

# Metoder för att undersöka extrema regnhändelsers påverkan på dagvattensystemet

Anna-Maria Gustafsson  
Gilbert Svensson  
Maria Viklander





# Metoder för att undersöka extrema regnhändelsers påverkan på dagvattensystemet

Anna-Maria Gustafsson

Gilbert Svensson

Maria Viklander

## Förord

Denna rapport är en kortfattad sammanställning av hur dagvattensystemet kan undersökas med hjälp av enklare beräkningar eller avancerade modellanalyser. Vidare finns information angående olika ingående regndata som kan användas samt parameterar som underlättar vid analys av systemets funktion.

Luleå, 2014-04-24

Anna-Maria Gustafsson,  
Gilbert Svensson  
Maria Viklander

Luleå Tekniska Universitet

## Sammanfattning

Detta projekt har genomförts av Luleå Tekniska Universitet i samarbete med 5 kommuner; Arvika, Skellefteå, Sundsvall, Trelleborg samt Växjö. Projektets syfte har varit att studera hur olika metoder kan användas för att utvärdera dagvattensystemets påverkan av extrema regnhändelser. Rapporten har skrivits i syfte att ge en övergripande bild av olika metoder och de osäkerheter som finns när de olika metoderna används. Materialet i rapporten är hämtat från aktuellt projekt samt från parallella studier vid forskningsgruppen Stadens vatten, LTU och från internationella och nationella studier för att ge ett så brett perspektiv på olika metoder som möjligt.

De metoder som beskrivs i rapporten går från en väldigt enkel analys baserat på vanliga dimensioneringsekvationer som kan utföras i ett excelark eller för hand till analyser som kräver komplexa modeller som simulerar vattenföringen i ledningsnätet samt ytavrinning kopplat till infiltration. Alla metoder kräver någon form av nederbördsinformation och därför inkluderas i rapporten ett avsnitt om regn och framtida regn kopplat till klimatförändring. För att genomföra en analys krävs även parametrar att studera effekterna av olika körningar och i slutet presenteras ett kort avsnitt om indikationer som är lämpliga att använda vid utvärdering av dagvattensystemet.

När en metod ska väljas är det viktigt att syfte med undersökning och resurser i form av tid, existerande data och pengar ställs mot varandra. En avancerad modell har ett större krav på indata, datakapacitet och på mätdata som den kan verifieras mot. I vissa fall är det bättre att använda en enklare modell med kontinuerligt, historiskt regndata medan i andra fall krävs en komplex modell som inkluderar t.ex. infiltration i permeabla ytor och att då använda sig av designregn för att klara av de begränsningar som ev. finns i datakapacitet och simuleringstid. Innan beslut tas om modell eller metod bör det noggrant funderas över varför modellen ska tas fram, hur den ska användas samt vilka data som finns tillgängliga eller kan tas fram med nya mätningar.

Om metoderna beskrivna i rapporten används på korrekt sätt och verifieras med tillräckligt data kan dessa utvärderingar av dagvattensystemet ge en bra bild av hur systemet fungerar samt hur det påverkas av olika scenarier.

## Innehåll

1. Introduktion .....	5
2. Regn .....	6
2.1. Framtida Regn .....	9
3. Enklare, översiktlig analysmetod .....	13
4. Analys med hjälp av höjddatamodell .....	17
5. Analys med ledningsmodell .....	19
6. Indikatorer .....	25
Referenser .....	27

## 1. Introduktion

Översvämningar ställer varje år till med problem i våra samhällen, beroende på allt från kraftiga regn, snösmältning eller att uppströms- eller nedströmsförhållanden ändras. Att kunna använda modeller för att analysera dagvattensystemet är ett alltmer populärt redskap och kan ge värdefull kunskap. Det är dock även viktigt att de osäkerheter som finns i metoderna uppmärksammas så att ingen falsk trygghet uppnås. På många håll i världen delas dagvattensystemet upp i ett mindre och ett större system. Det mindre systemet innehåller det byggda dagvattensystemet som är dimensionerat för rören ska gå fyllda vid t.ex. 2-10 års regn medan det större systemet är det som ska klara av att få undan vatten från ett t.ex. 100 års regn. Det här förhållningssättet har en stor fördel då planer kan göras för lång sikt, gatusystemet kan planeras med höjdsättning så att överskottsvatten leds till områden där det inte medför stora skador. Här passar modeller som använder sig av noggrann höjddata så att vattenvägar kan studeras och planeras.

Avsikten med den här rapporten är att sammanfatta olika metoder som kan användas för att analysera det lilla och det stora systemet. Metoderna har olika komplexitet och kräver olika indata och därmed har de olika inbyggda osäkerheter. Generellt sätt behövs digital information om ledningssystemet, höjddata för området, markanvändning samt klimatdata. Ska infiltration simuleras i de mer avancerade modellerna krävs även geologisk data om det översta marklagret och grundvattennivå.

Valet av analysmetod måste anpassas efter de resurser som finns och avsikten med analysen. Om indata har stora osäkerheter så sprids dessa osäkerheter vidare in genom metoden och kan bli ännu större vilket kan ge ett resultat som inte är användbart. Vidare bör man kalibrera och verifiera modellerna och ju mer avancerad metod desto mer avancerad verifiering krävs för att modellen ska gå att lita på. Det kan därför i många fall vara bättre att använda en enklare metod där medvetenhet finns om vilka förenklingar som görs än att ge sig på en mer avancerad och inte ha möjlighet att göra undersökningen på ett bra sätt.

Används metoderna på rätt sätt ger modeller en undersökningsmöjlighet som kan ge mycket information och en större förståelse för hur systemet fungerar och vilken påverkan olika händelser kan ha. Har en modell väl byggts upp kan nya användningsområden upptäckas och ge ökad kunskap inom många områden inte bara ur extremnederbördssynpunkt som den här rapporten har fokuserat på.

## 2. Regn

För att kunna undersöka dagvattensystemets funktion krävs att någon sorts nederbörd används. Vilken nederbörd i både typ och karakteristik som bör användas är inte helt enkelt att besvara utan valet kommer att påverka analysen. Idag är det absolut vanligast att studera systemet genom att använda regn utifrån vissa designkriterier. Här behöver man vara medveten att systemet reagerar olika vid olika typer av regn, vissa delar i systemet kan vara känsliga för intensiva regn medan andra för stora volymer. Ska man undersöka hur systemet fungera i ett långt perspektiv med en eventuell förändring i nederbörd, urbanisering eller med snösmältning krävs en noggrann analys om vilken nederbörd som bör användas samt hur resultatet ska tolkas utefter detta.

Vilken typ av regndata som används i en modell vid studier av VA-systemet beror på syftet med undersökningen. Vid dimensionering av dagvattensystem har generellt sett intensitets-varaktighetskurvor använts över hela världen. För en detaljerad beskrivning av regndata; intensitets-varaktighetskurvor och hur dessa ska användas vid dimensionering, se Svenskt Vattens publikation P104 "Nederbördsdata vid dimensionering och analys av avloppssystem" (2011). Vid analys av avloppssystemets funktion rekommenderas historiska regndata med hög upplösning (minutnivå) och kontinuerliga körningar. Detta medför ett ökat behov av datakapacitet och en ökning av simuleringstid. Vaes et al (2001) visade på att vid kapacitetsundersökningar är det ofta fördelaktigt att förenkla modellen och använda sig av långtids, kontinuerliga körningar för att få det bästa resultatet i relation till kostnaden i form av datakapacitet och simuleringstid istället för designregn. Detta då många hydrologiska förlopp är olinjära vilket kräver studier av olika regn.

Förutom P104 finns för Sverige ett antal rapporter av framförallt Hernebring och Dahlström som beskriver olika förfaranden gällande regn. Hernebring (2006) beskriver hur historiska regndata kan bearbetas statistiskt. I Dahlström (2010) finns en ny modell som rekommenderas för beräkning av dimensionerande regnintensitet. Beräkningarna är giltiga för regn med varaktigheter på 5 min till 24 h och har bekräftats med 98% förklarad varians och används i avsnitt 3 i denna rapport.

Regndata medför osäkerheter oavsett om historiska regn eller designregn används vid modellkörningar. Ett vanligt problem vid analys av regndata är att det generellt sett inte finns många långa kontinuerliga serier med högupplöst data. Då regnstatistik från ett decennium kan skilja sig avsevärt från ett annat för samma plats kan korta serier resultera i felaktiga slutsatser om vad som är " normalt " för orten. Regnstatistik som tas fram av SMHI baseras på observationer under 30-årsperioder. Den senaste fullständiga perioden är 1961-1990. Ny statistik från SMHI kommer således inte att finnas förrän 2020 för perioden 1991-2020. Däremot har för urbana sammanhang nyare befintlig regnstatistik med varierande längd på observationsperioden bearbetats, se Dahlström (2010) och P104 (2011). De dimensionerande regn som används idag kan således avvika från de verkliga regnen eftersom de dimensionerande regnen baseras på historiska data.



I en nyligen gjord studie vid LTU (Berggren et al, 2013) undersöks hur användandet av olika regntyper (block, CDS (Chicago Design Storm) och kontinuerliga tidserier) påverkar resultatet för analys i dagens klimat och i det framtida. Regn med återkomsttid på 2, 5, 10 och 100 år undersöks för ett avrinningsområde i Kalmar. Följande rekommendationer beskrivs i artikeln:

Blockregn: ger generellt sett lägre hydraulisk respons i ledningssystemet jämfört med CDS regn, specifika kritiska varaktigheter på regnet kan identifieras samt om problem sker vid stor volym eller hög intensitet, om flera blockregn används vid undersökningen förlängs simuleringstiden och konstant klimatfaktor kan användas.

CDS regn: ger generellt sett högre hydraulisk respons i ledningssystemet jämfört med CDS, om utvärderingen görs för att få fram maximala responsen i ledningssystemet CDS är att föredra jämfört med block, kritiska varaktigheter inkluderas i CDS regnprofilen men kan inte identifieras specifikt, relativt korta simuleringstider och konstant klimatfaktor kan användas.

Observerat högupplöst regndata: Liknande respons i hydraulisk funktion som CDS regn, konstant klimatfaktor eller mer avancerad delta change metod (se nästa avsnitt) kan användas.

Slutsatserna från undersökningen för dagens klimat är att simuleringar med blockregn ger generellt färre översvämningar för alla återkomsttider jämfört med de andra regntyperna. Detta är konsekvent med tidigare studier som visar liknande resultat vid jämförelse mellan block- och CDS-regn (Arnell, 1982). Vid jämförelse mellan CDS och kontinuerliga serier fås mer liknande resultat vilket kan tolkas som att valet inte spelar så stor roll. Fördelen med att köra kontinuerliga regn är dock att en större variation av regn fås vilket kan visa på viktiga skillnader som systemet reagerar på. Till exempel används i studien tre observerade händelser från en uppmätt tidsserie vilka har varaktigheterna 485, 121 respektive 139 min jämfört med CDS regnet som har 120 min och blockregnssekvensen som varierar mellan 5-120 min varaktighet. Detta påverkar även den totala volymen och den maximala intensiteten för de undersökta regnen. Nackdelen med att använda kontinuerliga serier är som nämnt ovan den eventuella bristen av data, det finns inget som garanterar att en serie på ett antal år innehåller några större regn samt att det ökar upp kravet på datakapacitet och simuleringstid.

I en nylig publikation av Watt och Marsalek (2013) undersöks designregn-konceptet dels ur dagens perspektiv och dels ur ett framtida perspektiv. De kategoriserar sex viktiga faktorer som påverkar dimensionerande regn: återkomsttid, varaktighet, intensitets-varaktighetsförhållandena, distributionen i tid, areal reduktionsfaktor och den föreliggande fukthalten i marken. I studien läggs även fram behovet av olika dimensionerande regn beroende av systemet som studeras. De delar in det i bland annat: ledningar, det mindre systemet (det byggda dagvattensystemet som ska klara av regn med lägre återkomsttid) samt det större systemet (inkluderar mindre systemet samt dimensionerad ytavrinning och olika fördröjningsalternativ som ska ta hand om regn med långa återkomsttider). Medan ledningssystemet dimensioneras för återkomsttider på 2-10 år, med varaktigheter på 10 minuter till 1 timme, det mindre systemet för återkomsttider på 5-10 år och med samma korta varaktighet bör det större systemet dimensioneras för återkomsttider på 50-100 år och

varaktigheter på 6-24 timmar. De lyfter även frågan om att ha två olika kriterier för dimensionering utifrån dimensionerande regn; ett utifrån kraftiga regn och ett utifrån regn vid snösmältning, som skulle kräva mycket längre varaktighet än upp till 1 h. När det gäller framtida regn sammanfattar de med att säga att idag fokuseras (studien fokuserar på den nordamerikanska situationen) endast på en parameter i debatten av framtida dimensionerande regn och det är intensitet-varaktighetskurvor och en förväntad ökning av intensiteten i framtiden. Detta är inte tillräckligt för att förstå hur förändringar i klimatet påverkar dagvattenssystemet utan det skulle behövas en heltäckande approach som tar hänsyn till alla de sex ovan nämnda faktorerna. Andra aspekter än förändrade regnstatistik har för Sverige även studerats i Semadeni-Davies et al (2008), SMHI Klimatologi Nr 3 (2010) samt SVU-rapport 2012-16.

## 2.1. Framtida Regn

Enligt klimatforskningen kommer det framtida klimatet att förändras och i norden förväntas generellt ökad nederbörd vilket kan öka risken för översvämningar (Bates et al, 2008). Framtidsscenarior för Sverige finns att hämta hos SMHI som härrör från den svenska regionala klimatmodellen RCA3s beräkningsresultat (utvecklad av Rossby centrum, SMHI) med randvillkor från de globala modellerna ECHAM4 och ECHAM5 från Max-Planck institutet för meteorologi i Hamburg (SMHI, 2012). I dessa data kan stora regionala och säsongsbaserade skillnader ses. Moghadas et al, 2011 undersökte säsong- och regionala skillnader för fyra regioner i Sverige, bland annat för Norrbotten. Till år 2100 förväntas för Norrbotten den totala nederbörden öka med hela 54% under vintertid men med endast 4% under sommartid. Skåne å sin sida förväntas få ungefär lika stor ökning vintertid (49%) medan sommartid kommer den totala nederbörden istället minska med 27%. Vidare får Norrbotten, med dagens klimat, de intensivaste regnen (definierad som största nederbörd under 1 timme) och den största totala mängden nederbörd under sommaren. Till år 2100 förväntas den svåraste perioden istället vara hösten och jämfört med dagens sommar blir det en ökning med 17% i maximal nederbörd under en timma och 19% ökning i den totala nederbörden. Här kommer dessutom den förväntade temperaturökning förändra snöperioden och avrinningen från snösmältningen vilket kan påverka vad dagvattensystemet ska klara av att hantera. Liknande analyser kan göras för alla andra regioner i Sverige.

Uppskattningen av det framtida klimatet bygger på beräkningar från klimatmodeller. De globala klimatmodellerna delar upp hela jorden i ett rutnät och försöker beskriva vad som kommer att hända med klimatet om atmosfärens innehåll förändras. Dessa modeller utgår vanligast från de framtidsscenarier (utsläppsscenarier) som FN:s klimatpanel IPCC har utarbetat (IPCC, 2000). För att kunna studera klimatet i mer detalj används regionala klimatmodeller kopplade till någon global modell. De klimatdata som nämndes ovan från SMHI:s regionala RCA3 modell har en upplösning på 50x50 km och 30 min i tiden, men det arbetas på att få en högre upplösning i både tid och rum. I simuleringar av urban hydrologiska förlopp behövs upplösningar på några minuter och över ett område på någon kilometer (Schilling, 1991) så även data från de regionala klimatmodellerna måste skalas ner. En vanlig approach är att definiera procentuella förändringar från dagens klimat till framtida utifrån en regional klimatmodell vilket sedan används på historiskt regndata. Olsson et al. (2009) beskriver en delta change metod som använts vid flera undersökningar i Sverige där de procentuella förändringarna tas fram utefter säsong och regnintensitet. Metoden använder sig av historiska högupplösta data som modifieras utefter de framtagna procentuella förändringarna. Detta medför att mer komplexa förändringar i framtida nederbörd kan studeras som t.ex. förhållanden mellan olika intensiva regntyper eller hur torrperioderna förväntas förändras (Olsson et al, 2012) vilket kan vara viktigt om man t.ex. tar med grönyrtornas bidrag till avrinningen.

I begreppet nedskalning ingår att från klimatmodellernas relativt dåliga upplösning i rummet (50 km x 50 km) eller (25 km x 25 km) och tidsupplösning på som lägst 30 minuter transformera den globala modellens data till både en bättre rumslig upplösning och en bättre

tidsupplösning. Beräkningscellernas längd i de regionala modellerna ligger upp mot 50 km och över en så stor yta kan det skilja sig signifikant vilken nederbörd som kommer. Hernebring (2008) jämförde mätdata från flertalet regnmätare inom ett begränsat område och kunde till exempelvis visa för Växjö kommun (på en yta motsvarande 50x50 km) en variation i total nederbörd under ett regn på 15-35 mm för 17 regnmätare. För att överföra punktdata till arealdata eller omvänt brukar en areal reduktionsfaktor (ARF) användas. Niemczynowicz (1984) visade utifrån 12 mätstationer i området kring Lund att ARF beror av regnets varaktighet, återkomsttid och storlek på arealen. Niemczynowicz fick värden på ARF ner till ungefär 0,7 för ett regn med 1 års återkomsttid, regnvaraktighet på 5 min och en area på 25 km<sup>2</sup> medan Hernebring i sin studie visar på ARF ner till 0,25-0,3 för ett regn med 1 års återkomsttid, areal på 25 km<sup>2</sup> och 5 min varaktighet. I Olsson et al. (2009) används en arealfaktor på 0,41 för jämförelse mellan uppmätt data och modellerat, där punktdata på ung 10 mm reduceras till ung 4 mm i arealdata. I tidiga studier av klimatpåverkande faktorer har ofta arealfaktorn utelämnats när framtida regndata använts i modellering.

Varaktigheten för ett regn kan oftast kopplas till hur molnsystemet byggs upp. Intensiva regn med kort varaktighet verkar på mindre ytor än de med längre varaktighet som kan verka över flera beräkningsrutor i en regional klimatmodell. Detta medför att man får bättre överensstämmelse för regn med längre varaktighet när man jämför uppmätt och simulerat. Mailhot et al (2007) visar på detta för regn med varaktighet på 24 och 6 timmar för södra Quebec regionen vid jämförelse mellan punktdata (uppmätt stationsdata) och RCM griddata med en upplösning på 45 km. I deras undersökningar ligger för 24 h varaktighet ARF på högre än 0,8 för regn med återkomsttider upp till 50 år, medan för 6 h varaktighet ligger ARF strax över 0,6. För 2 h varaktighet sjönk faktorn ytterligare ner till 0,4.

I studien från LTU beskriven i föregående delavschnitt (Berggren et al, inskickad) undersöks hur resultatet från simuleringar med framtida data med statisk pålagd klimatfaktor jämfört med "delta change" klimatfaktorer skiljer sig åt. I studien så har blockregn och CDS regn använts tillsammans med en konstant klimatfaktor på 1,2 medan regnserien har använts antingen tillsammans med klimatfaktorn 1,2 eller med delta change klimatfaktorer som beror på regnintensitet och säsong, se tabell 2.1.1 för värden. Tabellen visar antalet översvämmade brunnar för regn med återkomsttid på 2 år i dagens klimat.

*Tabell 2.1.1: Antal översvämmade noder för regn med återkomsttid på 2 år baserade på simuleringar med blockregn, CDS-regn och kontinuerlig tidserie ur vilken 3 händelser med motsvarande 2-års återkomsttid valts för klimatfaktor 1,2 eller delta change klimatfaktorer.*

Regn	Block	CDS	Obs. händelse 1994-09-09	Obs. händelse 1996-06-19	Obs. händelse 2002-07-24
Konstant klimatfaktor	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Översvämmade noder	2	7	9	7	10
Delta change faktorer			1,11-1,82	0,65-1,21	0,65-1,17
Översvämmade noder	-	-	40	6	8

Som kan ses i Tabell 2.1.1. varierar de pålagda delta change faktorerna över varje regnhändelse beroende på vilka intensiteter som finns i den aktuella regnhändelsen. För de två händelserna 969619 och 020724 är den högsta pålagda faktorn relativt likt den konstnata faktorn på 1,2, antal översvämmade noder är också relativt lika. För hösthändelsen däremot så är den pålagda klimatfaktorn som mest 1,82, vilket även ger markant fler översvämningar. Då delta change metoden är utvecklad för att ta hänsyn till säsongsskillnader kan man enkelt med den metoden få en mer differentierad bild. Tar man med de osäkerheter som finns med i framtida klimatfaktorer så finns det dock inget som säger att det ena är mer rätt än det andra. Däremot så kan variationen i resultat för den uppmätta serien och delta change faktorerna ge en bättre förståelse för komplexiteten i systemet och de förändringar som eventuellt måste till för att få ett robust system.

### **Osäkerhet i data**

Osäkerheterna i framtida klimatdata är stora, dels från de globala klimatmodellerna, de regionala klimatmodellerna, framtidsscenarioer samt från den fortsatta nedskalningen av data. Arnbjerg-Nielsen (2012) konstaterar att det därför inte är någon idé att ange konfidensintervall på framtida data. Det anses dock generellt önskvärt att använda data från olika scenarier, globala och/eller regionala klimatmodeller och statistiska nedskalningsmetoder för att visa på skillnader i resultat och få en uppskattning av osäkerheterna (Willems et al, 2012a). Van Roosmalen et al (2010) bekräftade detta då de undersökte resultatet från ett flertal RCM med olika upplösning i tid och rum. De drog slutsatsen att generellt så visade de olika RCM på liknande resultat men en enskild modell kunde visa relativt stor skillnad i resultat jämfört med den sammanlagda bilden. En undersökning av de tillgängliga modellerna kan därmed ge en ökad förståelse.

2008 testade Arnbjerg-Nielsen tre metoder för utvärdering av framtida förändringar inom Danmark. Resultatet gav klimatfaktorer mellan 1,1 och 1,5 för återkomsttider mellan 2-100 år och varaktigheter mellan 10 min och 24 h. På grund av osäkerheterna rekommenderade de att inte göra regionala rekommendationer för Danmark utan istället använda sig av nationella även om man i studier kommer fram till regionala skillnader. De kunde även påvisa att klimatfaktorn ökade med ökad återkomsttid och minskad varaktighet. De danska rekommendationerna är att använda en klimatfaktor på 1,2 för en 2 års återkomsttid, 1,3 för en 10 års återkomsttid och 1,4 för 100 års återkomsttid för system som har en förväntad livslängd på 100 år (Arnbjerg-Nielsen, 2012).

Vidare visade Larsen et al. (2008) i en studie för hela Europa även att osäkerheten generellt ökar med ökande återkomsttid, vilket beror på en större osäkerhet i grunddata. Det anges att det är med 68% säkerhet som klimatfaktorn är över 1 för återkomsttid på mindre än 20 år. Mailhot et al (2007) kompletterar detta med att säga att validering av klimatdata generellt är svårt på grund av två saker. En är bristen på långtidsserier med uppmätt, högupplöst nederbördsdata och det andra är den låga upplösningen på klimatmodellerna. Detta visar även Larsen et al (2008) på då deras utvärdering baseras på RCM modellkörningar med en spatial upplösning på 12 km.

Hur påverkar då dessa osäkerheter i regndata resultatet från modellkörningarna? Faurès et al (1995) kopplade flertal regnmätningar till simuleringsresultat och undersökte hur variationer i regn påverkar resultatet på den simulerade avrinningsvolym för ett 4,4 ha avrinningsområde. Studien visar att uppmätt regn från 5 stycken mätstationer inom området gav för maximal regnintensitet en variationskoefficient mellan 9-26% (förhållandet mellan standardavvikelsen och medelvärdet). Detta resulterade i sin tur i variationskoefficienter på endast 1,5-2,5% för avrinningsvolymen och 3,2-5,5% i maximal avrinningshastighet. Detta resultat är dock kopplat till det specifika avrinningsområdet och ett annat område kan resultera i större eller mindre osäkerheter. För ytterligare läsning om utvärdering av framtida regn och hur dessa påverkar urbanhydrologiska modeller rekommenderas Van Steenbergen et al (2012).

### 3. Enklare, översiktlig analysmetod

Det vanligaste vid analys av ledningssystemet är användning av mer eller mindre avancerade modeller. Ibland kan det dock finnas behov av en översiktlig analys över systemet som kan göras manuellt. Detta kan t.ex. vara vid studier av hela systemet för att sedan bestämma vart noggrannare undersökningar ska göras. En sådan enklare analys kan göras med hjälp av de ekvationer som anges i Svenskt vattens utgåvor P90 och P104; beräkningar av dimensionerande flöde med en variant av rationella metoden och Manningsekvation för flödet i rörsystemet.

För att rationella metoden ska kunna användas bör avrinningsområdet vara i det närmaste rektangulärt, rinntiderna och avrinningskoefficienten bör inte variera för mycket och avrinningsområdet bör vara litet, 40-80 ha. Därför bör större avrinningsområden delas in i mindre för att tillgodose dessa villkor. Välj storlek på områdena efter noggrannhet på beräkningarna samt efter tid och resurser. Lämplig storlek är annars mindre villaområden eller kvarter.

Beräkningsgången med alla ekvationer beskrivs kortfattat nedan följt av ett exempel. Tanken med metoden är att jämföra vilket flöde som ledningarna i dagvattensystemet ska klara utefter dagens designkrav med det flöde som ledningarna verkligen klarar av då en större standarddimension generellt har använts. I den här enklare metoden kan bedömningen väljas att göras enbart för det rör som leder ut ur varje delavrinningsområde. Inom varje delområde kommer naturligtvis varje rör ha olika egenskaper och metoden går också att använda för varje enskilt rör om resurser finns för det.

Det dimensionerande flödet för det specifika ledningsrör beräknas först,  $q_{dim}$  [l/s] kan skrivas som

$$q_{dim} = A \cdot \varphi \cdot i(tr) \quad [1]$$

- i: dimensionerande nederbördsintensitet [l/s,ha]
- tr: regnets varaktighet [min], sätts lika med områdets koncentrationstid,  $t_c$
- A: avrinningsområdets area [ha]
- $\varphi$ : avrinningskoefficient [-], viktat medelvärde från arean uppdelat på olika områden

Det regn som används i denna metod är ett dimensionerande regn och baseras på koncentrationstiden för området. Denna beräknas som tiden det tar för vatten att transporteras från den mest avlägsna punkten i avrinningsområdet. Praktiskt kan man beräkna den som tiden det tar att transportera på ytan samt tiden det tar att transportera i ledningssystemet. Den första delen brukas generellt sett sättas till 5-15 min (t.ex. ASCE, 1992) och för den andra delen används den längsta ledningen inom det aktuella avrinningsområdet samt en ansatt flödeshastighet. Avrinningskoefficienten beräknas som ett viktat medelvärde för området beroende på andel olika ytor, ekv. 2. I P90 finns angivet tabellerade värden för avrinningskoefficienter för olika typer av ytor. Förutsättningarna är att det gäller för dimensionerande intensitet och områden med måttlig lutning.

$$\varphi = \frac{A_1\varphi_1 + \dots + A_n\varphi_n}{A_1 + \dots + A_n} \quad [2]$$

Det dimensionerande regn som rekommenderas för Sverige enligt P104, om inget annat är känt, är framtaget från Dahlström (2010) och regnintensiteten kan därmed beskrivas enligt

$$i = 190 \sqrt[3]{\bar{A}} \cdot \ln tr / tr^{0,98} + 2 \quad [3]$$

i: regnintensitet [l/s,ha]  
tr: regnvaraktighet [min]  
Å: återkomsttid [mån]

För att beräkna kapaciteten på det befintliga röret så kan Manningsekvation för ett precis fyllt rör används (ekv. 4).

$$q_{rör-fylld} = M \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} = M \cdot \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} S^{1/2} \quad [4]$$

$q_{rör-fylld}$ : flöde [ $m^3/s$ ]  
M: Mannings tal [ $m^{1/3}/s$ ]  
D: Diametern [m]  
S: Rörets lutning [m/m]

Enligt P90 är Mannings tal vid normala ledningsdimensioner ca 82, 70, 64 respektive 57 för k-värdena för råhet i ledningar motsvarande 1, 3, 5, och 10 mm.

Om Ekvation 1-3 kombineras och diametern löses ut fås den behövda rördiametern för att hantera det dimensionerande flödet.

$$D_{behövd} = \left( \frac{A \varphi (190 \sqrt[3]{\bar{A}} \ln(tr) / tr^{0,98} + 2)}{M \pi S^{1/2} / 4^{5/3}} \right)^{3/8} \quad [5]$$

Normalt i dimensionering används den standardstorlek som är storleken större än uträknad behövd diameter. Detta gör att systemet har en överkapacitet som är intressant att undersöka (samt att se att systemet inte är underdimensionerat av någon orsak). Om robustheten i systemet ska ökas bör åtgärder sättas in där överkapacitet inte är så stor eller där det finns underkapacitet. Därför genomförs i den här metoden en jämförelse mellan den behövda diametern och den verkliga med ekv. 6.

$$S_{kap} = \frac{q_{rör-fylld}}{q_{dim}} \quad [6]$$

Där  $S_{kap}$  är ledningens kapacitet,  $q_{dim}$  är det dimensionerande flödet enligt ekv. 1 och  $q_{rör-fylld}$  är det verkliga rörets kapacitet enligt ekv. 4 där den verkliga diametern används

$$q_{rör-fylld} = \frac{M \pi D_{verklig}^2}{4} \left(\frac{D_{verklig}}{4}\right)^{2/3} S^{1/2} \quad [7]$$

Istället för att jämföra ledningens kapacitet kan den verkliga återkomsttiden för att fylla ledningen även bestämmas enligt ekv. 8. Nedan följer ett exempel för en ort där ledningsnätet har delats upp i mindre delavrinningsområden varav 3 stycken områden visas.



$$Verklig \text{ Å}_{fyllad} = \left( \left( \frac{M\pi D_{verklig}^2 / 4 \cdot (D_{verklig} / 4)^{2/3} S^{1/2} - 2}{A\varphi} \right) \frac{tr^{0,98}}{190 \ln(tr)} \right)^3 \quad [8]$$

Å: återkomsttid [mån]

Exempel:

Ett avrinningsområde har delats in i delområden med en storlek av 5-15 ha stora med liknande karaktär av markanvändning (i detta fall bostadsområden). För områdena har sedan tagits ut uppgifter om andel tak, gata och övrigt samt uppgifter för området och ledningen ut ur området. Valet av uppdelning i olika ytor kan bestämmas utifrån det digitala material som finns för området. Tabell 3.1. visar detaljerna för varje delområde.

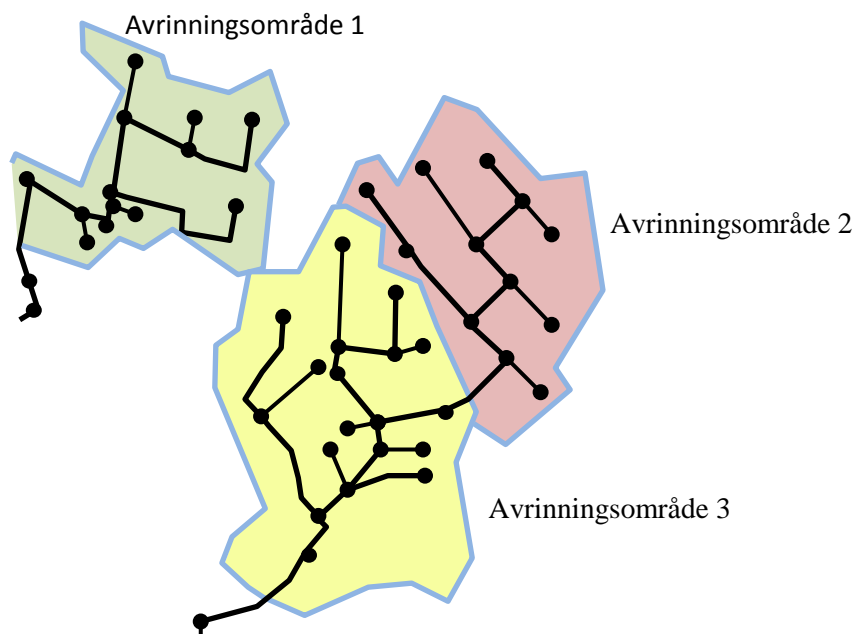
Tabell 3.1.

Delområde	Typ	Area [ha]	$\varphi$ [-]	Längsta ledningssträcka [m]	Lutning ledning ut [m/m]	Verklig rördiameter [m]
1	Tak	1,56	0,9	441,8	0,072	0,4
	Gata	0,55	0,8			
	Övrigt	4,85	0,2			
2	Tak	1,50	0,9	411,3	0,032	0,3
	Gata	0,70	0,8			
	Övrigt	6,19	0,2			
3	Tak	3,53	0,9	450,5	0,054	0,5
	Gata	1,03	0,8			
	Övrigt	10,74	0,2			

Koncentrationstiden för varje delområde beräknas i detta exempel som längsta ledningssträckan delat med en vattenhastighet på 1 m/s plus 5 min som genomsnittlig rinntid på ytan fram till brunnen. Med den beräknade koncentrationstiden kan regnintensiteten bestämmas för ett regn med 2 års återkomsttid samt dimensionerande flöde och därefter den behövda rördiametern. Sen görs samma beräkning om för den verkliga diametern och i det här exemplet har det valts att beräknas vad för återkomsttid som röret klarar av i verkligheten.

Delområde	Konc.tid [min]	Regnintensitet [l/s,ha]	Dim. flöde [l/s]	Behövd diameter [m]	Flöde vid fullt existerande rör [l/s]	Verklig Återk.tid [år]
1	12,4	119	335	0,34	508,5	7,1
2	11,9	122	385	0,42	157,9	0,13
3	12,5	118	728	0,48	798,5	2,65

Resultatet från detta exempel visar på att i delområde 1 klarar man en verklig återkomsttid på regn på 7 år, medan delområde 2 har underkapacitet och delområde 3 ganska precis klarar av dimensionerande kriterier. Visualiserat resultatet i en GIS karta kan en snabb överblick fås om i vilka områden som åtgärder behöver sättas in. Figur 3.1. visar en schematisk bild över de tre delområdena där de färgsatts utefter hur mycket överkapacitet som finns i röret. Grön – bra med kapacitet, gul – har inga stora marginaler samt röd – underkapacitet.



*Figur 3.1: Schematisk bild över de tre avrinningsområden som enklare, översiktlig beräkning har gjorts för.*

#### 4. Analys med hjälp av höjddatamodell

Detaljerad höjdinformation kan användas för analys om hur vattenvägarna är i ett område eller användas som bas för mer avancerade modellstudier. I framtiden kommer dessa analyser troligen bli allt vanligare då mer detaljerad höjddata finns tillgänglig. Regeringen har gett Lantmäteriet i uppdrag att ta fram en nationell höjddatamodell och arbetet har pågått sedan sommaren 2009 och förväntas bli klart under 2015. Målet är att ta fram en rikstäckande modell med ett medelfel i höjd på mindre än 0,5 m i ett rutnät på 2 x 2 m. På öppna plana ytor förväntas resultatet vara bättre än  $\pm 0,2$  m. Mer information om den nationella höjddatamodellen finns att läsa på Lantmäteriets hemsida (<http://www.lantmateriet.se/Kartor-och-geografisk-information/Hojddata/Ny-nationell-hojddatamodell/>).

Utifrån en höjddatamodell och ett GIS program kan lågpunkter identifieras där vatten kan ansamlas samt bestämma hur vattenvägar på ytan uppkommer inom området. Den här relativt enkla analysen kan användas för att lokalisera viktiga områden att göra mer ingående studier i eller som en snabb, kostnadseffektiv lösning för att hitta förklaringar på översvämningsproblematik (Doncaster et al, 2012). Svensson och Hedlund (2010) använde metoden för att utvärdera hur den nya nationella höjddatamodellen kan användas praktiskt. De drog slutsatsen att metoden var användbar för kommuner och att de för en relativt låg kostnad kan göra en analys av hela kommunen vilken kan öka förståelsen för orsaker till och konsekvenser av en översvämningskatastrof. Dock rekommenderar de att köpa materialet som obearbetat laserdata och tillsammans med kommunens eget GIS material göra bearbetningen av data själv.

Vanlig upplösning på digitala höjddatamodeller är 1x1m till 5x5m i horisontalplanet vilket gör att beroende av upplösning kan trottoar, gata och hus utläsas olika noggrant. Mark et al (2004) angav att en grov karta kan vara till nytta vid behov av snabba uppskattningar medan en finare behövs för mer noggrann analys. Doncaster et al (2012) rekommenderade 1x1m upplösning då de i sin studie kunde visa på att vattenvägarna kunde bli annorlunda vid användandet av en grov upplösning då höjdförhållandena blev annorlunda. Upplösningen i höjddata bör ligga i intervallet 10-50cm där en högre upplösning möjliggör för att se höjdskillnader mellan t.ex. gatunivå och trottoar. Om höjddata används i en mer avancerad modell som 2D flödesmodellering så kommer noggrannheten / upplösningen på data kraftigt påverka simuleringstiden. Här måste vinsten i ökad upplösning viktas mot det ökade behovet av datakapacitet och längre simuleringstid.

Förutom höjddata så behövs digitala kartor för att tolka, korrigera och lägga till andra aspekter. Om data köps in som laserpunktmoln och inte som bearbetat data behöver alla ytor klassificeras i olika yttypor som t.ex. mark och vatten. Detta kan göras genom verifiering mot digitala kartor (Svensson och Hedlund, 2010). Det krävs även en viss manuell editering vid broar och viadukter samt ev. för vägar och hus, beroende på vilken noggrannhet som används och vad studien ska vara till. Mark et al (2004) påpekade att det även är viktigt att ta med ett område utanför det område man är intresserad av för att få avrinningen korrekt samt att verifiera resultatet mot verklighet.

Höjdmodeller brukar delas in i olika kategorier; endast användning av markhöjddata (dvs. inga konstruktioner finns med), markhöjddata med inlagda konstruktioner som t.ex. byggnader från digitala kartor eller fullständig höjddata där alla konstruktioner är med från flygskanningen. Fördelar med att i efterhand lägga in konstruktioner är att befintliga höjddata inte blir gammalt lika snabbt när bebyggelsen förändras samt att tydligare höjdskillnader kan fås. Om det endast i höjdmodellen finns gatunivå, kan t.ex. höjdskillnaden mellan gata och trottoar ”brännas” in genom att gatan sänks eller trottoaren höjs med en given höjd (Mark et al, 2004).

Doncaster et al (2012) använde sig av tre olika höjddatamodeller för att undersöka flödesvägarna i ett område; med 1) endast markhöjddata, 2) markhöjddata med ditlagda byggnader från digitala kartor (fiktiv höjd 5 m) samt 3) höjddata med alla konstruktioner från inskanningen. De visade som nämnts tidigare på att flödesvägarna blev annorlunda. Från den första modellen fick man flöden rakt genom hus vilket oftast inte är vanlig då det finns höjdskillnader in i byggnader. Från modell nr tre visade det sig att vissa höjder visades felaktigt då mindre konstruktioner inte kom med samt att höga höjder (tak) diffunderade ut en bit över marken då höjderna beräknades för rutnätet. Deras slutsats var att modell nr två var den som var mest korrekt, dvs. att byggnader lades på markhöjddata från digitala kartor med en fiktiv höjd.

Andra konstruktioner som behöver bearbetas är broar, viadukter och tunnlar. De data som kommer från flygskanningen har inte med att vatten kan strömma under eller igenom dessa konstruktioner. Det här behöver korrigeras i efterhand med att en lämplig öppning tas upp. Om det t.ex. är en låg bro kan det annars bli att vatten istället följer gatustrukturen och viker av åt helt fel håll. Här är det viktigt att verifiera resultatet så att inte för lite eller för mycket vatten kan transporteras genom öppningen. Om det även finns smala hinder som murar och staket kommer dessa inte med i flygskanningen men de kan naturligtvis påverka flödesbilden avsevärt.

När alla korrekationer är gjorda till höjddatamodellen är det dags att börja undersöka hur vattnet rör sig. Till detta finns ett antal GIS-verktyg som kan användas för att identifiera sänkor och vattenflödesvägar. Doncaster et al (2012) har beskrivit en del av dessa verktyg och hur de kan användas. De rekommenderar även att sänkor som är mindre än 25-50 mm fylls igen så att tydliga strömningsvägar fås fram istället för att vattnet stannar upp i mindre pölar. Flödesvägarna bestäms sedan genom att i varje punkt titta på den brantaste nedåtgående riktningen. Om det inte finns någon sådan fylls cellen upp till höjden på den lägsta granncellen vilken det sedan rinner över till.

Som med alla modeller är det viktigt att de verifieras mot verkligheten. Ett bra sätt är att kontrollera mot fotografier från kraftiga regn eller mot händelserapporter där historiska översvämningar finns inrapporterade. Ju bättre verifiering desto mer minskar osäkerheterna som uppkommer vid bearbetningen av data. Den här metoden inkluderar inte ledningsnätet och innebär därmed en studie av en förenklad bild hur det större systemet fungerar när det mindre går fullt och inte längre kan avleda mer vatten.

## 5. Analys med ledningsmodell

Beräkningsmodeller för att undersöka det urbana ledningsnätet har använts sedan 70-talet. Sedan dess har de ökat i komplexitet allt eftersom datakapaciteten har ökat med tiden. Det har idag blivit allt mer vanligt att använda sig av en 1D (ledningsnätmodell) modell enskilt eller tillsammans med en 1D ytavrinningsmodell (avrinning utmed ytan längs med bestämda flödeskanaler) eller en 2D eller 3D ytavrinningsmodell (ytavrinning enligt höjdskillnader ev. tillsammans med infiltration och koppling till grundvatten). Det som åtminstone måste finnas tillgängligt för att använda sådana modeller är digital information om ledningssystemet, höjddata och markanvändning (GIS-lager).

Modellernas tillförlitlighet beror mycket på kvaliteten på indata och de måste kalibreras mot lokala förhållanden för att vara pålitliga. När väl det har gjorts kan avancerade studier av systemet funktion för olika förhållanden göras men resultaten måste alltid ställas i förhållande till den verifieringen av modellen som gjordes. Det är därmed viktigt att komma ihåg att modellen bara är bekräftad under de förhållandena som kalibreringen gjordes och utvärdera resultatet utifrån det. Vanligt är att använda t.ex. MOUSE (DHI, 2011), Infoworks (Wallingford Software, 2009) eller SWMM (EPA, 2010). Det finns dock en mängd olika modeller allt från lokala modeller till kommersiella som har byggts upp på myndigheter, företag, institutioner eller universitet. Dessa täcker undersökningsområden från översiktlig planering till avancerade detaljstudier.

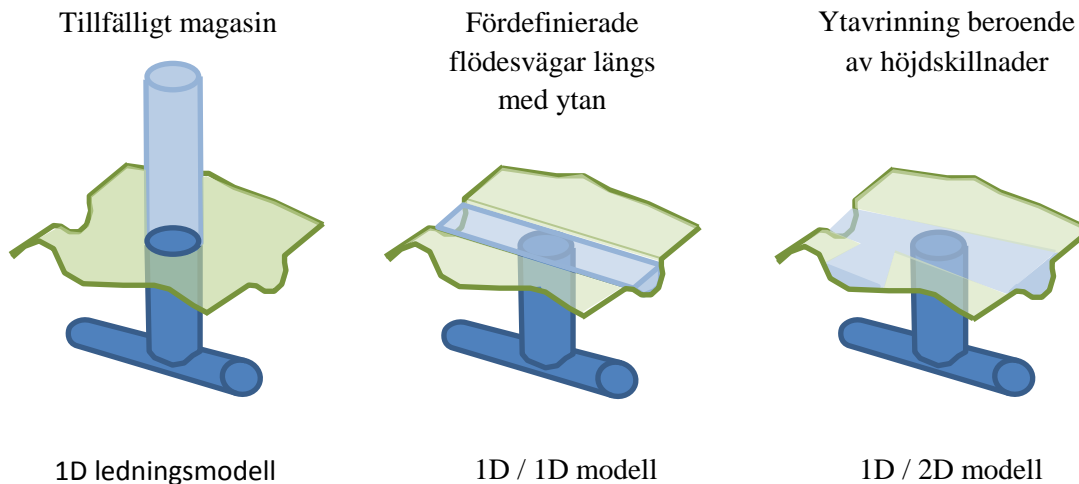
Generellt sett, för att simulera ytavrinning används enstaka regnhändelser eller kontinuerlig regnserie, avrinningsområdets karakteristik och andel impermeabla ytor för att producera en avrinningshydrograf. Denna kopplas sedan till ledningsmodellens brunnar eller gator som ger ett inflöde ner till ledningssystemet. Om det finns begränsningar i inflödet till brunnarna är det viktigt att det kommer med för att få flödena och ev. översvämningarna att stämma med verkligheten (Mark et al, 2004). Med en dynamisk 1D/1D (ledningsnät/ytavrinning) eller 1D/2D flödesmodell kan vattnet rinna både via marken och via ledningssystemet samt överföring av vatten mellan dessa via brunnarna och utlopp.

Modellen byggs upp av ett rutsystem (beräkningsceller) där beräkningar av flöden sker. Ju fler celler och ju mer detaljerad information kopplad till dessa celler desto längre beräkningstider och mer datakapacitet behövs. Shepherd et al (2011) visade att om intresset enbart är att se utbredningen av översvämningar kan ett grövre rutnät med färre beräkningsceller användas och inte lika hög detaljnivå i modellen. Medan om djupet av översvämningarna och utbredningen i tid ska studeras bör noggrannheten ökas. Exakt vad som behövs går inte att säga då detta beror av höjdskillnader och områdets karakteristik.

### **1D och 2D modellering**

I början av 70-talet utvecklades SWMM (Storm water management model) i USA (Leandro, 2009). I den första versionen simulerades endast ledningsnätet och eventuellt vatten som översteg kapaciteten flödade ut ur brunnen till ett fiktivt magasin som sedan tömdes tillbaka till samma brunn när kapaciteten i ledningsnätet ökade. Senare kom 1D/1D modellerna (t.ex.

Mike Urban, (DHI, 2011) eller Infoworks CS (Wallingford software, 2009)) som tillät flöde från en brunn till en annan genom 1D ytflöde med givna flödesvägar t.ex. längs med en gata. Dessa modeller fungerar bra så länge som flödena längs med ytan följer dessa vägar (Mark et al, 2004) men vid planare områden när vattnet ev. vill ta andra vägar kan avrinningen bli fel. Med ökad datakapacitet har därför 1D/2D modellering (t.ex. Mouse/Mike 21, (DHI, 2011)) introducerats där ytavrinningen följer de höjdkurvor som finns. Det finns även möjlighet idag att koppla modellen till simulering av infiltration och interaktion med grundvatten (t.ex Mouse/MikeSHE, (DHI, 2011)).



Figur 5.1: Olika modellers uppbyggnad; a) 1D, ledningssystem med magasin, b) 1D/1D, ledningssystem med väldefinierade kanaler för ytavrinning, c) 1D/2D, ledningssystem med ytavrinning baserade på höjdskillnader.

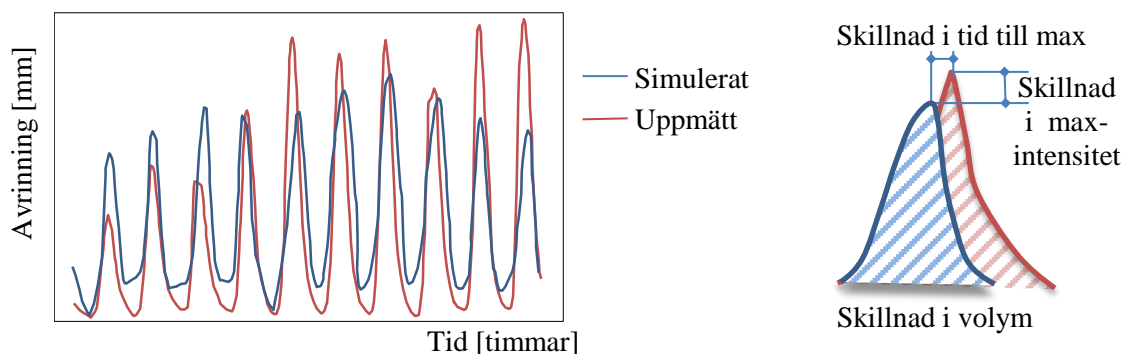
Med en ökad komplexitet i modellen som det innebär att gå från 1D till 1D/2D eller 1D/3D modellering så ökar även kraven på mängd indata, datakraft och mätdata för kalibrering samt validering. Viktigt är att beakta vad modellen ska användas till och hur verifiera ska ske (mätningar för kalibrering och verifiering kan vara en betydande kostnad) när modelltyp väljs. Ska stora områden simuleras eller resultaten användas i real-tid måste oftast komplexiteten minskas för att få rimliga krav på datakraft och beräkningstid.

Vojinovic och Tutulic (2009) visade att där översvämingsflöden längs med ytan är begränsade till väldefinierade kanaler (t.ex. längs gatustrukturen) så kan en robust 1D/1D modell när den är kalibrerad oftast ge bra resultat för beslutsfattande. Men generellt är flöden i den urbana miljön mer komplexa med väldigt stor irregularitet (påverkan av den byggda miljön med trottoarkanter, staket, byggnader m.m.) vilket kan leda till att flöden avleds annorlunda. Om terrängen är väldigt komplex kan det vara att föredra 2D simulering då den t.ex. tillåter olika rårheter för olika beräkningsceller samt avrinning åt alla håll. Oavsett vilken modelltyp som används så ställer det krav på användaren och den som bygger upp modellen. Bra kunskap om området behövs för att få ett bra resultat, för allt från beredning av data, modelluppbyggnad, kalibrering/validering, tolkning av resultat och presentation av resultat i GIS plattform.

## Kalibrering

Då ett flertal parametrar i en modell är platsberoende måste i princip alla modeller kalibreras mot lokala förutsättningar. Vilka parametrar det gäller varierar utifrån modell men kan vara ytårhet, bidrag från permeabla ytor eller infiltrationsegenskaper i mark. Kalibrering bör ske av både ytavrinningsmodellen och av ledningsmodellen om båda dessa används (Mark et al, 2004). Avrinningsmodellen kalibreras först så att avrinningshydrografen överensstämmer med verkligheten samt att flödesvägar och kapacitet längs med ytan stämmer. Sen används det som indata till ledningsmodellen för vidare kalibrering. Om modellen ska användas för att utvärdera översvämningar är det viktigt att även kunna verifiera dessa. Oftast finns inte högkvalitativa mätningar från historiska översvämningstider men då kan modelleringsresultatet t.ex. jämföras mot fotografier och inrapporterade översvämningar.

En modell bör både bli kalibrerad och verifierad mot tillgängligt mätdata. Under kalibrering ansetts värden för vissa parametrar så att simulerat och uppmätt resultat är så nära som möjligt. Antingen göra denna process manuellt eller används kalibreringsalgoritmer som i vissa fall även är inbyggda i modellen. Verifiering är till för att uppskatta hur pass bra modellen simulerar resultat för en period som är skild från kalibreringsperioden när värdena inte längre ändras på parametrarna.



Figur 5.2.a) Schematisk bild av avrinning från snösmältning – simulerat och uppmätt. b) Vanliga jämförelseparametrar – skillnad i maxintensitet, tid till max samt volym mellan simulerat och uppmätt.

Vid utvärdering av resultatet under kalibrerings- och verifieringsperiod är det vanligt att titta på tre parametrar för varje enskild händelse samt total volym under en serie av händelser. För varje avrinningstillfälle kan skillnad i maxintensitet, volym och tid från början av händelsen till dess att maxvärden fås mellan simulerat resultat och uppmätta värden jämföras. Olika undersökningar kräver olika noggrannhet i dessa parametrar vilket gör att noggrannheten i kalibrering avgörs i vad modellen ska användas till. Vanligt är sedan att rita upp figurer på uppmätt resultat jämfört med simulerat och göra statistiska analyser på detta för att se hur stor felmarginalen är. En annan metod att analysera resultatet är att genomföra en känslighetsanalys där värdet på de undersökta parametrarna förändras inom ett visst givet intervall. Ger små förändringar stora skillnader i resultat har man en känslig modell med stor inbyggd osäkerhet.

Det är relativt vanligt att tillgängliga mätdata för kalibrering och verifiering är begränsade i både tid och antalet mätpunkter, vilket försvårar denna process. De mätdata som finns delas upp i en kalibreringsperiod och en verifieringsperiod. Sun och Bertrand-Krajewski (2012) undersökte hur mängden av kalibreringsdata påverkade resultatet och hur kalibreringsperioden bör väljas för en modell avsedd att undersöka vattenkvalitet. Generellt från deras studie kan sägas att storleken på datasetet och valet av tidsperiod för kalibrering påverkar osäkerheten i resultatet. Om en större mängd kalibreringsdata inkluderas minskar osäkerheten. Men det är lika viktigt vad för händelser som kalibreringsperioden innehåller, ju större variation i volym, varaktighet och intensitet mellan händelserna desto mindre mängd data kan användas. Vid val av kalibreringsperiod från en mätserie är det därmed viktigt att välja händelser som är representativa för hela dataperioden.

En annan aspekt av att ha begränsad mängd med mätdata är hur väl modellen fungerar när den extrapolerar utanför kalibrerat område. Om modellen skapas för att undersöka extremtillfällen är det relativt ovanligt att existerande mätdata innehåller sådana tillfällen. Detta kan innebära stora fel i resultaten då t.ex. magasineringskapacitet på ytan, avrinning från naturområden eller från permeabla ytor inne i den urbana miljön inte uppskattas riktigt utifrån extrema tillfällen. Ett område som det forskas allt mer inom idag är hur gröna ytor bidrar till avrinning under olika förhållanden som t.ex. markfuktighet. Vaze et al (2010) visade för 61 rurala avrinningsområden i Australien att förhållanden under kalibreringsperiod kan påverka resultatet. I deras utvärdering visades att om kalibrering skedde under medel eller våta klimatförhållanden var modellen inte lämplig för simuleringar av torra perioder om medelårsnederbörden skilde mer än 15 %. Däremot fungerade det bättre att genomföra kalibreringen under en torrperiod och använda modellen under en medel och/eller våt period om skillnaden i medelårsnederbörd var mindre än 20 %. Detta borde dock vara lokalberoende och bero av faktorer som jordtyp, evapotranspiration och växtlighet.

### **Osäkerheter**

Beven (1993) visade att slutresultatet vid optimering av kalibreringsparametrar beror på använt mätdata och att olika dataserier kan ge olika resultat. Gaume et al (1998) uttryckte att kalibrering inte bara ska genomföras genom att minimera skillnad i simulerat och uppmätt resultat utan även bör innehålla en osäkerhetsanalys för de använda kalibreringsparametrarna. Det är först när man vet dessa som användbarheten av modellen kan bedömas (Snowling och Kramer, 2001).

Enligt Butts et al (2004) finns följande källor för osäkerhet listade i litteraturen: modell parametrar, input data, kalibreringsdata, modellstrukturer, kalibreringsmetoder och datatillgänglighet. Scarrup-Jensen et al (2005) visade att använda sig av rekommenderade värden för den hydrologiska reduktionsfaktorn istället för utvärderade för det aktuella avrinningsområdet gav avsevärda skillnader i resultat. I deras fall för ett avrinningsområde i Danmark blev skillnaden i den mest extrema CSO volymen en faktor tre. Detta visar på vikten av att göra lokala undersökningar och att ha bra kännedom om sitt avrinningsområde.



En undersökning av modellosäkerheter kan göras på olika sätt, allt från statistiska parametrar så som standardavvikelse, till analytiska beräkningar av ”förökning av fel” till mer komplexa metoder som känslighetsanalys med Monto Carlo. Ett exempel på mer komplexa beräkningar är Thorndahl et al (2008) som använder sig av GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimations) metodologi på en modell uppbyggd i Mouse på ett avrinningsområde i Danmark. Tanken med utvärdering av modellosäkerheter är att försöka kvantifiera kvaliteten på resultatet från modellen så att användaren kan värdera resultatet korrekt (Snowling och Kramer, 2001).

Osäkerhetsanalyser är inte vanliga och enligt Pappenberger and Beven (2006) kan det bero på att det inte finns så många manualer inom det området. Det har dock börjat komma ett par stycken som t.ex. Pappenbergen et al (2005), Schellert et al (2008) och Deletic et al (2011). Van Steenbergen och Willems (2012) presenterade en metod för att utvärdera hur en modell fungerar när resultatet extrapoleras utanför kalibrerat område. Metoden undersöker hur olika grader av ökning i regnintensitet resulterar i en ökning av maxflöde. Den relativa förändringen i maxflöde i ytavrinning eller i maximal intensitet för regn mellan två perioder  $m$  och  $n$  jämförs.

$$Rel. \text{ förändring}_{V(m),V(n)} = \frac{V(n) - V(m)}{V(m)}$$

Med den här undersökningsmetoden kan man upptäcka förändringar i parametrar andra än regnintensitet t.ex. avrinning från permeabla ytor, vilken påverkas av t.ex. markfuktighet. Metoden bygger på först en vanlig kalibrering och verifiering och sedan om resultatet inte är tillfredställande så kalibreras modellen om utefter en analys av ovan beskrivna flöden.

Slutligen kan nämnas att modeller framförallt är just det – försök till avbildning av verklighet och i alla modeller görs approximationer (t.ex. de ekvationer som används för att beskriva förlopp) och förenklingar (t.ex. ytråhet för ledningsrör påverkas inte av ålder på rören och förändras därmed inte i framtiden) som påverkar resultatet. Det finns även ett antal faktorer som aldrig tas med i modellen t.ex. kan föremål föras med av kraftiga flöden och täppa igen öppna kanaler eller kulvertar (Mark et al, 2004).

### **Exempel av användning**

Ett flertal studier för att utvärdera ledningssystemets funktion med hjälp av 1D till 1D/3D modellering har gjorts i Sverige och internationellt. För att nämna några exempel från Sverige undersökte Berggren et al (2012) effekter av klimatpåverkan på ledningssystemet i delar av Kalmar med en 1D (Mike Urban, DHI) modell. Där undersöktes hur systemet påverkades i form av översvämmande brunnar, höjda nivåer i brunnar samt förhållande mellan verkligt flöde och flöde när rören just går fulla. I studien användes historiskt regndata från en 10 års period som med hjälp av delta change-metoden omvandlades till framtidsscenarioer för tidsperioderna 2011-2040 (nära framtid), 2041-2070 (mellanliggande framtid) och 2071-2100 (avlägsen framtid). Framtidsscenarioerna byggdes utifrån den regionala klimatmodellen RCA3 (Rossby center, SMHI) med randvillkor från den globala modellen ECHAM4 (Max Plank Institute) samt från det globala utsläppsscenarioet SRES A2 (Nakicenovic et al, 2000). Resultatet visade

att både antal och varaktighet för översvämningar kommer att öka i framtiden med upp till 3 gånger i antal översvämmade brunnar och varaktighet i perioden avlägsen framtid. Översvämningsskartor användes även för att visa på vart problem kommer att uppstå och effekter uppströms och nedströms kunde studeras i ledningssystemet.

I SVU rapporten Plan B – hantering av översvämningar i tätort vid extrema regn (Ahlman, 2011) beskrivs en metodik för att använda sig av 1D/2D modellering (Mike Flood Urban, DHI) för att analysera översvämningar vid extrema regn. Resultatet presenteras i huvudsak med översvämningsskartor som analyseras utifrån flödesvägar, lågpunkter och instängda områden. Modellen används även för att studera hur olika åtgärder påverkar systemet för att hitta en lösning på problemet. I studien används CDS regn med återkomsttid på 10 och 100 år samt fyra studieorter med delområden från Göteborg, Kalmar, Luleå och Stockholm.

Semadeni-Davies et al. (2008) använde 1D/2D modellering (MikeSHE och Mouse, DHI) för att undersöka både klimatpåverkan och urbanisering på ledningssystemet. Studien använde sig av historiskt regndata som med hjälp av delta change metoden omvandlades till framtidsscenarioer för perioden 2071-2100 för ett delområde i Helsingborg. Klimatdata hämtades från den regionala klimatmodellen RCA0 (Rossby center, SMHI) med två olika globala modeller som randvillkor (HadAM3H, Hadley centre och ECHAM4/OPYC3, Max Planck Institute) och IPCC SRES scenarios A2 och B2 (IPCC, 2000). Urbanisering simulerades med tre stycken scenarior; inga förändringar från nuvarande situation, ökad befolkning i området där nya områden innehåller 30% impermeabla ytor och samma ökning i befolkning men att mer grönytor implementeras vilket ledde till att 25 % av ytorna var impermeabla och att mer lokal fördröjning används i systemet. Olsson et al (2013) genomförde en studie av hur en anpassning till kommande klimatförändring påverkar översvämningssituationen för Arvika stad. Arvika drabbades hårt av översvämningar från både stigande vattennivåer och stora regnmängder år 2000.

## 6. Indikatorer

Indikatorer är ett vanligt koncept att använda inom vattensektorn för att utvärdera hur systemet fungerar och för att kunna ta beslut utifrån. De vanligaste indikatorerna är dock för hur reningsanläggningar fungera, hur många och stora bräddningar som sker från kombinerade avloppssystem samt från enskilda enheter som t.ex. ett fördröjningsmagasin (Bertrand-Krajewski et al, 2002; Ashley och Hopkinson, 2002; Geerse and Lobbrecht, 2002). På senare år har även hållbarhetsperspektivet kommit in i analysen (t.ex. Ashley et al, 2008; Ellis et al 2004).

Vid utvärdering av ledningssystemet i översvämningssyfte är det bra att ha ett antal indikatorer att titta på för att få en större förståelse för hur systemet fungerar. Vanligt är att titta på antal översvämningar men andra parametrar har även varit påverkade fastigheter (Ashley et al, 2005) och hydrauliska faktorer som överbelastade ledningar, förändringar i avrinningsvolym och olika utflöden ur systemen (Waters et al, 2003; Semadeni-Davies et al, 2008; Dougherty et al, 2007; Niemczynowicz, 1989).

Kolsky och Butler (2002) tog fram ett antal indikatorer när de utvärderade ett dagvattensystem i Indien som hade stora problem med översvämningar framförallt i de fattiga delarna. De föreslog att förutom den vanliga indikatorn antal översvämningar per år så borde även utbredning, djup och varaktighet inkluderas. I studien inkluderade de även en undersökning om vad de som bodde i område tyckte var viktigt och då tillkom möjligheten att förutse översvämning så att boende hann vidta åtgärder som den absolut viktigaste. Denna del är i sig inte så lätt att tillgodose i alla lägen men har en avgörande effekt på skadorna av översvämningen.

Vid studier vid LTU har ett antal indikatorer använts för att undersöka kapaciteten i ledningssystemet. Vid en studie (Berggren et al, 2012) användes vattennivåer i brunnar på tre olika sätt samt förhållandet i rörflöde. Vattennivån studerades som maximal vattennivå i brunnen (maxnivå) (vilken framförallt användes för att studera skillnader mellan olika modellkörningar utifrån olika klimatscenarior), samt hur många brunnar där vattennivån överskrider marknivå (marknivå) eller en nivå definierade som en halvmeter nedanför marknivån (kritisk nivå). Dessa används för att se hur många brunnar som svämmas över eller är nära att svämma över vid ett enskilt regntillfälle. För att undersöka vad som hände inne i ledningarna användes förhållandet mellan modellerat flöde och det flöde som är då röret precis går fullt ( $Q/Q_f$ ). Tabell 6.1 visar hur de olika indikatorerna mätes.

Tabell 6.1: Indikatorer använda i studien Berggren et al, 2012.

Indikator	Maxvärde	Frekvens	Varaktighet
Maxnivå	Ett värde per brunn under hela undersökningsperioden		
Marknivå		- Totalt antal	- Total tid av

		översvämmade brunnar under undersökningsperioden  - Totalt antal översvämmade brunnar under en enskild regnhändelse  - Det maximala antalet översvämningar i en brunn	översvämmade brunnar under undersökningsperioden  - Översvämningstid vid enskild regnhändelse  - Maximal tid som en brunn är översvämmad
Kritisk nivå		- Totalt antal brunnar som överstiger kritisk nivå under hela undersökningsperioden  - Totalt antal brunnar som överstiger kritisk nivå under en enskild regnhändelse  - Det maximala antalet överstigningar av kritisk nivå i en brunn	- Total tid där nivån överstiger kritisk nivå för alla brunnar under undersökningsperioden  - Tid där nivån överstiger kritisk nivå vid en enskild regnhändelse  - Maximal tid som en brunn har nivån över kritisk nivå
Q/Q <sub>f</sub>	Maxvärde samt uppdelning i kategorier med värdena 0-1, 1-2 osv upp till max flödesförhållande, antal ledningar och grafisk bild.		

I en följande studie (Berggren et al, 2013) utvecklades konceptet till att inkludera de översvämmade områdena och ange dessa utifrån tre tröskelnivåer, 5, 10 och 15 cm över marknivån samt maximala flödet vid huvudutloppet. Alla dessa indikatorer kan bearbetas statistiskt för att få skillnader i resultat mellan olika modellkörningar baserade på t.ex. olika regn eller någon annan intressant parameter.

## Referenser

- Ahlman S. (2011). Plan B – hantering av översvämningar i tätorter vid extrema regn. Svenskt Vatten Utveckling Rapport 2011-3.
- Arnbjerg-Nielsen K. (2008). Quantification of climate change impacts on extreme precipitation used for design of sewer systems. 11<sup>th</sup> international conference on urban drainage, Edinburgh, Scotland, UK.
- Arnbjerg-Nielsen K. (2012). Quantification of climate change effects on extreme precipitation used for high resolution hydrological design. *Urban water journal*. 9:2, 57-65.
- Arnell V. (1982). Rainfall Data for the Design of Sewer Pipe Systems, PhD thesis, Report Series A:8, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- ASCE. (1992). Design and construction of urban stormwater management systems. ASCE Manuals and reports of engineering practice No. 77, ASCE, Alexandria, VA.
- Ashley R. och Hopkinson P. (2002). Sewer systems and performance indicators – into the 21st century. *Urban water* 4: 123-135.
- Ashley, R. M., Balmforth, D. J., Saul, A. J., and Blanksby, J. D. (2005). Flooding in the future—Predicting climate change, risks and responses in urban areas. *Water Sci. Technol.*, 52(5), 265–273.
- Ashley, R., et al. (2008). Making asset investment decisions for wastewater systems that include sustainability. *J. Env. Eng.*, 134(3), 200–209.
- Bates, B.C., et al. eds. (2008). *Climate Change and Water*. Geneva: Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat.
- Berggren K., Olofsson M., Viklander M., Svensson G., Gustafsson AM. (2012). Hydraulic Impacts on Urban Drainage Systems due to Changes in Rainfall Caused by Climatic Change. *Journal of hydrologic engineering* Vol 17:1 pp.92-98.
- Berggren K., Packman J., Ashley R., Viklander M. (2013) Climate changed rainfalls for urban drainage capacity assessment. *Urban Water Journal*. DOI: 10.1080/1573062X.2013.851709
- Bertrand-Krajewski J-L., Barraud S., Bardin J-P. (2002). Uncertainties, performance indicators and decision aid applied to stormwater facilities. *Urban water* 4:163-179.
- Beven K. (1993). Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Advances in water resources* 16:41-51
- Butts M.B., Payne J.T., Kristensen M., Madsen H. (2004). An evaluation of the impact of model structure on hydrological modelling uncertainty for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 298:242-266

Dahlström B. (2006). Regnintensitet i Sverige – en klimatologisk analys. VA-Forsk. Rapport Nr 2006-26.

Dahlström B. (2010). Regnintensitet – en molnfysikalisk betraktelse. Svenskt Vatten Utveckling. Rapport Nr 2010-05.

Deletic A., Dotto C.B.S., McCarthy D.T., Kleidorfer M., Freni G., Mannina G., Uhl M., Henrichs M., Fletcher T.D., Rauch W., Bertrand-Krajewski J.L., Tait S, (2011). Assessing Uncertainties in Urban Drainage Models. *Physics and Chemistry of the Earth* 42–44:3–10

DHI. (2011). DHI Software 2011, DHI Water & Environment AB

Doncaster S., Shepherd W., Blanksby J., Poole T. (2012). Understanding urban surface water pathways. 10<sup>th</sup> international conference on hydroinformatics. Germany, Hamburg.

Dougherty, M., Dymond, R. L., Grizzard, T. J., Jr., Godrej, A. N., Zipper, C. E., and Randolph, J. (2007). Quantifying long-term hydrologic response in an urbanizing basin. *J. Hydrol. Eng.*, 12(1), 33–41.

Ellis, J. B., Deutsch, J. C., Mouchel, J. M., Scholes, L., and Revitt, M. D. (2004). Multicriteria decision approaches to support sustainable drainage options for the treatment of highway and urban runoff. *Sci. Total Environ.*, 334–335, 251–260.

EPA (2010). Storm Water Management model. Version 5.0. United States Environmental protection agency. URL: <http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/wq/models/swmm/> Bekräftad: 2013-01-31

Faurès J-M., Goodrich D.C., Woolhiser D.A., Sorooshian S. (1995). Impact of small-scale spatial rainfall variability on runoff modeling. *Journal of Hydrology* 173: 309-326.

Geerse J.M.U., och Lobbrecht A.H. (2002). Assessing the performance of urban drainage systems: ‘general approach’ applied to the city of Rotterdam. *Urban water* 4: 199-209.

Hernebring C. (2006). 10års-regnets återkomst för och nu – regndata för dimensionering/kontrollberäkning av VA-system i tätorter. VA-Forsk Rapport Nr 2006-04.

Hernebring C. (2008). När regnet kommer Effektivare utnyttjande av kommunernas nederbördsinformation. Svenskt vatten och utveckling Rapport Nr 2008-17.

Hernebring C., Dahlström B., Kjellström E (2012). Regnintensitet i Europa med fokus på Sverige – ett klimatförändringsperspektiv. Svenskt vatten och utveckling Rapport Nr 2012-16.

IPCC (2000). Emissions Scenarios - Summary for Policymakers. A Special Report of IPCC Working Group III. International Panel of Climate Change. ISBN: 92-9169-113-5

Kolsky P. och Butler D. (2002). Performance indicators for urban storm drainage in developing countries. *Urban water* 4: 137-144.

- Larsen A.N., Gregersen I.B., Christensen O.B., Linde J.J., Mikkelsen P.S. (2009). Potential future increase in extreme one-hour precipitation events over Europe due to climate change. *Water science and technology* 60.9: 2205-2215
- Leandro J., Chen A., Djordjevic S., Savic D. (2009). A comparison of 1D/1D and 1D/2D coupled hydraulic models (Sewer/Surface) for urban flood simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE Volume 135, Issue 6, pp. 495-504.
- Mailhot A., Duchesne S., Caya D., Talbot G. (2007). Assessment of future changes in intensity-duration-frequency (IDF) curves for southern Quebec using the Canadian regional climate model (CRCM). *Journal of Hydrology* 347: 197-210.
- Mark O., Weesakul S., Apirumanekul C., Aroonnet S.B., Djordjevic S. (2004). Potential and limitations of 1D modeling of urban flooding. *Journal of hydrology* 299:284-299.
- Moghadas, S., Berggren K., Gustafsson, A-M. & Viklander, M. (2011). Regional and Seasonal Variation in Future Climate – Is Green Roof one Solution. 12th International Conference on Urban Drainage. Porto Alegre, Brazil.
- Nakicenovic, N., et al. (2000). “IPCC special report on emissions scenarios.” Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge.
- Niemczynowicz J. (1984). An Investigation of the Areal and Dynamic Properties of Rainfall and its influence on Runoff generation Processes. PhD Thesis. Report no 1005. Vattenresurslära LTH.
- Niemczynowicz, J. (1989). “Impact of the greenhouse effect on sewerage systems: Lund case study.” *Hydrol. Sci J.*, 34(6), 651–666.
- Olsson J., Berggren K., Olofsson M., and Viklander M. (2009). “Applying climate model precipitation scenarios for urban hydrological assessment: A case study in Kalmar City, Sweden.” *Atmos. Res.*, 92(3), 364–375.
- Olsson, J., Gidhagen L., Gamerith V., Gruber G., Hoppe H. and P. Kutschera. (2012) “Downscaling of short-term precipitation from Regional Climate Models for sustainable urban planning.” *Sustainability*, 4:866-887.
- Olsson, J., Amaguchi H., Alsterhag E., Dåverhög M., Adian P-E. and A. Kawamura. (2013) “Adaptation to climate change impacts on urban flooding: a case study in Arvika, Sweden.” *Climate Change*, 116:231-247.
- Pappenberger F. and Beven K.J. (2006). ”Ignorance is bliss: or seven reasons not to use uncertainty analysis.” *Water resources research* 42, W05302, doi:10.1029/2005WR004820

Pappenberger F., Harvey H., Beven K., Hall J., Romanowicz R., Smith P. (2005). Risk & Uncertainty Tools and Implementation. Report Hydrology and Fluid Dynamics Group. Lancaster university

Schaarup-Jensen K., Johansen C., Thorndahl S. (2005). Uncertainties related to extreme events statistics of sewer system surcharge and overflow. 10<sup>th</sup> international conference on urban drainage, Copenhagen/Denmark.

Schellart A., Tait S.J., Ashley R.M. (2008). Protocol for the assessment of uncertainty in integrated catchment modelling. Report prepared for Yorkshire water services Ltd. Pennine water group. University of Sheffield and University of Bradford

Schilling, W. (1991). Rainfall data for urban hydrology: What do we need? Atmos. Res., 27(1-3), 5–21.

Semadeni-Davies A., Hernebring C., Svensson G., Gustafsson LG. (2008). The impact of climate change and urbanisation in Helsingborg, Sweden: Suburban stormwater. Journal of Hydrology 350: 114-125.

Shepherd W., Blanksby J., Doncaster S., Poole T. (2011). Quantifying the effect of buildings and surface roughness on 2D flood modeling. 12<sup>th</sup> international conference on urban drainage, Porto Alegre, Brazil, September 2011.

Olsson J, Dahné J., German J., Westergren B., von Scherling M., Kjellson L., Ohls F., Olsson A. (2010) En studie av framtida flödesbelastning på Stockholms huvudavloppssystem.. Klimatologi Nr 3. SMHI. ISSN 1654-2258 CLIMATOLOGY

SMHI (2012) Scenariodata, Fria data från Rossby Centres klimatscenarioberäkningar. <http://www.smhi.se/klimatdata/klimatscenarier/scenariodata> (hämtad 2012-12-11)

Snowling S.D., Kramer J.R. (2001). Evaluating modeling uncertainty for model selection. Ecological modeling 138:17-30.

Sun S., Bertrand-Krajewski J-L. (2012). On calibration data selection: the case of stormwater quality regression models. Environmental Modelling & Software 35:61-73.

Svenskt Vatten, Publikation P90 (2004): Dimensionering av allmänna avloppsledningar.

Svenskt Vatten, Publikation P104 (2011): Nederbördsdata vid dimensionering och analys av avloppssystem.

Svensson G., Hedlund U. (2010). Kommunal översvämningssplanering med nya nationella höjdmodellen. Rapport från Tyréns AB. URL: [http://www.tyrens.se/Global/Projekt/nationella%20h%C3%B6jdmodellen/rapport\\_101115\\_sandviken.pdf](http://www.tyrens.se/Global/Projekt/nationella%20h%C3%B6jdmodellen/rapport_101115_sandviken.pdf) Verifierad 2013-01-29



- Thorndahl S., Beven K.J., Jensen J.B., Schaarup-Jensen K. (2008). Event based uncertainty assessment in urban drainage modeling, applying the GLUE methodology. *Journal of hydrology* 357: 421-437
- Vaes G., Willems P., Berlamont J. (2001). Rainfall input requirements for hydrological calculations. *Urban water* 3: 107-112.
- Van Roosmalen L., Christensen J.H., Butts M.B., Jensen K.H., Refsgaard J.C. (2010). An intercomparison of regional climate model data for hydrological impact studies in Denmark. *Journal of hydrology* 380:406-419.
- Van Steenbergen N., Willems P. (2012). Method for testing the accuracy of rainfall-runoff models in predicting peak flow changes due to rainfall changes, in a climate changing context. *Journal of hydrology* 414-415: 45-434.
- Vaze J., Post D.A., Chiew F.H.S., Perraud J-M., Viney N.R., Teng J. (2010). Climate non-stationarity – Validity of calibrated rainfall-runoff models for use in climate change studies. *Journal of hydrology* 394: 447-457.
- Vojinovic Z., Tutulic D. (2009). On the use of 1D and coupled 1D-2D modeling approaches for assessment of flood dam damage in urban areas. *Urban water Journal* 6:3, 183-199.
- Wallingford Software. (2009). Infoworks CS Help. Wallingford Software, United Kingdom
- Waters, D., Watt, W. E., Marsalek, J., and Anderson, B. C. (2003). Adaptation of a storm drainage system to accommodate increased rainfall resulting from climate change. *J. Environ. Plann. Manage.*, 46(5), 755–770.
- Watt E., Marsalek J. (2013). Critical review of the evaluation of the design storm event concept. *Can. J. Civ. Eng.* 40:1-9.
- Willems P., Arnbjerg-Nielsen K., Olsson J., Nguyen V.T.V. (2012a). Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings. *Atmospheric Research* 103:106-118.
- Willems P., Olsson J., Arnbjerg-Nielsen K., Beecham S, Pathirana A., Gregersen B., Madsen H, Nguyen V.T.V. (2012b). *Impact of climate change on rainfall extremes and urban drainage systems*. IWA Press, London.

ISSN 1402-1528

ISBN 978-91-7439-955-4 (pdf)

Luleå 2014

[www.ltu.se](http://www.ltu.se)