln inte är speciellt omfattande så blir den ofta eftersatt och bortglömd i konkurrens med VA-organisationens övriga verksamhet.

Den insamlade regn-datan används ofta till ansvarsutredningar efter inträffade översvämningar eller för att till exempel beräkna årliga bräddvolymer från avloppsnätet. Av denna anledning finns det ett stort fokus på att mäta kortvarig intensiv nederbörd – just den typen av regnskurar som kan vara mycket lokala. Ofta kan regnmätning med varaktigheter på mellan 10–60 min vara av större intresse än uppmätta regnvolymer under ett helt dygn. Utredningarna görs ofta med stöd av hydrauliska modeller över avloppsledningsnätet. Det förekommer även en användning av realtidsdata för styrning av pumpstationer och reningsverk eller till digitala tvillingar över ledningsnät och verk.

Flöden i avloppsnät påverkas av nederbörd över ett större upptagningsområde. Det finns en problematik med användning av stationsuppmätt regndata från enstaka punkter till modellering av avloppsflödet som genereras över en större area. Vid

modellering beräknas i regel avloppsflödet för ett avrinningsområde baserat på den station som befinner sig närmast. Beroende på stationsnätets täthet så riskerar regnskurar passera där det inte finns någon station eller att en areamässigt liten skur som träffar en station kommer användas som underlag för beräkning av avrinning för ett mycket större område.

Det finns därför ett stort behov hos VA-organisationer av att få tillgång till fler regnsensorer som kan skapa en högre täthet i regnmätningen. Kommunikation mellan basstationer i mobiltelefonnätet görs med mikrovågs-länkar så kallade Commercial Microwave Links (CML). Dessa signaler dämpas av regn och kan med ny teknik användas för att mäta regnmängd. Ett av alternativen för att öka tätheten på regndata är att använda CML-data, vilket är fokus för den här studien.

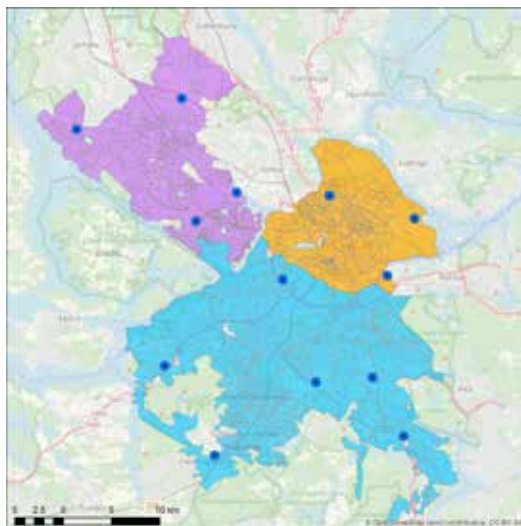
2 Syftet med studien

Studien gjordes för att undersöka hur en ökad täthet på regnstationer kunde påverka/förbättra resultat från modellberäkningar och samtidigt undersöka om CML-data kan utgöra ett komplement eller ersätta ett traditionellt stationsnät av regnmätare. Viktiga frågor för studien var till exempel:

- Hur skiljer sig regndata från regnstationer och CML åt? Till exempel vad är skillnaden i uppmätt maxintensitet och total regnvolymer?
- Har CML-mätare bättre förutsättningar att fånga upp en korrekt areell nederbördsmängd över ett större område? Går det att säga något om hur tätt ett stationsnät behöver vara för att fånga upp en korrekt regnvolymer och inte missa väsentliga regntillfällen?



Figur 1. Regnmätare av vippskålstyp.
Foto Carl Jonsson.



Figur 2. Utbredning för hydrauliska modeller över avloppsledningsnätet (färgade polygoner) som simulerar regnpåverkade flöden från ett ca 240 km² stort område med hjälp av omkring 13 regnmätarstationer (runda punkter).

- Finns det risk att flöden till reningsverk över- eller underskattas p.g.a. ett glest stationsnät?
- Kan det finnas andra problem med att ha för få regnmätare som indata till modellberäkningar för ett större område? Kan det till exempel uppstå ”krockar” i viktiga knutpunkter ledningsnätet eftersom regnet i modellberäkningen inträffar simultant över ett större område?

3 Regnmätning och modellering på Stockholm Vatten och Avfall

På Stockholm Vatten och Avfall (SVOA) mäts regn på omkring tretton platser. Platser och antalet mätare i drift har varierat mellan olika år. Sommartid pågår ofta tillfälliga flödesmätningar i avloppsnätet med samtidig regnmätning.

Regnmätning görs med vippskålmätare (tipping bucket) där en cylinderformad insamlare används. En viss regnvolym, 0,1 eller 0,2 mm orsakar att en skål som samlar regnvattnet tippas samtidigt som tidpunkten registreras, se figur 1.

Resultatet blir en kompakt dataserie med variabel tidsupplösning som beror av regnets intensi-

tet och kan beskriva variationen i en regnskur bra. Mätarna måste precis som all annan mätutrustning skötas och kalibreras. Vanliga fel är igensättning av insamlingstratten på grund av löv, fågelbajs eller snö och is. Själva vippskålen kan också fyllas med smuts så att det påverkar den regnvolym som får skålen att tippa. Regnmätaren är ofta placerad på en tryckstegringsstation för vatten för att tillgodose behov av el och uppkoppling till övervakningssystemet.

SVOA har byggt upp ledningsnätmodeller för reningsverkens huvudavloppsledningsnät. Modellerna täcker ett område på ca 240 km² och använder vanligen omkring tio regnmätare som är i drift, se figur 2. Modellerna uppdateras regelbundet med nyttillkomna områden och ledningar. Då en stor del av ledningsnätet i Stockholm är av så kallad kombinerad typ som tar hand om såväl spillvatten som regnvatten så är nederbörd en av de viktigaste indataparametrarna vid sidan om spillvattenmängder vid modellberäkningar. I de centrala delarna av Stockholm är en stor andel av de hårdgjorda ytorna anslutna till avloppsledningsnätet och svarar



Figur 3. Två mobilmaster sammankopplade med hjälp av en mikrovågslänk. Länkens signalstyrka dämpas av regndroppar som faller mellan masterna. Foto Jafét Andersson.

snabbt på nederbörd med höga flöden vilket leder till risk för överbelastning och bräddning. En modellberäkning ger information om vattenflöde och tryck i olika delar av ledningsnätet över tid. Beräkning med modellerna sker i två steg. I det första steget beräknas avrinning från varje avrinningsområde. I det andra steget kopplas avrinningen till noder i ledningsnätet och flöden och nivåer/tryck beräknas dynamiskt. Som resultat kan man ta ut tidsserier för flöden och nivåer på olika platser i ledningsnätet. Modellerna används bland annat till att beräkna årlig bräddmängd från ledningsnätet till recipienter, utredning av översvämningar samt olika kapacitetsberäkningar.

Mätning av bland annat flöde, nivå och temperatur på avloppsledningsnätet bidrar till ökad kännedom om ledningsnätets funktion. SVOA använder det till att kalibrera ledningsnätmodeller och med hjälp av AI/machine learning görs ytterligare analyser av t.ex. tillskottsvatten. För att kunna nyttja mätningar på avloppsledningsnät till analys krävs det ett omfattande arbete med att montera, drifta och underhålla sensorer. Kvalitativ regndata

är ett måste för att kunna optimera analyser utifrån sensorer på ledningsnätet. SVOA har som en del av sitt arbete med att utöka och förbättra sina mätningar sett över hur regndata samlas in idag och hur det ska kunna samlas in i framtiden. En stor brist i dagsläget är den rumsliga upplösningen. För att förbättra den rumsliga upplösningen har SVOA undersökt möjligheter med bland annat radardata, utökat stationsnät och CML-data. SVOA ser en stor fördel med metoder som inte skulle innebära mer arbete i form av drift och underhåll för organisationen.

4 Regnmätning med CML – så fungerar det

Mobiltelefonnäten är idag rikstäckande och förtätas kontinuerligt som en konsekvens av introduktionen av nya mobilteknologi generationer som 3G, 4G och nu 5G. Drygt hälften av alla basstationer i världen är uppkopplade till nätet via mikrovågslänkar (s.k. Commercial Microwave Links, CML). Länkarna transporterar informationen från en punkt till en annan strax ovanför hustak och träd med mera (Figur 3). Länkarna använder frek-

venser i GHz-bandet (i dagsläget mellan 5 och 86 GHz). I dessa frekvenser påverkas länkarnas signalstyrka till viss del av regndroppar som faller mellan mobilmasterna. Signalstyrkan dämpas i förhållande till antal och storlek på dropparna, vilket i sin tur relaterar till regnets intensitet. Genom att mäta förändringar i signalstyrkan kan alltså regnintensiteten beräknas längs med länkens sträckning.

En stor fördel med CML är att mobiltelefonnätet redan är operativa och väl utbyggda – i synnerhet i tätorter. Hi3Gs nät i Göteborg har t.ex. en densitet på 3–15 länkar per km², och ännu fler länkar finns i andra operatörers nät. Uppskattningsvis finns det ca 20 000 operativa CML i Sverige idag. Tack vare de höga operativa kraven på kommunikationsinfrastruktur är länkarna mycket robusta (i drift >99,99% av tiden), och mätning kan ske med mycket hög frekvens (var 10e sekund) på låg höjd (strax över hustaken). Utmaningarna med tekniken handlar om att tolka signalstyrkeför-

ändringarna korrekt och att spara och tillgängliggöra informationen (normalt samlas data inte in).

Tekniken att mäta regn med mobiltelefonnät började utvecklas i Nederländerna och Israel 2006–2007 (Messer et al. 2006; Leijnse et al. 2007). Sedan dess har en hel del vidareutveckling och expansion skett i bland annat Schweiz, Tyskland, Tjeckien som utvärderat tekniken med gott resultat, både i jämförelse med andra regnmätare (stationer, radar, satelliter) och i hydrologiska tillämpningar i urban miljö (Chwala et al. 2020). Under 2015 initierade SMHI, Ericsson och Hi3Gs det första svenska pilotprojektet med fokus utvärderingar i Göteborg (Andersson et al. 2017, www.smhi.se/memo), vilket sedan expanderat till Stockholm och andra områden (van de Beek et al 2020a,b). Resultaten visar på höga korrelationer mellan CML-mätningar och stationsmätningar i både tid och rum, vilket betyder att CML-tekniken fångar regnens dynamik mycket väl. Resultaten visar även



Figur 4. I figuren visas placering av länkar i en mobiloperatörs nät runt centrala Stockholm. Som en illustration visas cellstorlek, 500x500 m, för det grid som beräknas utifrån länkarnas mätningar. Fler länkar finns i andra operatörers nät. Länkarnas läge är något modifierade.

på att CML-tekniken har en god förmåga att fånga korta intensiva skurar och att placera dem på rätt plats. Tekniken är dock sämre på att uppskatta ackumulerade regnvolymer, där krävs justering mot t.ex. stationsmätningar. En studie har även utförts med fokus på flöden i Göteborgs ledningsnät där resultaten indikerar en god överensstämmelse mellan modellberäkningarna baserade på CML-regn jämfört med inflöden till Ryaverket (bättre än stationer och radar, van de Beek et al 2020a). I figur 4 visas placering av länkar i en mobiloperatörs nät runt centrala Stockholm.

5 Metod

För studien har kalibrerade hydrauliska modeller över det till stor del kombinerade huvudavloppsledningsnätet i Stockholm och Huddinge använts. Modellerna är framtagna med modellverket Mike Urban, (mike.poweredbydhi.com). Modellerna är uppbyggda av olika avrinningsområden med olika hydrologiska egenskaper samt ett ledningsnät som transporterar avrinningen inom varje område mot reningsverk. I avrinningsberäkningen beräknas avrinning från varje område utifrån den regnmätare som befinner sig närmast. I ledningsnätet beräknas tryck och vattenflöde dynamiskt. Det finns också bräddpunkter i modellen som är bra indikatorer på överbelastning och hög trycknivå i ledningsnätet. Modellerna är kalibrerade mot inflöde till reningsverk samt mot andra flödesmätningar på ledningsnätet.

Data från SVOA:s fasta regnmätare har jämförts mot CML-data. Dessutom har ytterligare några tillfälliga regnmätare använts för studien. I följande text refereras dessa som regnstationer eller i tabeller och figurer som "Stn".

Olika dataset från mikrovågslänkar har tagits fram för jämförelser mellan stationsmätt och CML-mätt regn. I följande text refereras dessa som "CML" med ett tillägg som beskriver tätheten på CML-data.

Tätheten varierades, dels per geografisk plats för regnstationer, dels för varje avrinningsområde och dels för varje CML-länk, se tabell 1.

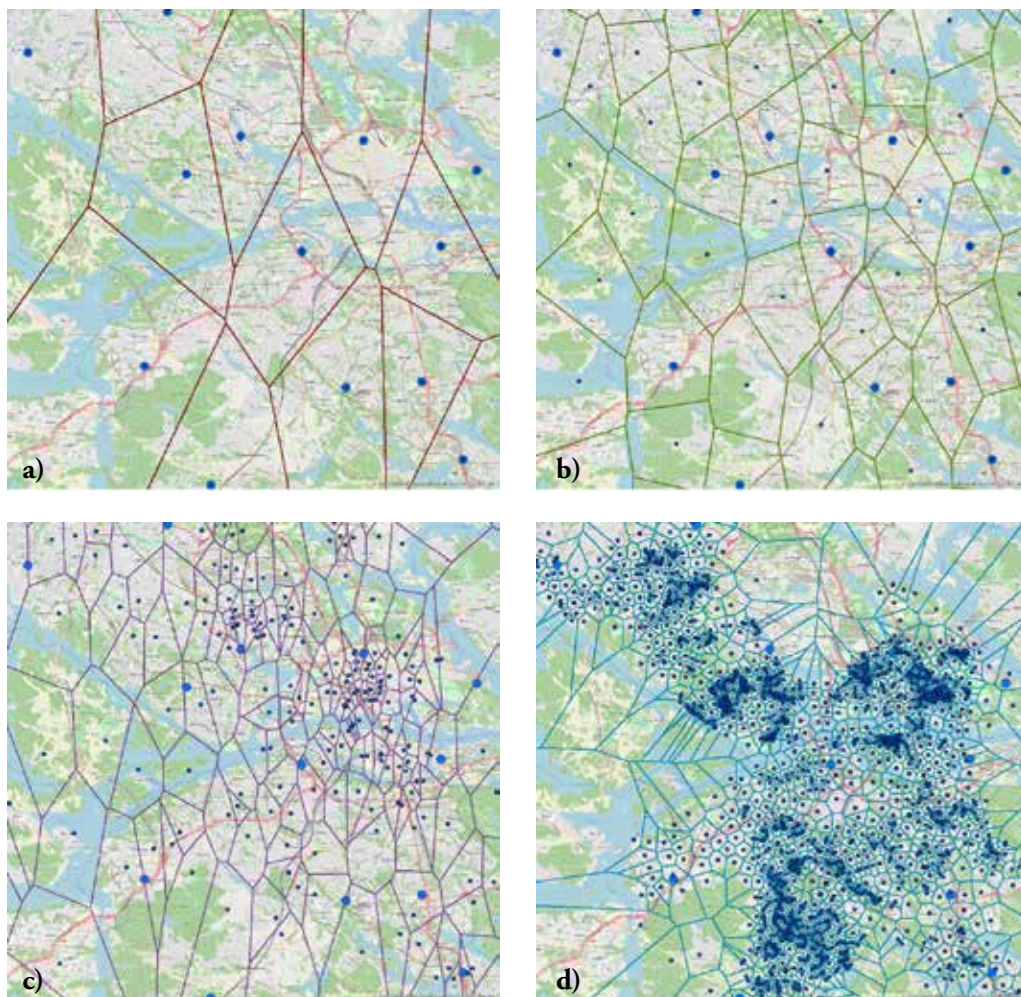
Tabell 1. Olika dataset, deras benämning och ungefärlig representativ areal vid modellberäkningar.

Dataset	km ² /mätare	Beskrivning
Stn	-20	Regndata från regnstationer på mark (vippskälmätare)
CML_Stn	-20	CML-data från platsen för varje regnstation.
CML_Stn_tät	-9	CML-data från platsen för varje regnstation och för platser mellan dessa så att en ungefärlig fördubbling av tätheten skapas.
CML_Lnk	-1,5	CML-data från varje mikrovågslänk
CML_Aro	-0,2	CML-data från varje avrinningsområde i den hydrauliska modellen.

Då ett avrinningsområde vid modellberäkning använder den geografiskt mest närbelägna regnstationen så kan en representativ areal för varje enskild regnstation i dataseten beskrivas. Arealerna bildar så kallade thiesenpolygoner. I figur 5 visas datapunkternas områden för olika dataset i studien. De tjocka punkterna är platser där det finns en regnstation.

Först jämfördes regnstationsmätt och CML-mätt regn på tio platser där regnstation och CML-länk befann sig nära varandra. Länkarna var mellan 0,3-2,6 km långa och avståndet mellan regnstation och länk var mellan 0 och 1,4 km. Parvisa jämförelser gjordes för totalt 137 regntillfällen och platser. Det som jämfördes var maximala blockregnsvolym per regn för olika varaktigheter. Begreppet blockregnsvolym avser hur många millimeter regn som faller under en bestämd tidsperiod/varaktighet, normalt utvärderat som maximalt per regn, per år eller någon annan avgränsad tid. De varaktigheter som jämfördes var 5, 15, 60 respektive 1440 min. Utvärderingen gjordes rullande, d.v.s. inte med fasta tidssteg. Sedan plottades maximala blockregnsvolym i ett punktdiagram med regnstation på x-axeln och CML på y-axeln.

Därefter gjordes avrinningsberäkningar med olika dataset för reningsverkens upptagningsområden för



Figur 5a-d. *Representativ areal för regnserier ur de olika dataseten som redovisas i tabell 1. a) visar tätheten för Stn/CML_Stn, b) visar tätheten för CML_Stn_tät, c) visar tätheten för CML_Lnk och d) visar tätheten för CML_Aro.*

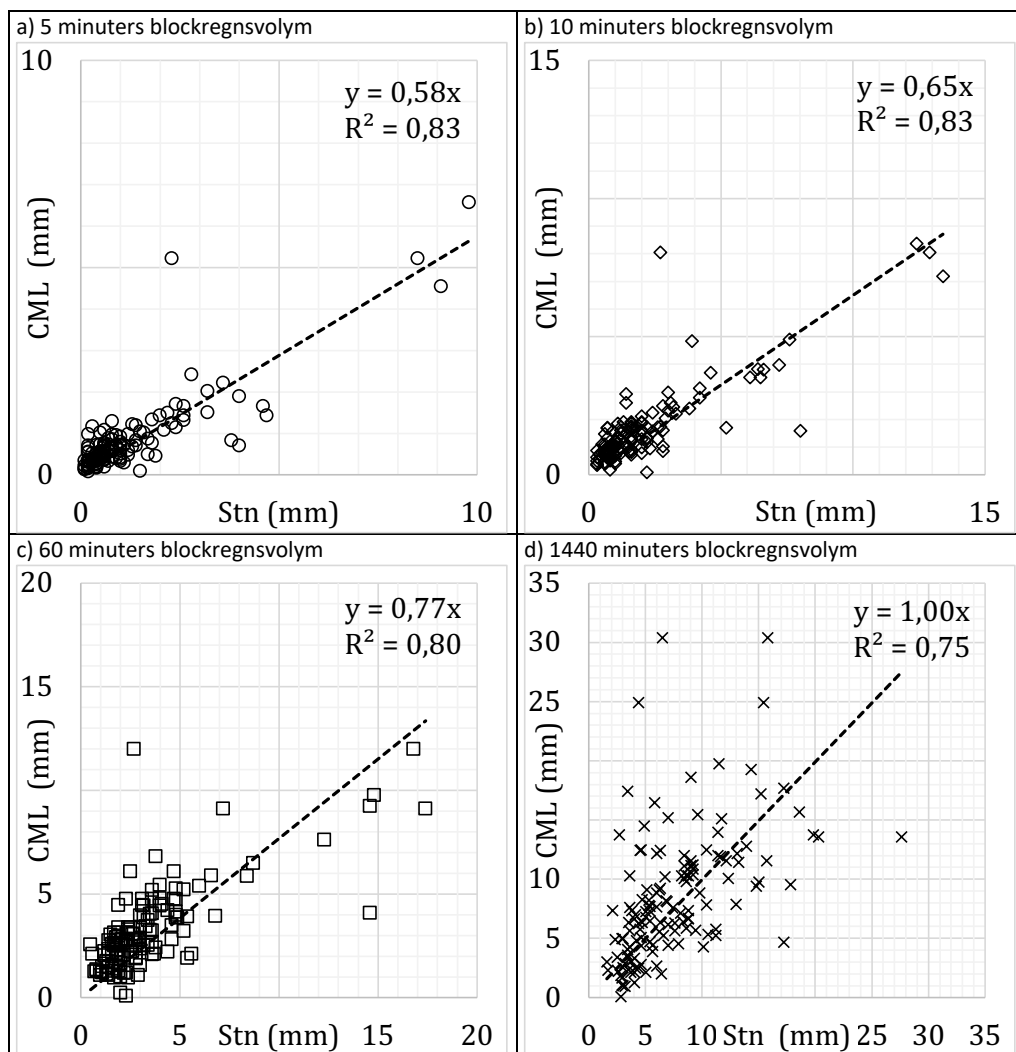
sju regndygn med mer intensiv nederbörd. Eftersom regnmängd varierar mellan olika platser var tanken med analysen att jämföra vilka effekter olika regn-datakällor – regnstationer eller CML – samt olika täthet på stationsnätet har på beräknad avrinning.

Slutligen gjordes beräkningar med olika dataset av flöden i avloppsledningsnätet för sju regndygn med mer intensiv nederbörd. Beräkningar av total bräddmängd, maximala flöden och inflöde till reningsverket jämfördes.

6 Resultat

6.1 Jämförelse mellan regnstationsdata och CML data

Jämförelse mellan maximal blockregnsvolym per regn för regnstation och CML visas i figur 6. CML-länkarna registrerade generellt sett lägre maximala blockregnsvolym än vad regnstationerna gjorde (t.ex. registrerade CML-data omkring 60 % så intensivt regn jämfört med regnstationsdata för 5–15 min varaktigheter). Med ökad varaktighet så



Figur 6a-d. Parvis jämförelse mellan 10 närliggande regnstationer och CML-länkar avseende maximal registrerad regnmängd per varaktighet (blockregnsvolym) per regn för sammanlagt 137 regntillfällen.

minskar skillnaden mellan regnstation och CML. En viss tendens till ökad spridning (minskad R^2 -koefficient) när varaktigheten ökades identifierades.

6.2 Beräknad avrinning

Avrinning beräknades för sju regndygn med mer intensiv nederbörd. Uppmätt regnmängd för tre stationer i centrala Stockholm under dessa dygn beskrivs i tabell 2.

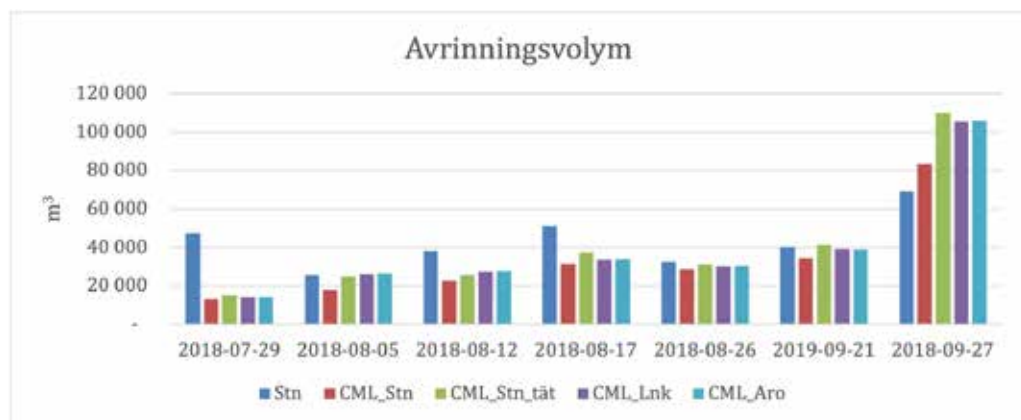
I figur 7 visas beräknade avrinningsvolymen med

olika dataset. Det är tydligt att avrinning beräknad utifrån regnstationer kan avvika mycket från det som är beräknat utifrån CML. Vid några tillfällen ligger mätningarna från regnstationerna nära CML mätningar med hög täthet, men resultaten är inte helt tydliga i denna aspekt.

En jämförelse av avvikelserna för respektive regndatasets avrinningsberäkning mot beräkningen med CML_Lnk visas i tabell 3. Regnstationsmätt (Stn) kan avvika mycket från detta CML_Lnk men

Tabell 2. Analyserade regndygn. Statistik för uppmätt regnmängd (mm) med tre olika stationer i centrala Stockholm under de analyserade regndygnen.

Uppmätt regnmängd (mm)	2018-07-29	2018-08-05	2018-08-12	2018-08-17	2018-08-26	2018-09-21	2018-09-27
Min	2,1	2,3	5,1	7,0	3,5	5,7	9,7
Medel	6,9	3,9	6,0	8,3	4,9	6,3	11,2
Max	14,8	4,9	6,7	10,1	6,3	6,7	12,6



Figur 7. Beräknad avrinningsvolym för ett antal regndygn.

även CML_Stn avviker tydligt från övriga (-5% till -32% maximalt). Genom det förtätade alternativet CML_Stn_tät minskar avvikelserna markant (+11/-6% maximalt).

6.3 Jämförelse beräknat bräddning och flöde i ledningsnät

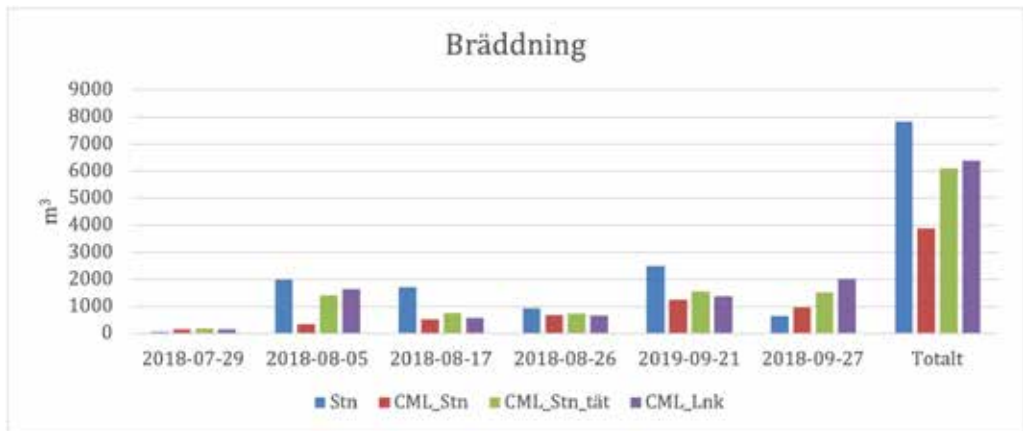
Bräddning är ett mått på överbelastning av ledningsnätet. I figur 8 visas beräknad bräddmängd för olika regndataset olika datum. Totalt sett, finns

en tydlig indikation att bräddvolymerna var högst för Stn, och att CML-experimenten med högre täthet (CML_Stn_tät och CML_Lnk) fick högre bräddvolym. Tätheten på näten påverkade dessutom bräddningen markant: CML_Stn resulterade i betydligt mindre bräddmängder än det förtätade CML_Stn_tät, som i sin tur låg nära de beräknade volymerna för CML_Lnk.

En jämförelse mellan avvikelserna för respektive beräkning av bräddning mot beräkningen med

Tabell 3. Jämförelse av avvikelser mellan beräknad avrinning för olika dataset mot beräknad avrinning med CML_Lnk.

Avvikelse från CML_Lnk							
	2018-07-29	2018-08-05	2018-08-12	2018-08-17	2018-08-26	2018-09-21	2018-09-27
Stn	229%	-2%	39%	52%	8%	3%	-34%
CML_Stn	-9%	-32%	-18%	-6%	-5%	-13%	-21%
CML_Stn_tät	6%	-5%	-6%	11%	3%	6%	4%
CML_Aro	0%	1%	1%	0%	0%	-1%	0%
CML_Lnk	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%



Figur 8. Beräknad bräddmängd (m³) vid olika regntillfällen utifrån olika regndataset.

CML-Lnk visas i tabell 4. Regnstationsmätt (Stn) kan avvika mycket från detta medelvärde men även CML_Stn avviker tydligt från övriga. Genom det förtätade alternativet, CML_Stn_tät, minskar avvikelsen markant.

Ett flertal beräkningar av beräknat inflöde till reningsverk med olika regndataskällor genomfördes. Ett exempel visas i figur 9. Ofta så visade sig flödes-

hydrografen beräknad med Stn eller CML_Stn avvika mycket från övriga beräknade flöden och med mätdata. Troligen beror det på extrapolering av för höga/låga uppmätta regnvolymer till för stora ytor.

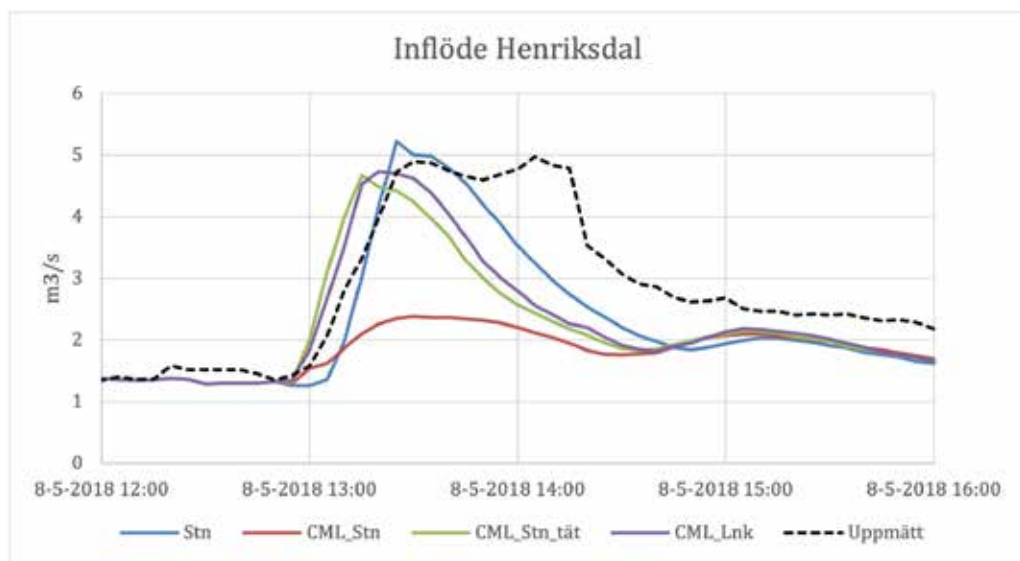
Beräkningar med olika regndataset jämfördes avseende toppflöde in till reningsverket, se tabell 5 och figur 10. Generellt sett beräknades här högre flöden för regnstationsdata än för CML-data.

Tabell 4. Jämförelse mellan beräknade bräddmängder mot beräknade bräddmängder med CML_Lnk.

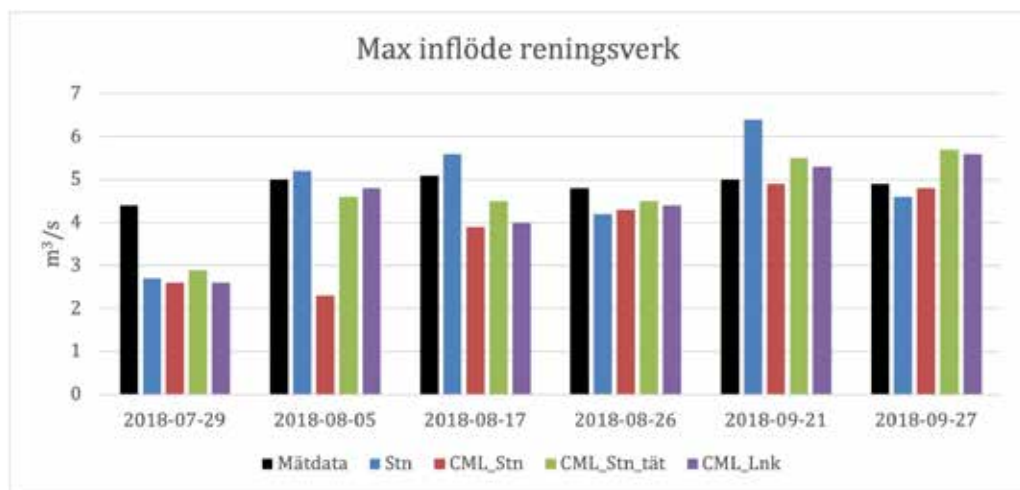
Avvikelse från CML_Lnk							
	2018-07-29	2018-08-05	2018-08-17	2018-08-26	2018-09-21	2018-09-27	Totalt
Stn	-56%	22%	202%	41%	82%	-68%	23%
CML_Stn	-1%	-79%	-9%	2%	-10%	-52%	-39%
CML_Stn_tät	14%	-14%	32%	10%	13%	-25%	-4%
CML_Lnk	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabell 5. Uppmätt och beräknat toppflöde (m³/s) med olika regndata för det norra Henriksdalsinloppet.

Toppflöde	Mätdata m ³ /s	Stn m ³ /s	CML_Stn m ³ /s	CML_Stn_tät m ³ /s	CML_Lnk m ³ /s
2018-07-29	4,4	2,7	2,6	2,9	2,6
2018-08-05	5	5,2	2,3	4,6	4,8
2018-08-17	5,1	5,6	3,9	4,5	4
2018-08-26	4,8	4,2	4,3	4,5	4,4
2018-09-21	5	6,4	4,9	5,5	5,3
2018-09-27	4,9	4,6	4,8	5,7	5,6



Figur 9. Beräknat inflöde till Henriksdals reningsverks norra inlopp med olika regndata.



Figur 10. Beräknat maximalt inflöde till Henriksdals reningsverks norra inlopp under olika regndygn.

Eftersom avloppsflödet beror av nederbördshistoriken som ju är olika för olika dataset justerades alla beräkningar till att ha samma startflöde i modellen. I likhet med utvärdering av avrinningsvolym och bräddning avviker CML_Stn mycket från

CML_Stn_tät och CML_Lnk vilka ger likvärdiga resultat. Generellt sett gav de högre upplösningarna (CML_Stn_tät och CML_Lnk) toppflöden som låg närmare flödesmätningarna vid reningsverket.

7 Diskussion och slutsatser

Jämförelsen av regndata från regnstationer och CML visar tydligt att regn uppmätt i en punkt med en regnstation generellt registrerar högre maximala regnintensiteter för kortare varaktigheter än vad regn uppmätt längs med en CML-länk gör. Detta är helt naturligt och följer av att CML-mätningen blir ett medelvärde över hela länkens längd. Det var också stor spridning i maximalt uppmätta regnintensiteter mellan regnstation och CML för olika regn vilket kanske kan förklaras i olikheter i de olika regnskurarnas utbredning och rörelsemönster vilket gör mätningen i regnstationen mer eller mindre representativ för mätningen längs hela CML-länken. Något som däremot var lite förvånande var att spridningen verkade öka ju längre tidsperiod som studerades. En hypotes var snarare att det skulle jämnas ut sig över tid. En möjlig förklaring kan vara att det har identifierats problem med CML-mätning under torra tidssteg, då andra orsaker än regn kan orsaka dämpning i mikrovågssignalen. Ju längre period som utvärderas ju fler torra tidssteg. Avrinningsberäkningarna utvärderades för hela dygn. En filtrering av sådana "icke-regn dämpningar" skulle kunna öka noggrannheten hos CML-metoden ytterligare.

Studien visar att tätheten på ett stationsnät har stor påverkan för att korrekt mäta variationer i nederbörd över ett större område. Vid modellberäkningar kan detta leda till stora över- eller underskattningar. Detta framgår tydligt när man betraktar beräkningar av avrinning, bräddning och flöde. Mätning i ett fåtal punkter, Stn eller CML_Stn, kan ge samma resultat som beräkningar med tätare indata men kan också hamna långt ifrån.

Det är tydligt att en så pass gles regnmätning som stationsnätet i Stockholm inte är tillräcklig för att vara säker att mäta en korrekt nederbörd över hela området. I de flesta fall visade sig en måttlig förtätning av stationsnätet (att gå från CML_Stn till CML_Stn_tät) ge en kraftig minskning i avvikelser från det resultatet som beräknas utifrån ett

stationsnät med hög täthet (CML_Lnk). Denna studie är genomförd på ett relativt litet dataunderlag när det gäller analyserade regn och de slutsatser som dras avseende behov av rumslig täthet på regndata är gjorda från utgångspunkten att mikrovågslänkarna mäter nederbörden korrekt. Ytterligare studier hade kunnat genomföras för fler alternativ av täthet på regndata. Mätning med CML-länkar, precis som alla andra mätningar, är utsatt för olika störningar.

Den måttliga förtätningen av regnstationsnätet som verkar ha en stor potential att bättre kunna uppskatta en korrekt areell nederbörd skulle dock vara dyr och arbetskrävande att underhålla och kvalitetssäkra. VA-verksamheten/kommunen står därför inför olika alternativ när det gäller att få tillgång till en tätare nederbördsinformation. Dels finns utökning av det fasta stationsnätet. Det finns t.ex. initiativ för att samla in och tillgängliggöra privata mätningar till exempel SMHI:s initiativ "Mina Observationer" (<https://www.smhi.se/vader/observationer/mina-observationer-wow>). Radarmätningar har också länge använts för nederbörds-mätning och sen finns den nya CML-tekniken. I tabell 6 redovisas några för och nackdelar med de olika alternativ som står till buds.

En stor fördel med regnstationer och CML-mätare gentemot exempelvis radar är att dessa mäter all nederbörd som faller på en plats eller längs en länk medan radarn kan missa nederbördsvariationer som inträffar mellan varje svep.

Något som vore verkligt intressant vore att placera referensmätningar av regn precis under utvalda CML-länkar för att undersöka möjligheten att utöka stationsnätet med komplementstationer mätta med CML och kunna göra justeringar för att kompensera för eventuella skillnader. Justeringar kunde göras avhängigt andra regnmätarens registreringar den aktuella dagen eftersom det alltid kommer att bli skillnad i utvärdering av regnintensitet i en punkt och en medelregnintensitet för en kilometerlång CML-länk för intensivare regnceller.

Tabell 6. Alternativ för en kommun för att få ökad tillgång (täthet) på regndata.

Alternativ	Fördelar	Nackdelar
Utökning av stationsnätet	<ul style="list-style-type: none"> • Noggrannhet • Relativt enkelt och billigt • Egen rådighet • Direkt mätning på marknivå • Aggregerande mätning (allt mellan tidsstegen fångas) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ökade insatser för skötsel och kvalitetskontroll • Fortfarande saknar många områden täckning • Endast punktmätningar med begränsat värde för områden mellan mätare. • Vanligt med mätfel vid regn p.g.a. vindeffekter • Kort till medellång eftersläpning mellan att regnet föll och data finns tillgängligt beroende på uppkoppling (vanligt med 6-12h) för vissa stationer
Abonnera på tjänst som nyttjar nationell C-band radardata	<ul style="list-style-type: none"> • Mycket god täckning • Regnets rörelse blir tydlig • Infrastruktur redan på plats, data kan levereras med kort eftersläpning (~5-15 min) • Begränsad klassificering av nederbördstyp som regn, snö och hagel • Mätning i området kring radarn, maximal räckvidd 200-250 km 	<ul style="list-style-type: none"> • Lägre upplösning i tid och rum (5-15 min och 2x2km) • Medelvärden över stora områden • Snapshot mätning: mäter bara vid vissa ögonblick, aggregerar ej däremellan • Indirekt regnmätning (reflektion i en volym i luften) • Mätningarna sker högt upp i atmosfären (ibland >1km) • Dämpningar som orsakar ”regnskugga” (d.v.s. områden utan täckning) • Reflektioner som inte beror på regn (t.ex. fåglar, fel i reflektionsförmåga s.k. clutter)
Installation av X-band radar	<ul style="list-style-type: none"> • Mycket god täckning • Regnets rörelse blir tydlig • Hög upplösning i tid och rum (1-5 min och 30x30 - 250x250 m) • Bättre noggrannhet än C-band radar • Begränsad klassificering av nederbördstyp som regn, snö och hagel • Mätning i närområdet kring radarn, dock lägre maximal räckvidd än C-band radar, 30-50 km 	<ul style="list-style-type: none"> • Inköp och installation • Drift och underhåll • Indirekt regnmätning (reflektion i en volym i luften) • Mätningarna sker högt upp i atmosfären • Dämpning som orsakar ”regnskugga” (dvs områden utan täckning) mycket sämre än med C-band radar • Reflektioner som inte beror på regn (t.ex. fåglar, fel i reflektionsförmåga s.k. clutter) • Snapshot mätning: mäter bara vid vissa ögonblick, aggregerar ej däremellan. Inte lika stort problem som hos C-band p.g.a. högre tidsupplösning.
Användning av CML (data från telekom-nätverk)	<ul style="list-style-type: none"> • God täckning, speciellt i tätorter • Regnets rörelse blir tydlig i tätorter • Infrastruktur redan på plats, data kan levereras med mycket kort eftersläpning (1 min) • Mycket hög tidsupplösning (10sec-1min) • Hög rumsupplösning i tätorter (van de Beek et al. 2020b) • Mätning nära marken (~30m), minskar risken att över/underskatta nederbörden eller placera den på fel plats • Mellanting mellan punktmätning och volym-mätning - mäter längs med länkens sträckning, påverkas mindre av medelvärdesbildning • Större känslighet för intensiva regn än radar • Snapshot mätning med så hög tidsupplösning att den är nästintill lika bra som en kontinuerlig mätning 	<ul style="list-style-type: none"> • Fortfarande finns områden utan täckning, men CML finns där människor finns • Data måste inhämtas från telekombolagen • Indirekt regnmätning • Signalstörningar som inte beror på regn (t.ex. båtar, byggkranar, vegetation) • Ny oslipad teknik

Alternativ	Fördelar	Nackdelar
Privata mätare	<ul style="list-style-type: none"> • God täckning i tätorter • Bra indikation på början och slutet av regntillfällena • Direkt mätning på marken 	<ul style="list-style-type: none"> • Fortfarande saknar många områden täckning • Endast punktmätningar med begränsat värde för områden mellan mätare • Mätare som ägs av medborgarna, ofta dåligt placerade och underhållna • Specifika mätare kan ändras, flyttas eller tas bort när som helst • Ingen kvalitetskontroll • Kommer ofta med strikta villkor för dataanvändning • Stor variation på eftersläpningen av data
Sakernas internet (Internet of Things, IoT)	<ul style="list-style-type: none"> • Många sensorer som potentiellt mäter användbara variabler (värmepumpar, vindrutetorkare, sociala medier). 	<ul style="list-style-type: none"> • Sällan direkta regnmätningar, men snarare indikatorer på olika väder • Låg kvalitet och osäker placering
Ett underhållet stationsnät kompletterat med andra sensorer för bättre rumslig täthet	<ul style="list-style-type: none"> • Referensmätningar kommer alltid att behövas • Tillgång till både noggrannare platsspecifika mätningar och till yttäckande mätningar • Kombinerar fördelarna från olika mättekniker 	<ul style="list-style-type: none"> • Behov av förstå och utnyttja styrkor och svagheter i olika mätningar. Är någon bättre än en annan och i så fall på vilket sätt? • Produkten är mer komplex att skapa, driva och underhålla eftersom olika källor måste slås samman så att fördelarna nyttjas och svagheter reduceras effektivt.

Som nämnts tidigare bör det noteras att ett enda instrument inte är perfekt. En regnmätare, radar eller CML har både styrkor och svagheter. Helst slås mätningarna av de olika instrumenten samman till en enda nederbörds-karta med hög rumslig och tidsmässig upplösning. Till exempel kan ett kvalitetsgranskat stationsnät av regnmätare slås samman med den rumsliga täckningen av C-band och X-band radarradar och den temporala upplösningen för CML-nätverk. En pilot inom Future-CityFlow-projektet i södra Sverige undersöker för närvarande möjligheten att slå samman många av de olika datakällor som nämns i tabell 6 till en enda produkt.

Med en sådan högupplöst nederbördsprodukt blir det möjligt att lösa vattenhanteringsutmaningar som inte tidigare var möjliga.

Då hydraulisk modellering är ett vanligt verktyg vid många tillämpningar var det positivt att se att modellverktyget med lätthet hanterade upp till 500 tidserier för regn. Detta är ett sätt som en ökad täthet på regnmätning kan komma till nytta. Mobilnäten är redan operativa som en möjlighet till förtätning av regnstationsnätet.

8 Referenser

- Andersson, J.C.M., Berg, P., Hansryd, J., Jacobsson, A., Olsson, J., Wallin, J. (2017) Microwave Links Improve Operational Rainfall Monitoring in Gothenburg, Sweden. 15th International Conference on Environmental Science and Technology, 31st August – 2nd September 2017, Rhodes, Greece. Conference paper CEST2017_00249 in the CEST2017 Proceedings
- Chwala, C., Kunstmann, H., Overeem, A., Uijlenhoet, R., Messer, H., Pinhas, A., Bares, V., Fencel, M., Van de Beek, C.Z., Andersson, J., Zougmore, F. (2020) Commercial microwave link (CML) signal level data from the cellular backhaul network: A private data source for rainfall information, still to be fully unlocked. WMO Data Conference 2020, online. Virtual Poster no. 2.02
- Leijnse, H., Uijlenhoet, R., Stricker, J.N.M. (2007) Rainfall measurement using radio links from cellular communication networks. *Water Res. Research*, 43, W03201
- Messer, H., Zinevich, A., Alpert, P. (2006) Environmental Monitoring by Wireless Communication Networks. *Science*, 312, 713–713.
- van de Beek, R. (C. Z.), Andersson, J., Olsson, J., Hansryd, J. (2020a) Five years of link network derived rainfall research in Sweden, EGU General Assembly 2020, Online, 4th–8th May 2020, EGU2020-7969, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-7969>
- van de Beek, R. (C. Z.), Olsson, J., Andersson, J. (2020b) Optimal grid resolution for precipitation maps from commercial microwave link networks, *Adv. Sci. Res.*, 17, 79–85, <https://doi.org/10.5194/asr-17-79-2020>, 2020.