



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W15009

Examensarbete 30 hp
Mars 2015

Modellering av avrinning från gröna tak

Avrinningskoefficienter och modellparametrar

Camilla Andersson

REFERAT

Modellering av avrinning från gröna tak – avrinningskoefficienter och modellparametrar *Camilla Andersson*

Expansion och förtätning av städer leder till att såväl areal som andel hårdgjord yta ökar i våra stadsmiljöer. Detta genererar en ökad dagvattenavrinning eftersom regnvattnet inte har samma möjlighet att infiltrera i naturmarker och grönområden. Den ökade mängden dagvatten riskerar att orsaka problem i områden där ledningsnätet dimensionerats för de dagvattenmängder som tidigare varit aktuella. Att utöka ledningsnätets kapacitet är ofta mycket kostsamt och det är därför önskvärt att istället minska belastningen på de befintliga systemen. En allt vanligare metod för detta är att byggnaders takyta bekläds med växter, så kallade gröna tak. De gröna taken har potential att minska den avrunna volymen, fördröja avrinningen och dämpa de maximala flödena. Det råder dock osäkerheter kring hur dessa förmågor påverkas av bland annat olika väderförhållanden och takets vattenmättnadsgrad samt vid olika typer av nederbördshändelser.

Syftet med detta examensarbete var att undersöka möjligheten att simulera avrinningen från gröna tak med hjälp av en befintlig funktion i modelleringsprogrammet SWMM från US Environmental Protection Agency samt med hjälp av Mike Urban från företaget DHI. Ett mål var att sedan använda en av modellerna för att utvärdera hur gröna tak kan påverka belastningen på ett befintligt ledningsnät. Mätdata avseende bland annat nederbörd, avrinning och potentiell avdunstning erhöles från Veg Tech AB och AgroTech A/S. Mätningarna hade utförts vid företagets demonstrationsanläggning i Taastrup, Danmark, och omfattade avrinning från gröna tak med tre olika tjocklekar: 4 cm moss-sedum, 7 cm sedum-ört-gräs och 11 cm sedum-ört-gräs, samt ett hårdgjort referenstak. Inledande dataanalyser av de gröna takens kapacitet visade att takens magasineringskapacitet ökade med en ökad taktjocklek, där de tjockare taken kunde fullständigt magasinera större nederbördshändelser än vad som var fallet för det tunnaste taket. En analys av sambandet mellan nederbördsmängd och avrunnen volym visade ett starkare samband för regn med 60 och 120 minuters varaktighet än vad som var fallet för kortare varaktigheter.

Jämförelser av resultaten hos de båda modelleringsprogrammen visade på olika styrkor och svagheter och ingen av programvarorna gav en i alla avseenden tillfredställande simulering av avrinningen. Mike Urban gav generellt en högre förklaringsgrad men gav alltid en överskattning av den avrunna volymen över en längre tidsperiod. SWMM gav en bättre överensstämmelse med uppmätt avrinning än Mike Urban under de första månaderna av simuleringsperioden, men gav generellt en förskjutning av avrinningsförloppet. För kalibreringen mot 4 cm taktjocklek gav SWMM också en mer korrekt avrunnen långtidsvolym, medan den för de andra konstruktionerna gav liknande resultat som var fallet för Mike Urban. I ett exempel användes en av modellerna för att simulera avrinningen från MAX IV-laboratoriet i Lund. Resultaten visade att det då laboratoriet täckts med gröna tak endast behövdes ett en fjärdedel så stort fördröjningsmagasin för att översvämningar skulle undvikas på ett nedströms beläget fiktivt ledningsnät än vad som var fallet för hårdgjorda tak.

Nyckelord: gröna tak, dagvattenmodellering, hållbar dagvattenhantering, Mike Urban, SWMM
Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala universitet
Geocentrum, Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala
ISSN 1401 5765

ABSTRACT

Modelling runoff behaviour from green roofs – runoff coefficients and model parameters

Camilla Andersson

Larger and denser cities result in increasing amounts of impervious surfaces in urban areas. This generates an increase in storm water runoff, as the rainwater is prevented from infiltrating in natural soils and instead flows along the paved surfaces. The increased amount of storm water runoff is liable to cause problems in areas where the storm water system has been designed to handle the amounts of runoff previously generated in the area. Upsizing the capacity of the pipelines is usually costly, and it is therefore desirable to instead reduce the load on the existing system. One way of achieving this is to cover the rooftops with vegetation, so called green roofs. Green roofs are growing in popularity and have the potential to reduce the rate and volume of runoff, as well as attenuating the peak discharge. There are however uncertainties regarding how their abilities are affected by for example the antecedent weather conditions and the moisture content of the roof, as well as by various storm events.

The purpose of this Master's Thesis was to study the possibility to simulate the runoff from green roofs using an existing function in the modelling software SWMM by US Environmental Protection Agency, and using Mike Urban by the company DHI. An additional objective was to use one of the designed models to evaluate how green roofs can affect the load on an existing storm water system. Measurements of precipitation, runoff and potential evapotranspiration were obtained from Veg Tech AB and AgroTech A/S. The measurements had been carried out at their demonstration site in Taastrup, Denmark, and included runoff from green roofs of three different thicknesses: 4 cm moss-sedum, 7 cm sedum-herb-grass and 11 cm sedum-herb-grass, as well as an impervious roof used as reference. Initial analyses of the data showed that the storage capacity increased with an increased roof thickness. The thicker roofs were able to completely retain the rainfall from larger storm events than what was the case for the thinnest roof. An analysis of the relationship between precipitation depth and runoff volume showed a stronger correlation for rains with 60 and 120 minutes duration than what was the case for shorter durations.

Comparisons of the two models' performance showed different strengths and weaknesses, and none of the models were able to simulate runoff in a way that was satisfactory in all aspects. Mike Urban generally gave a higher coefficient of determination but consistently overestimated the discharged volume for extended time periods. SWMM gave a better conformity in observed runoff than Mike Urban during the first months of the simulation period, but generally gave a time lag in the runoff hydrograph. For the 4 cm roof calibration, SWMM also gave a more correct long-time runoff volume, while both models performed similarly for the other roof thicknesses. In an example, one of the models was used to simulate the runoff from the MAX IV laboratory in Lund. The results showed that in order to avoid flooding in the fictitious downstream storm water network, there had to be a four times larger detention pond in the case where conventional roofs were used compared to the scenario using green roofs.

Keywords: Green roofs, Storm water modelling, Sustainable storm water management, Mike Urban, SWMM

*Department of Earth Sciences, Program for Air, Water and Landscape Science,
Uppsala University, Geocentrum, Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala
ISSN 1401-5765*

FÖRORD

Detta examensarbete om 30 hp utgör den avslutande delen av mina studier på civilingenjörsprogrammet i Miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet. Arbetet har utförts på Tyréns AB i Stockholm och jag vill tacka samtliga på avdelningen för VA-teknik för en mycket trevlig och lärorik tid. Ett särskilt tack till min handledare Hans Hammarlund på Tyréns för all den värdefulla hjälp och handledning jag fått under arbetets gång, och till min ämnesgranskare Sven Halldin vid Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten och landskapslära, Uppsala universitet, för goda råd på vägen. Tack också till Allan Rodhe vid Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten och landskapslära, Uppsala universitet, som varit examinator för detta arbete.

Jag vill även rikta ett stort tack till Veg Tech AB och AgroTech A/S, som tillhandahållit mätdata och på så vis möjliggjort detta examensarbete. Ett särskilt tack till Lina Pettersson och Johan Thiberg för idéer, uppmuntran och hjälp, och till Lars Jørgensen för entusiasm och för all information du bistått med. Jag vill också tacka Sten Blomgren på DHI för att ha tillhandahållit en studentlicens för Mike Urban under mitt examensarbete och Fastighets AB ML4 för tillstånd att använda mig av MAX IV-laboratoriet som ett exempel i arbetet.

Tack också till DHI (Sten Blomgren) för tillstånd att reproducera Figur 3, till Veg Tech (Lina Pettersson) för Figur 4, 7, 8, till AgroTech (Lars Jørgensen) för Figur 4, 6 och till Fastighets AB ML4 för Figur 9.

Slutligen vill jag tacka min familj och mina vänner, och min Jonas för att du alltid finns där.

Uppsala, mars 2015

Camilla Andersson

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Modellering av avrinning från gröna tak – avrinningskoefficienter och modellparametrar

Camilla Andersson

Växande städer och tätare bebyggelse gör att andelen grönområden idag minskar i många städer. Detta leder till att en större del av det regn som faller fångas upp på ogenomträngliga ytor där det inte kan infiltrera vidare ner i jorden, utan tvingas istället rinna av ovanpå marken. De kommande klimatförändringarna förväntas dessutom leda till större regnmängder över stora delar av Sverige, vilket också kommer leda till mer yttligt avrinnande vatten. Det vatten som på detta sätt rinner från exempelvis gator och parkeringsplatser kallas dagvatten, och måste på något sätt tas om hand och ledas till bäckar eller sjöar. I städer görs det här vanligen via diken eller rörledningar som grävts ner i marken.

Ledningsnäten i städerna har ofta inte kapacitet att ta emot ökade vattenflöden, och eftersom det skulle vara kostsamt att ersätta dem med större ledningar har det istället blivit vanligt med metoder för att minska mängden dagvatten. En metod som används allt oftare är anläggning av så kallade gröna tak, där taken på byggnader bekläds med olika typer av växter. De gröna taken fungerar som en naturmark i miniatyr där regnvattnet kan infiltrera genom jordmaterialet och tas upp av takets växter istället för att omedelbart rinna av från taket. Det här gör att gröna tak släpper ifrån sig mindre vattenmängder när det regnar och att vattnet rinner av långsammare än vad det annars skulle ha gjort.

De gröna takens förmåga att ta hand om regnet påverkas dock av många faktorer. Takets möjlighet att ta upp vatten minskar till exempel vid kraftiga regn och om takjorden inte hunnit torka efter tidigare regn. Det här innebär att det är svårt att förutse hur avrinningsförloppet från taken kommer se ut, inte minst vid stora regn, vilket är nödvändigt för att kunna beräkna hur stora dagvattenflöden som kommer behöva tas om hand i ett område. Ett möjligt sätt att lösa problemet är att använda datormodeller för att beräkna vattenflödet från taken. Modeller är förenklade beskrivningar av verkligheten som kan ta hänsyn till om taket exempelvis är blött till följd av tidigare regn.

Det här examensarbetet har undersökt möjligheten att använda datormodeller för att beräkna hur mycket vatten som rinner av från gröna tak. I arbetet har två olika programvaror använts: SWMM, utvecklat av det amerikanska naturvårdsverket, och Mike Urban från DHI. Båda modellerna används ofta inom branschen, till exempel för att beräkna hur dagvattennätet kommer att påverkas när nya områden bebyggs. För att testa modellerna användes mätningar av bland annat regn och avrinning från demonstrationstak i Taastrup utanför Köpenhamn. Mätningarna hade tidigare gjorts av Veg Tech AB och AgroTech A/S som äger anläggningen, och omfattade data för tre typer av gröna tak med olika tjocklek: 4 cm moss-sedum, 7 cm sedum-ört-gräs och 11 cm sedum-ört-gräs.

De uppmätta regnmängderna användes som indata i modellerna och den beräknade avrinningen jämfördes med vad som uppmäts från demonstrationstaken. Modellerna ställdes sedan in steg för steg för att stämma så bra överens som möjligt med mätningarna. Resultaten visade att båda modellerna kunde ge relativt korrekta beskrivningar av avrinningsförloppet under ett regn, men resultaten skiljde sig åt mellan olika regnepisoder. Generellt stämde avrinningen som beräknats i Mike Urban bättre överens med mätningarna. Dock gav modellerna i Mike Urban en överskattning av den avrunna volymen sett över en längre tid.

Detta gällde även för SWMM-modellerna för 7 cm och 11 cm taktjocklek, medan modellen kalibrerad för 4 cm taktjocklek gav mer korrekta volymer.

Modellen i Mike Urban användes också för att studera effekten av gröna tak i ett praktikexempel. I exemplet undersöktes MAX IV-laboratoriet i Lund, en forskningsanläggning där man anlagt 24 000 m² gröna tak. För att få en uppfattning om de gröna takens effekt modellerades avrinningen från anläggningen för två scenarier, ett med de gröna taken och ett där takytorna istället antogs bestå av vanliga tak. Modelleringen visade att det med vanliga tak behövdes ett fyra gånger så stort fördröjningsmagasin på fastigheten för att det inte skulle bli översvämning i ett fiktivt ledningsnät nedströms området.

I arbetet gjordes också en översiktlig analys av gröna taks vattenhållande förmågor. Analysen, som gjordes med samma data som ovan, visade att alla taken i vissa fall kunde omhänderta hela den fallna regnmängden. Taken med större tjocklek kunde göra detta för kraftigare regn än det tunna taket med 4 cm djup. Resultaten visade också att de gröna taken hade en effekt på avrinningen även vid väldigt kraftiga regn.

ORDLISTA

Avrinningskoefficient	Anger hur stor del av nederbörden som avrinner från en yta
Avrinningsområde	Ett område där avrinningen avvattnas till samma punkt
CDS-regn	Typregn bestående av flera blockregn med olika intensitet och varaktighet
Dagvatten	Ytligt avrinnande regn- och smältvatten i områden med hårdgjorda ytor
Fördröjningsmagasin	Magasin som används för att fördröja dagvattenflödet
Gröna tak	Vegetationssystem anlagda på takkonstruktioner
Koncentrationstid	Tiden det tar för regnvattnet att färdas från den mest avlägsna punkten i avrinningsområdet till den punkt där dagvattnet avleds
LID-modul	Modul i SWMM vilken används för att beskriva områden med flödesdämpande och flödesutjämnande åtgärder
Mike Urban	Programvara för hydraulisk modellering av vattendistribution samt spill- och dagvattenflöden, utvecklad av DHI
Mouse RDI	Modul i Mike Urban för simulering av vattentransport i mark
SWMM	Programvara för hydraulisk modellering av dagvattenflöden, utvecklad av US Environmental Protection Agency
Återkomsttid	Det tidsintervall inom vilket en händelse statistiskt inträffar eller överträffas en gång

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

REFERAT	i
ABSTRACT	ii
FÖRORD.....	iii
POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING.....	iv
ORDLISTA	vi
1. INLEDNING	1
1.1 SYFTE	1
2. TEORI	3
2.1 DAGVATTENHANTERING	3
2.1.1 Funktionskrav för dagvattennätet.....	3
2.1.2 Avrinning	4
2.1.3 Nederbördsdata.....	5
2.2 HÅLLBAR DAGVATTENHANTERING	6
2.3 GRÖNA TAK.....	7
2.3.1 Extensiva, intensiva och semi-intensiva gröna tak.....	7
2.3.2 Teknisk beskrivning	8
2.3.3 Avrinning från gröna tak	9
2.4 DAGVATTENMODELLERING.....	13
2.4.1 SWMM.....	13
2.4.2 Mike Urban	14
2.5 TIDIGARE FÖRSÖK ATT MODELLERA AVRINNING FRÅN GRÖNA TAK .	16
2.5.1 SWMM.....	16
2.5.2 Mike Urban	17
3. MATERIAL OCH METOD.....	18
3.1 ERHÅLLNA DATA.....	18
3.2 OMRÅDESBESKRIVNING.....	18
3.2.1 Takuppbyggnad.....	19
3.3 TIDIGARE ANALYSER AV ERHÅLLNA DATA.....	21
3.4 INLEDANDE DATABEHANDLING	21
3.5 DATAANALYSER.....	22
3.5.1 Magasineringskapacitet.....	22
3.5.2 Samband mellan nederbörd och avrinning.....	23
3.6 MODELLERING AV GRÖNA TAK	23
3.6.1 Representation av gröna tak i SWMM.....	23
3.6.2 Representation av gröna tak i Mike Urban.....	24
3.6.3 Kalibrering och validering av modellerna.....	25

3.6.4	Sammanlagd avrinning från testtaken	26
3.7	BESTÄMNING AV AVRINNINGSKOEFFICIENTER I MIKE URBAN	26
3.8	MAX IV-LABORATORIET I LUND	26
3.8.1	Takstorlek och lutning.....	28
4.	RESULTAT	29
4.1	DATAANALYSER.....	29
4.1.1	Magasineringskapacitet	29
4.1.2	Samband mellan nederbörd och avrinning	30
4.2	MODELLERING AV GRÖNA TAK	31
4.2.1	Modellparametrar i SWMM.....	31
4.2.2	Modellparametrar i Mike Urban	32
4.2.3	4 cm moss-sedum	32
4.2.4	7 och 11 cm sedum-ört-gräs	37
4.2.5	Modellerad och observerad avrunnen volym	40
4.2.6	Sammanlagd avrinning från testtaken	41
4.3	BESTÄMNING AV AVRINNINGSKOEFFICIENTER I MIKE URBAN	42
4.4	MAX IV-LABORATORIET I LUND	43
4.4.1	Dimensionering	43
4.4.2	Avrinning och ledningspåverkan från MAX IV-laboratoriet.....	44
4.4.3	Takstorlek och lutning.....	44
5.	DISKUSSION	46
5.1	MAGASINERINGSKAPACITET	46
5.2	SAMBAND MELLAN NEDERBÖRD OCH AVRINNING	46
5.3	MODELLERING AV GRÖNA TAK	47
5.4	BESTÄMNING AV AVRINNINGSKOEFFICIENTER I MIKE URBAN	48
5.5	MAX IV-LABORATORIET I LUND	49
5.6	FELKÄLLOR.....	49
6.	SLUTSATSER	51
7.	REFERENSER.....	52
	BILAGA A – MODELLERINGSRESULTAT FÖR 7 CM TAKTJOCKLEK.....	56
	BILAGA B – MODELLERINGSRESULTAT FÖR 11 CM TAKTJOCKLEK	59
	BILAGA C – SAMMANLAGD AVRINNING FRÅN TESTTAKEN.....	63
	BILAGA D – AVRINNINGSKOEFFICIENTER FÖR TID-AREAMETODEN.....	67

1. INLEDNING

När städer förtätas och nya områden exploateras utökas arealen av hårdgjorda ytor vilket genererar större volymer ytligt avrinnande regn- och smältvatten, så kallat dagvatten, som ska ledas genom det befintliga dagvattennätet. Dagvattenvolymer kan också komma att öka till följd av framtida klimatförändringar med ökade regnintensiteter och större nederbördsvolymer som följd (Holgersson m.fl. 2007; Svenskt Vatten 2007). För att undvika att ett överbelastat dagvattennät orsakar översvämningar och påföljande skador på bebyggelse måste förutsättningar skapas för omhändertagande av den ökande mängden dagvatten.

Under de senaste decennierna har det blivit allt vanligare att dagvattennätet planeras utifrån konceptet ”Hållbar dagvattenhantering”, vilket syftar till att ta hand om avrinningen så nära källan som möjligt samt fördröja och utjämna flödet i mer öppna system (Svenskt Vatten 2011a). En metod som blir allt vanligare är anläggande av gröna tak; växtbeklädda tak på byggnader som minskar och fördröjer avrinningen. Några fördelar med denna teknik är att gröna tak inte kräver något extra utrymme då de kan anläggas på byggnader och de bidrar även till att skapa nya ekosystem i städer (Stovin 2010). En studie av Bengtsson m.fl. (2005) har visat att den årliga avrinningen från ett tunt grönt tak motsvarar ungefär hälften av årsnederbörden. Detta stöds av Mentens m.fl. (2006) som sammanställt mätningar från olika europeiska undersökningar och även konstaterar att tjockare gröna tak i medeltal reducerar årsnederbörden med 75 %.

Det finns dock osäkerheter kring hur funktionen hos gröna tak påverkas vid extrema nederbördshändelser och således vilken effekt de har på den maximala belastningen på dagvattennätet. Detta medför svårigheter vid planering och dimensionering av dagvattennät. Ett viktigt verktyg vid denna dimensionering är programvaror för hydraulisk modellering, varav företaget DHIs Mike Urban och US Environmental Protection Agencys (EPA) SWMM är vanligt förekommande inom VA-branschen. Det har tidigare genomförts relativt framgångsrika försök att representera avrinningen från gröna tak i SWMM, och en studie av Deutsch m.fl. (2007) behandlade avrinning från gröna tak i Mike Urban. Alfredo m.fl. (2010) representerade i SWMM gröna tak som en ogenomsläpplig yta kopplad till ett magasin, och i en senare studie av Burszta-Adamiak & Mrowiec (2013) utvärderades en då nyutkommen modul i SWMM som tar hänsyn till infiltration, avdunstning och lagring av nederbörd. Sedan april 2014 finns dock en, ännu ej utvärderad, specifik funktion för gröna tak i programvaran.

1.1 SYFTE

Detta examensarbete syftade till att undersöka möjligheten att beskriva avrinningen från gröna tak med hjälp av en hydrologisk modell i programvarorna SWMM och Mike Urban. För att uppnå detta utvärderades en befintlig funktion i SWMM samt en kombination av tid-areametoden och en funktion för simulering av vattentransport i mark i Mike Urban.

Examensarbetet syftade vidare till att:

- Utvärdera modellernas förmåga att beskriva funktionen hos gröna tak vid olika typer av nederbörd och för olika takuppbbyggnader
- Använda en av programvarorna för att utvärdera hur en implementering av gröna tak påverkar flödet till ett befintligt dagvattennät

Målet var att därigenom undersöka om det med någon av dessa programvaror var möjligt att på ett enkelt sätt utvärdera vilken effekt som anläggande av gröna tak har på dagvattenvolymer och de högsta flödena till dagvattennätet vid exploatering av nya områden.

Detta skulle ge möjlighet att utvärdera hur belastningen på dagvattennätet förändras om byggnader i nya områden täcks med gröna tak. Det skulle också möjliggöra undersökningar av gröna taks förmåga att minska volymer och högflöden i befintliga områden med överbelastade dagvattennät.

2. TEORI

2.1 DAGVATTENHANTERING

Dagvatten definieras som ytligt avrinnande regn- och smältvatten från hårdgjorda ytor och avleds i bebyggd miljö genom såväl öppna system som rörsystem, ofta i kombination med varandra. De resulterande vattenmängderna måste tas om hand för att problem med exempelvis översvämningar inte ska uppkomma. Denna hantering är en uppgift för den kommunala förvaltningen och regleras av kommunala VA-planer och dagvattenstrategier (Svenskt Vatten 2011a). Avledningen av dagvatten kan ske genom kombinerade, duplikata eller separata ledningssystem. I kombinerade system avleds spill-, dag- och dränvatten i samma rörledningar, vilket tidigare var en vanlig lösning, medan duplikata system har skilda rörledningar för spill- och dagvatten (Svenskt Vatten 2004). I separata system avleds dagvattnet istället via diken eller andra öppna system (Svenskt Vatten 2004). I områden med kombinerade system riskerar spillvatten att avledas orenat vid höga dagvattenflöden, och inom nya områden bör därför duplikata eller separata ledningssystem användas (Svenskt Vatten 2004).

De framtida klimatförändringarna, med en förväntad ökad regnintensitet som följd, genererar nya utmaningar i planeringen då större flöden kommer att behöva tas om hand. Samma problematik uppstår vid såväl förtätning som expansion av städer, då mängden hårdgjorda ytor ökar och därmed förhindrar vattnets naturliga infiltration i marken. Då dagvatten riskerar att föra med sig föroreningar när det transporteras över hårdgjorda ytor kan det i somliga fall vara nödvändigt att låta det genomgå någon typ av rening innan det når recipient. Detta bör bedömas utifrån recipientens status samt dagvattnets föroreningsgrad (Svenskt Vatten 2004).

2.1.1 Funktionskrav för dagvattennätet

Vid anläggning av nya dagvattensystem ställs vissa krav gällande såväl kapacitet som rening enligt Svenskt Vatten (2004). Dessa krav innefattar att dagvatten ska avledas från hårdgjorda ytor på ett sätt som minimerar risken för dämning, och om möjligt även avledas i öppna system, samt att dagvatten från mer förorenade hårdgjorda ytor såsom industriområden och trafikleder bör renas i de fall då det sedan leds vidare till en känslig recipient (Svenskt Vatten 2004).

Utöver detta ställs i en ännu ej publicerad publikation från Svenskt Vatten (2014) kapacitetskrav på ledningsnätet där återkomsttiden för en trycklinje i marknivå (vilket innebär att översvämning sker) inte får understiga 10 år utanför tätortsbebyggelse, 20 år inom tätortsbebyggelse och 30 år inom centrum-, industri- och affärsområden. Dagvattensystemen ska också konstrueras så att dagvattnet vid en eventuell översvämning kan ledas bort i öppna system utan att byggnader och husgrunder översvämmas; återkomsttiden för skador på byggnader ska i alla områden överstiga 100 år (Svenskt Vatten 2014, opublicerad). En sammanställning av de i Svenskt Vatten (2014, opublicerad) ställda kapacitetskraven ges i Tabell 1. Då publikationen vid tidpunkten för denna rapport ännu inte publicerats hade dock dessa kapacitetskrav inte implementerats. De gällande kapacitetskraven beskrivs i Svenskt Vattens publikation P90 (Svenskt Vatten 2004). Dessa redovisas i Tabell 2.

Tabell 1. Kapacitetskrav för nya dagvattensystem (Svenskt Vatten 2014, opublicerad)

Nya dagvattensystem	Återkomsttid för regn vid fylld ledning	Återkomsttid för trycklinje i marknivå med marköversvämning som följd	Återkomsttid för mark-översvämning med skador på byggnader
Utom tätortsbebyggelse	2 år	10 år	>100 år
Tätortsbebyggelse	5 år	20 år	>100 år
Centrum-/Industri-/affärsområden	10 år	30 år	>100 år

Tabell 2. Återkomsttider för regn vid dimensionering av avloppssystem (Svenskt Vatten 2004).

Typ av område	Dimensionering för fylld ledning		Återkomsttid för trycklinje	
	Dagvatten-ledning	Kombinerad ledning	Marknivå för dagvatten-ledning	Källarnivå för kombinerad ledning
Ej instängt område utanför citybebyggelse	1 år	5 år	10 år	10 år
Ej instängt område inom citybebyggelse	2 år	5 år	10 år	10 år
Instängt område utanför citybebyggelse	5 år	10 år	10 år	10 år
Instängt område inom citybebyggelse	10 år	10 år	10 år	10 år

2.1.2 Avrinning

Det finns ett flertal metoder för att beräkna dagvattenavrinningen från ett område. Två av de vanligaste är rationella metoden och tid-areametoden. I båda dessa utgör avrinningskoefficienter ett viktigt verktyg för avrinningsberäkningen. Avrinningskoefficienterna beskriver hur stor andel av nederbörden som rinner av i form av dagvatten (efter förluster genom exempelvis avdunstning, infiltration eller magasinering; Svenskt Vatten 2004). De beror bland annat på andelen hårdgjorda ytor samt lutningen i avrinningsområdet (Svenskt Vatten 2004). De av Svenskt Vatten (2004) rekommenderade avrinningskoefficienterna vid beräkningar för olika typer av ytor presenteras i Tabell 3.

Avrinningsberäkningar med den rationella metoden görs med hjälp av ekvationen

$$q_{d \text{ dim}} = A \cdot \varphi \cdot i(t_r) \quad (1)$$

där

$q_{d \text{ dim}}$ = dimensionerande flöde [L/s]

A = avrinningsområdets area [ha]

φ = avrinningskoefficient [-]

$i(t_r)$ = dimensionerande nederbördsintensitet [L/s·ha]

t_r = regnets varaktighet.

För att rationella metoden ska vara lämplig att använda vid avrinningsberäkningar bör ett antal villkor vara uppfyllda. Då metoden inte tar hänsyn till att olika delar av området kan ha olika rinntider bör den främst användas vid små områden med en närmare rektangulär form. Området bör också vara relativt jämnt exploaterat för att avrinningen ska kunna uppskattas med hjälp av en för området specifik avrinningskoefficient.

För större områden måste hänsyn tas till att rinntiden skiljer sig åt mellan olika ytor i avrinningsområdet. En metod för att åstadkomma detta är tid-areametoden, som är en utveckling av den rationella metoden (Svenskt Vatten 2004). I tid-areametoden delas avrinningsområdet istället upp i flera delavrinningsområden, vars individuella bidrag till det totala flödet i beräkningspunkten sedan kan beräknas för olika tidpunkter (Svenskt Vatten 2004). Uppdelningen i areor med olika rinntid görs genom att isokroner, linjer som representerar en specifik rinntid till beräkningspunkten, ritas ut i avrinningsområdet (Svenskt Vatten 2004). För varje delavrinningsområde kan sedan avrinningen, för den rinntid som isokronen representerar, beräknas enligt formeln för rationella metoden, se ekvation (1).

Tabell 3. Avrinningskoefficienter för olika typer av ytor enligt Svenskt Vatten (2004).

Typ av yta	Avrinningskoefficient
Tak	0,9
Betong- och asfaltsyta, berg i dagen i stark lutning	0,8
Stensatt yta med grusfogar	0,7
Grusväg, starkt lutande bergigt parkområde utan nämnvärd vegetation	0,4
Berg i dagen i inte alltför stark lutning	0,3
Grusplan med grusad gång, obebyggd kvartersmark	0,2
Park med rik vegetation samt kuperad bergig skogsmark	0,1
Odlad mark, gräsyta, ängsmark m.m.	0-0,1
Flack tätbevuxen skogsmark	0-0,1

2.1.3 Nederbördsdata

Vid dimensionering av dagvattenledningar kan olika typer av nederbördsdata användas beroende på kravet på noggrannhet i beräkningarna. Vid enklare dimensioneringsberäkningar, med exempelvis rationella metoden, används ofta så kallade blockregn där beräkningen görs för ett regn av en bestämd varaktighet och intensitet. Blockregnets önskade intensiteter utläses, för en önskad återkomsttid och varaktighet, ur ett intensitets-varaktighetsdiagram,

som tagits fram med hjälp av Dahlströms formel (ekvation 2; Svenskt Vatten 2011b). Denna typ av regn kan också användas i datormodeller för funktionskontroll av befintliga dagvattensystem (Svensk Vatten 2011b).

$$i_A = 190 \cdot \sqrt[3]{\bar{A}} \cdot \frac{\ln(T_R)}{T_R^{0.98}} + 2 \quad (2)$$

där

i_A = regnintensitet [L/s·ha]

T_R = regnvaraktighet [minuter]

$\bar{A}$ = återkomsttid [månader].

Vid detaljerade dimensioneringsberäkningar, exempelvis för beräkningar av trycknivåer och bedömning av översvämningsrisker, används i regel olika datormodeller. I dessa fall används istället ofta så kallade typregn som är speciellt anpassade för dimensionering av avloppssystem (Svenskt Vatten 2011b). Ett i Sverige vanligt använt typregn är CDS-regn (Chicago Design Storm), som består av blockregn med olika intensitet och varaktighet. Fördelen med att använda denna typ av regn är att de innehåller alla blockregnsvaraktigheter upp till den valda totala varaktigheten hos CDS-regnet (Svenskt Vatten 2011b). Beräkningar med denna typ av regn kommer således beskriva den högsta belastningen för varje del av det undersökta ledningssystemet (Svenskt Vatten 2011b).

2.2 HÅLLBAR DAGVATTENHANTERING

Synen på hur dagvatten bör hanteras har förändrats mycket med tiden. Fram till mitten på 1900-talet avleddes en övervägande del av dagvattnet med hjälp av öppna diken och naturliga infiltrationsytor. Under 1960-talet skedde dock en förändring där en allt större andel av avrinningen från hårdgjorda ytor började avledas genom slutna rörsystem i marken (Svenskt Vatten 2004). Denna förändring kom i takt med en förtätning av städerna där allt fler markområden hårdgjordes, vilket fick till följd att det blev nödvändigt att avleda allt större dagvattenmängder på ett sätt som inte hindrade framkomligheten i städerna.

På senare år har det dock skett en återgång till en dagvattenhantering som i större utsträckning strävar efter att efterlikna vattnets naturliga transportvägar (Svenskt Vatten 2004). Genom detta förfarande uppnås många positiva effekter; de naturliga transportvägarna ger en mindre påverkan på vattenbalansen, vilket minskar risken för avsänkning av grundvattenytor, och bidrar till en fördröjning av dagvattenflödet vilket minskar översvämningsrisken och gör det möjligt att hantera kraftigare nederbördstillfällen (Svenskt Vatten 2007). En bevarad grundvattenyta är särskilt viktigt i sättningskänsliga områden där det annars blir en ökad risk för skador på byggnader, och den förbättrade möjligheten att hantera stora nederbördsintensiteter utgör en viktig del i klimatanpassningsarbetet med förväntat ökad risk för extrem nederbörd (Svenskt Vatten 2007).

De metoder som syftar till att efterlikna vattnets naturliga transportvägar omnämns gemensamt under begreppet ”Hållbar dagvattenhantering”. Tidigare har begreppet ”Lokalt omhändertagande av dagvatten” (LOD) används i samma syfte, men detta ansågs vara till viss del missvisande då allt dagvatten inte nödvändigtvis måste tas omhand lokalt (Svenskt Vatten 2007). Med hållbar dagvattenhantering avses istället implementering av lokala åtgärder som syftar till att fördröja och i möjligaste mån reducera avrinningen från ett område för att på det viset minska belastningen på det nedströms liggande dagvattennätet. Begreppet innefattar

vidare användandet av öppna dagvattenlösningar, med kapacitet att hantera mycket stora flödesmängder, samt att planera dagvattenhanteringen utifrån ett helhetsperspektiv där korrekt höjdsättning utgör en viktig komponent i att skydda bebyggelse från översvämningar (Svenskt Vatten 2014, opublicerad).

Det finns många tekniker som innefattas under begreppet ”Hållbar dagvattenhantering” och som kan vara olika lämpade att implementeras i olika typer av områden. I områden med täta jordlager är exempelvis möjligheten att reducera avrinningsmängden begränsad då markens infiltrationskapacitet är låg, men det är möjligt att implementera åtgärder för att fördröja avrinningen (Svenskt Vatten 2007). Denna typ av åtgärder innefattar bland annat fördröjningsmagasin, dagvattendammar samt infiltrations- och översilningsytor. I områden med mer genomsläppliga jordar kan, utöver fördröjningseffekter, även en signifikant reduktion av avrinningsmängden erhållas genom att vattnet leds över genomsläppliga ytor (Svenskt Vatten 2007). En annan teknik med potential att såväl reducera som fördröja avrinningen av dagvatten är anläggande av gröna tak på befintlig eller ny bebyggelse.

2.3 GRÖNA TAK

Med ett grönt tak menas ett tak som beklätts med jord och växtlighet. Gröna tak har i äldre tider varit ett utbrett fenomen, särskilt i områden med stora nederbörds mängder, då de användes som isoleringsmaterial för att bättre hålla värmen i byggnader (Bengtsson m.fl. 2005). Den vanligast använda vegetationen var gräs eller mossor. Under de senaste decennierna har gröna tak återigen blivit ett allt mer vanligt förekommande fenomen; en utveckling som inleddes i Tyskland, Österrike och Schweiz under 1960- och 1970-talen i takt med att städerna förtätades och allt fler grönområden bebyggdes (Dunett & Kingsbury 2004). Det har sedan dess genomförts mycket arbete och forskning kring gröna tak i framförallt Tyskland vilket lett fram till riktlinjer kring planering, konstruktion och underhåll av gröna tak (Carter & Rasmussen 2006). En stor del av denna forskning har dock redovisats i rapporter publicerade på tyska och resultaten har därför ofta inte kommit till användning utanför de tyskspråkiga regionerna (Carter & Rasmussen 2006), vilket kan ha haft en negativ effekt på utvecklingen inom området.

Det finns flera anledningar till att intresset för gröna tak har ökat på senare år, där den tidigare isoleringsfunktionen utgör en aspekt. Utöver denna ses idag positiva effekter med bland annat minskade temperaturskillnader mellan stad och land (så kallade urbana värmeöar), ökad biodiversitet (Bengtsson m.fl. 2005) och ett ökat upptag av koldioxid i städerna (Getter m.fl. 2009). Växtligheten bidrar även till en förbättrad luftkvalitet då luften också renas från andra ämnen än koldioxid (EPA 2013), och kan dessutom anses tillföra ett estetiskt värde till stadsbebyggelsen (Stovin 2010). På senare tid har intresset för att implementera gröna tak i dagvattenhantering dock varit den främsta anledningen till det växande intresset för tekniken (Stovin 2010).

2.3.1 Extensiva, intensiva och semi-intensiva gröna tak

Begreppet gröna tak kan omfatta många typer av konstruktioner som väljs utifrån takets önskade funktion. Konstruktionerna delas grovt in i tre kategorier beroende på jordlagrets djup: extensiva, intensiva och semi-intensiva gröna tak (FLL 2002).

De extensiva gröna taken består av tunna jordlager som kan ha en tjocklek från några få centimeter upp till 15 cm (Mentens m.fl. 2006), dock använder sig olika författare av olika definitioner. De tunna jordlagren ger taken en förhållandevis låg vikt vilket möjliggör anläggning på befintlig bebyggelse utan att några särskilda förstärkningsåtgärder behöver

genomföras (Bengtsson m.fl. 2005). Detta behöver dock kontrolleras i varje enskilt fall. För denna typ av gröna tak lämpar det sig bäst med låga och torktåliga växter (Enoksen 2009) som även är tåliga mot andra extrema väderförhållanden som stora temperaturskillnader, stark vind och intensivt solljus (Villarreal & Bengtsson 2005). Lämpliga växter kan exempelvis vara olika sedumarter och mossor, då de varken kräver extra bevattning eller särskilt underhåll (Enoksen 2009).

Tak med större tjocklek än de extensiva taken benämns som intensiva tak. Jordlagrets tjocklek gör att de intensiva taken har en större vattenhållande förmåga, men innebär också att denna typ av tak är relativt tunga (Enoksen 2009), vilket ställer högre krav på hållbarheten hos byggnader (Bengtsson m.fl. 2005). Taken lämpar sig väl för anläggning av större växtlighet, såsom buskar, träd och olika gräsarter, samt uppförande av takträdgårdar och parker (FLL 2002; Enoksen 2009). Växtligheten i sig utgör dock en extra påfrestning på byggnaden genom sin relativt stora vikt samt genom de större och mer djupgående rötterna (FLL 2002). Denna typ av tak kräver en regelbunden skötsel och tillsyn, bland annat i form av bevattning, näringstillförsel samt allmän parkskötsel (FLL 2002).

Den tredje kategorin, semi-intensiva tak, försöker kombinera fördelarna från de två ovannämnda taktyperna. Jordlagret är tjockare än hos ett extensivt tak men inte lika mäktigt som hos ett intensivt tak. Detta öppnar för användande av viss större växtlighet samt ger lägre kostnader för anläggning och underhåll än för ett intensivt grönt tak, dock med ett mer begränsat växtutbud (FLL 2002). I jämförelse med extensiva gröna tak har de semi-intensiva taken en större vattenhållande förmåga och medger därmed uppförande av mindre torktåliga växter. Detta möjliggör en större artrikedom.

2.3.2 Teknisk beskrivning

Gröna tak är uppbyggda av flera beståndsdelar som tillsammans samverkar och möjliggör ett upprätthållande av ekosystem på takmiljöer. Val av konstruktion görs från fall till fall baserat på takets läge och hållbarhet (Greenroof 2014), samt med hänsyn till anläggandets syfte. Med läge avses såväl klimatzon som takets förhållande till väderstreck och den lokala omgivningen, vilket påverkar temperatur och solinstrålning på taket. Ett tak riktat mot norr har till exempel andra förutsättningar än ett tak i söderläge (Greenroof 2014).

Det är viktigt att bärigheten hos byggnaden på vilken taket ska anläggas är tillräcklig för att kunna uppbära den högre vikten hos ett grönt tak i jämförelse med ett konventionellt tak. Extensiva gröna tak väger normalt 50–150 kg/m², medan de semi-intensiva och intensiva taken med djupare jordlager normalt har en vikt av 120–250 kg/m² respektive 200 kg/m² och uppåt (Greenroof 2014). I temperade klimat behöver hänsyn också tas till den extra vikt som kan uppkomma när taket täcks av snö under vinterhalvåret. Under snösmältningsperioden kan ett snötäcke väga upp till 400 kg/m³ (SMHI 2013).

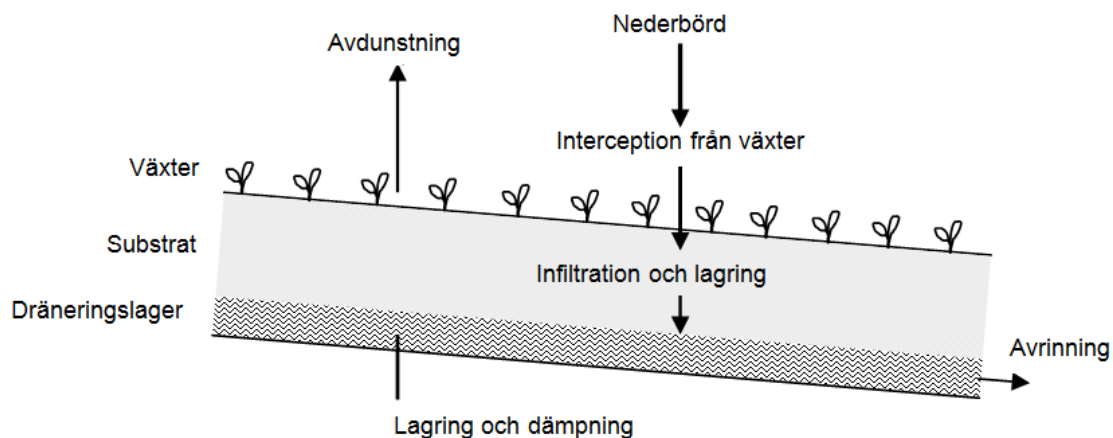
Gröna tak bör som regel anläggas med en lutning på mellan 1 och 30° (Greenroof 2014). En större lutning ger en snabbare dränering samt mindre nederbörd per ytenhet, och därmed ett lägre vatteninnehåll hos substratet, medan ett relativt platt tak ger en långsam dränering och ett högt vatteninnehåll. Vid större lutning uppstår dock en ökad risk för erosions- och stabilitetsproblem, särskilt vid kraftig nederbörd (Tolderlund 2010). Den långsamma dräneringen hos de låglutande taken medför istället en risk att vatten ansamlas i materialet vilket kan orsaka försumpning och därmed skada på växtligheten (FLL 2002).

Grunduppbyggnaden för gröna tak består av fyra olika huvudlager: tätskikt, dräneringsskikt, substrat och växtmaterial (Greenroof 2014; Tolderlund 2010). Tätskiktet placeras närmast yttertakets och har till uppgift att förhindra att vatten och fukt når den underliggande byggnaden, samtidigt som det underlättar avrinning från taket (Tolderlund 2010). Ett korrekt installerat och oskadat tätskikt förblir vattentätt även om vatten blir stående på taket under en längre tid (Tolderlund 2010). Ovanpå tätskiktet läggs vanligen ett dräneringsskikt, som har till uppgift att skydda taket från erosion i samband med att vatten dräneras från taket (Greenroof 2014). Skiktet förhindrar också att överskottsvatten blir stående på taket med potentiell skada på växtligheten som följd, samtidigt som det bibehåller tillräckligt med vatten för att hjälpa växterna att överleva under långa perioder av torka (Greenroof 2014; Tolderlund 2010). Överst återfinns substrat- och odlingslagret med vald växtlighet, ofta kombinerat i prefabricerade mattor. Substratet bör ha låg vikt och bra vattenhållande förmåga (Conservation Technology 2008), samt vara väl anpassat för den valda växtligheten, rådande klimatförhållanden samt takets övriga konstruktion och lutning (Tolderlund 2010).

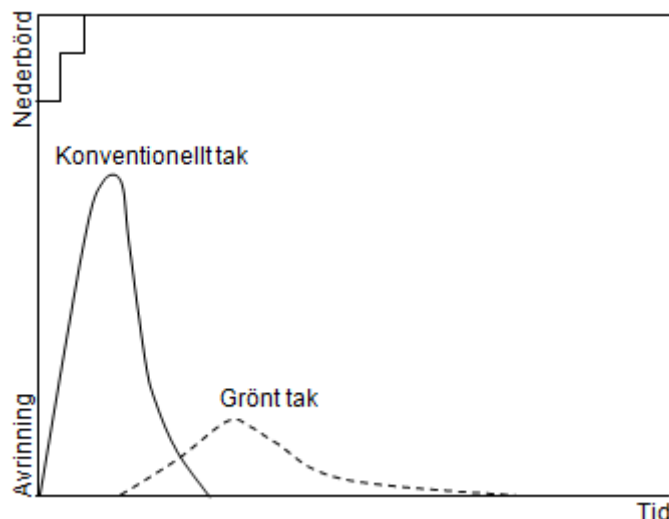
2.3.3 Avrinning från gröna tak

För att en hållbar dagvattenhantering ska uppnås behöver det skapas en god balans mellan grönytor och urban infrastruktur. I redan bebyggda områden finns det ofta inte plats för att anlägga de konstruktioner som vanligen används för att reducera och fördröja dagvattenflöden. För områden med sådan platsbrist kan en lämplig lösning därför vara att anlägga gröna tak på de befintliga takytorna, som enligt Mentens m.fl. (2006) utgör ungefär 40–50 % av den totala hårdgjorda ytan i urbana områden.

Gröna tak har förmågan att såväl fördröja som dämpa det maximala flödet som uppstår under en nederbördsepisod, och ger dessutom en minskad total avrinning i jämförelse med konventionella tak (Berndtsson 2010; Mentens m.fl. 2006). Dessa förmågor beror på de hydrologiska egenskaperna i takens konstruktion som illustreras i Figur 1. Nederbörd fångas upp av takens växtbeklädnad eller infiltrerar och magasineras i substrat- och dräneringslagren (Stovin 2010). Delar av nederbörden kommer sedan att dräneras från det gröna taket och delar kommer att återföras till atmosfären genom avdunstning under torra perioder (Stovin 2010). Den avrinning som sker från gröna tak fördröjs således genom den temporära magasineringen som sker i substratets porer, och återförseln till atmosfären förklarar den reducerade avrinningsvolymen (Berndtsson 2010; Mentens m.fl. 2006). Utöver dessa processer, kan det vid mycket kraftiga eller långvariga regn också uppstå ytavrinning från taken. Figur 2 illustrerar den konceptuella skillnaden i respons på en nederbördsepisod hos ett grönt respektive ett konventionellt tak.



Figur 1. De hydrologiska processerna hos ett grönt tak. Baserad på Stovin (2010).



Figur 2. Schematisk skiss över avrinningsresponsen vid nederbörd för ett konventionellt tak respektive ett grönt tak. Baserad på Stovin (2010).

Gröna taks förmåga att påverka avrinningen från bebyggelse har undersökts i ett flertal studier som sammanfattas i följande avsnitt. Dessa har studerat två skilda tidsaspekter; den magasinering förmågan över en längre tidsperiod, samt hur de gröna takens egenskaper varierar vid enskilda nederbördshändelser. Med magasinering avses i detta arbete skillnaden mellan den totala nederbördsvolymen och den totala avrunna volymen under den studerade tidsperioden. För längre tidsperioder motsvarar detta evapotranspirationen men för enskilda nederbördshändelser kan magasineringen också utgöras av en tillfällig lagring i takkonstruktionen. Sambandet beskrivs av ekvationen

$$M = \frac{V_p - V_a}{V_p} \cdot 100 \quad (3)$$

där

M = magasinering [%]

V_p = total nederbördsvolym [mm]

V_a = total avrunnen volym [mm].

2.3.3.1 Avrinning över en längre tidsperiod

Gröna taks kapacitet att reducera avrinningen över en längre tidsperiod har undersökts av bland annat Bengtsson m.fl. (2005), Mentens m.fl. (2006) och Scholz-Barth (2001). I dessa studier jämfördes avrinningen från de gröna taken med den volym vatten som tillförts via nederbörden, och de resulterande volymsskillnaderna gav ett mått på takens magasinering förmåga. Bengtsson m.fl. (2005) använde sig av vattenbalansen för att studera de hydrologiska egenskaperna hos ett extensivt moss-sedumtak i bostadsområdet Augustenborg i Malmö under en period från juli 2001 till och med december 2002. Studien visade att den totala avrinningen från taket under ett helt kalenderår kunde minskas med närmare 50 % jämfört med den totala nederbörden som föll under samma period till följd av den avdunstning som sker på takets yta (Bengtsson m.fl. 2005).

Förhållandet mellan nederbörd och avrinning på ettårsbasis har också studerats av Mentens m.fl. (2006) som sammanställt mätdata från 18 studier genomförda under perioden 1983–2003, varav merparten utförts i Tyskland. I genomgången ingick försök gjorda på elva intensiva gröna tak med tjocklek 150-350 mm, och tolv extensiva gröna tak med tjocklek 30-140 mm. Den observerade magasineringen för de extensiva taken varierade mellan 27 % och 81 % av den totala årsnederbörden, medan de intensiva taken gav en magasinering mellan 65 % och 85 %. En medelvärdesberäkning i samma studie visade en magasineringskapacitet hos extensiva gröna tak på i medeltal 45 %. Motsvarande värde för de intensiva taken var 75 %.

Det har även genomförts några nordamerikanska studier av gröna taks magasinande förmåga, men då dessa länders intresse för tekniken börjat växa först på senare tid är antalet undersökningar relativt få (Carter & Rasmussen 2006; VanWoert m.fl. 2005). Utifrån exempel hämtade från Chicago, Philadelphia och Portland, konstaterade Scholz-Barth (2001) att extensiva gröna tak kan magasinera i medeltal 75 % av nederbörden. VanWoert m.fl. (2005) gjorde en jämförande studie under 14 månader utförd i Michigan, där avrinningen från ett grustäckt tak, ett extensivt grönt tak och ett tak med samma konstruktion som det gröna fast utan växtlighet studerades. Studien visade att det gröna taket i medeltal magasinerade 60 % av nederbörden. Motsvarande magasinering för det grustäckta taket var 27 % medan det icke-växtbeklädda gröna taket magasinerade 50 % (VanWoert m.fl. 2005). En sammanställning av observerad magasinering i de fem ovan nämnda studierna presenteras i Tabell 4.

Att resultat från olika studier skiljer sig åt kan bland annat bero på olikheter i takets konstruktion, exempelvis varierande tjocklek och vegetationstyper (Berndtsson 2010; Villarreal & Bengtsson 2005). Berndtsson (2010) pekade också på parametrar som takets lutning, klimatförhållanden och de lokala förhållandena i takets direkta närhet, exempelvis väderstreck och huruvida taket är skuggat eller ej, som avgörande för vilka förutsättningar att fördröja och minska avrinningen taket har. Mentens m.fl. (2006) och Bengtsson m.fl. (2005) konstaterade också en tydlig säsongsvariation, där magasineringskapaciteten är markant högre under torra och varma perioder under året.

Tabell 4. Sammanställning av observerad magasinering hos gröna tak i tidigare studier.

Källa	Medelmagasinerings extensivt tak [%]	Medelmagasinerings intensivt tak [%]
Bengtsson m.fl. (2005)	46	
Carter & Rasmussen (2006)	78	
Mentens m.fl. (2006)	45	75
Scholz-Barth (2001)	75	
VanWoert m.fl. (2005)	60	

2.3.3.2 Avrinning vid enskilda nederbördshändelser

Kapaciteten hos gröna tak att påverka avrinningen kan dock skilja sig markant mellan olika nederbördstillfällen och det finns osäkerheter kring hur deras egenskaper varierar vid olika typer av nederbörd. Kännedom om dessa egenskaper är viktigt vid planering, dimensionering och utformning av hållbara dagvattensystem, eftersom systemet bör dimensioneras utifrån den avrinning som uppkommer vid kraftigare regnhändelser. Tidigare studier har undersökt olika aspekter av denna förmåga vid enskilda nederbördshändelser, bland annat magasineringskapacitet samt dämpning och fördröjning av det maximala flödet.

Beskrivningen kompliceras i många fall av att takens egenskaper i stor utsträckning beror på den aktuella vattenmättnadsgraden. Bengtsson m.fl. (2005) observerade exempelvis att avrinning uppstod först när det gröna takets fältkapacitet nåtts, och att avrinningen därefter motsvarade den nederbörd som då föll.

Magasineringskapacitet

VanWoert m.fl. (2005) studerade under 14 månader förhållandet mellan magasineringskapaciteten hos ett extensivt grönt tak med tjocklek 25 mm och nederbördsepisodens storlek. Studien delade in nederbördshändelserna i tre storleksklasser och fann ett omvänt förhållande mellan andelen magasinerad nederbörd och total regnmängd; andelen magasinerad nederbörd var i medeltal 96 % för lätt regn (<2 mm), 83 % för medelstora regn (2-6 mm) och 52 % för kraftiga regn (>6 mm; VanWoert m.fl. 2005).

Även Carter & Rasmussen (2006) har studerat magasineringskapaciteten för enskilda nederbördstillfällen. Denna studie genomfördes i delstaten Georgia i USA som har ett subtropiskt klimat och därmed andra förhållanden, bland annat kraftigare regn och högre temperaturer, än vad som råder vid breddgrader med mer tempererade förhållanden. Denna studie fann, likt VanWoert m.fl. (2005), en minskad magasineringskapacitet för större nederbördshändelser, där andelen magasinerad nederbörd var nära 88 % för lätt regn (<25 mm), över 54 % för medelstora regn (25 – 76 mm) och 48 % för kraftiga regn (>76 mm; Carter & Rasmussen 2006). De skilda klimatförhållandena återspeglas dock i studiernas klassificering av regnens storlek och resultaten är därför inte direkt jämförbara.

Villarreal & Bengtsson (2005) fann att även regnintensitet och takets lutning kan ha en betydande inverkan på hur stor andel av nederbörden som kan magasineras. Såväl en högre regnintensitet som en ökad lutning minskar takets magasineringsförmåga (Villarreal & Bengtsson 2005). Braskerud (2014) fann att magasineringsförmågan för de mest intensiva regnen minskade något med ökande regnvaraktighet, och observerade även en tydligare korrelation mellan nederbördsmängd och avrunnen volym för längre varaktigheter.

Dämpning av maximalt flöde

Gröna tak har i många studier visats ha förmågan att reducera det maximala flödet. Berndtsson (2010) konstaterade dock att den registrerade effekten kan skilja sig markant mellan olika undersökningar. Carter & Rasmussen (2006) registrerade att det maximala flödet från gröna tak vid små nederbördshändelser är betydligt mindre än från konventionella tak, men vid större nederbördshändelser var den uppmätta skillnaden inte lika stor. I en engelsk studie av Stovin (2010), som undersökte responsen vid 11 nederbördshändelser, uppmättes i medeltal ett maximalt flöde som var 57 % mindre än den maximala nederbörden. Villarreal (2007) jämförde responsen från ett grönt tak vid fältkapacitet med ett beräknat flöde från ett konventionellt tak. Där konstaterades att nederbörd med varierande intensitet gav en markant dämpning av det maximala flödet, mellan 31 % och 45 % för olika nederbördshändelser (Villarreal 2007).

Avrinningsfördröjning

Gröna tak har också en förmåga att fördröja den avrinning som uppkommer vid en nederbördshändelse. Fördröjningen omfattar såväl den tidpunkt då avrinning uppstår som tidpunkten för det maximala flödet. Carter & Rasmussen (2006) fann att det maximala flödet efter ett regn generellt inträffade senare för ett grönt tak jämfört med ett konventionellt tak. Den längsta fördröjningen som påvisades var två timmar, medan 57 % av flödestopparna fördröjdes med mellan 0 och 10 minuter. I medeltal inträffade dock det maximala flödet 17,9

minuter senare för det gröna taket jämfört med det konventionella taket. Medelvärdet påverkades dock av några lågintensiva nederbördstillfällen som gav upphov till stora skillnader mellan de två taktyperna (Carter & Rasmussen 2006). Liknande resultat observerades av Simmons m.fl. (2008) som fann att gröna tak generellt fördröjde det maximala flödet med 10 minuter för regn större än 10 mm. Vid regn med mindre nederbördsvolymer uppstod ingen avrinning från de gröna taken. Villarreal (2007) fann däremot att det maximala flödet från ett grönt tak enbart fördröjdes med 1 minut jämfört med en beräknad avrinning från ett konventionellt tak. Den sistnämnda studien är utförd i ett svenskt klimat medan de tidigare nämnda studierna utförts i områden med andra klimatologiska förutsättningar.

2.4 DAGVATTENMODELLERING

Användning av hydrauliska modelleringsverktyg har under de senaste decennierna blivit ett allt vanligare hjälpmedel för att studera och utvärdera till exempel dagvattennätets kapacitet (Granlund & Andréasson 1997). Modellerna används ofta för att beräkna risken för översvämning i olika områden, för åtgärdsplanering och vid nyexploatering (Granlund & Nilsson 2000). Vid åtgärdsplanering simuleras olika åtgärdsförslag, exempelvis ökade ledningsdimensioner eller flödesutjämning, för att undersöka vilken effekt dessa får på vattennivåerna i ledningsnätet (Granlund & Andréasson 1997). Modellerna är också ofta mycket användbara för att undersöka hur ett befintligt ledningsnät påverkas då nya områden ansluts.

Hydrauliska modeller utgör en förenklad representation av verkliga förhållanden och använder sig av olika typer av indata i sina beräkningar. Dessa data består av fysiska indata av bland annat ledningsnätets dimensioner och nivåer samt pumpstationsdata, men även av information om egenskaper hos anslutna avrinningsområden (Granlund & Nilsson 2000). För kalibrering av modellen är det även nödvändigt att ha tillgång till mätningar beträffande nederbörd och motsvarande flöden i systemet (Granlund & Nilsson 2000). Kvaliteten hos kalibreringsdata blir därmed av stor vikt för modellens tillförlitlighet (Granlund & Nilsson 2000).

Två utbrett använda programvaror för hydraulisk modellering är Storm Water Management Model (SWMM), utvecklat av US EPA, och Mike Urban, utvecklat av DHI.

2.4.1 SWMM

Storm Water Management Model (SWMM) är en dynamisk modell utvecklad av US EPA för simulering av avrinning från urbana områden vid såväl enskilda regnhändelser som över längre tidsperioder (Rossman 2010). Programmet finns tillgängligt för fri nedladdning från EPA (2014a) och används över hela världen för planering, analys och dimensionering av dagvattensystem (Rossman 2010; Burszta-Adamiak & Mrowiec 2013). Programmets beräkningsmotor, även den kallad SWMM, finns också implementerad i andra program för hydraulisk modellering, exempelvis Mike Urban.

I modellen delas det undersökta området in i homogena delavrinningsområden som därefter tilldelas individuella egenskaper (Rossman 2010). Avrinningen från varje område beräknas med hjälp av Mannings ekvation samt en vattenbalansekvation baserad på områdets lagringskapacitet, avdunstning och infiltration (Rossman 2010). Ledningsnätet kan bestå av både öppna och slutna system och det simulerade flödet beräknas med Saint Venant-ekvationerna (Rossman 2010), som är icke-linjära, hyperboliska partiella

differentialekvationer (Mike by DHI 2014b). Saint Venants-ekvationerna beskriver lagarna om massans (ekvation 4) och rörelsemängdens (ekvation 5) bevarande enligt:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gAI_f = gAI_0 \quad (5)$$

där

Q = flöde [m^3/s]

A = flödesarea [m^2]

x = avstånd i flödesriktning [m]

t = tid [s]

α = hastighetsfördelningskoefficient [-]

g = tyngdacceleration [m/s^2]

y = flödesdjup [m]

I_f = bottenfriktion [-]

I_0 = bottenlutning [-]

(Mike by DHI 2014b).

I SWMM finns sedan version 5.0.19 en beräkningsmodul som ger möjlighet att i modellen bättre beskriva de hydrologiska effekter som uppnås genom implementering av åtgärder som syftar till dämpning och fördröjning av avrinningen, så kallade Low Impact Development (LID)-åtgärder (Rossman 2010; Burszta-Adamiak & Mrowiec 2013). En sådan åtgärd kan exempelvis vara växtbeklädda diken (Burszta-Adamiak & Mrowiec 2013). LID-åtgärder kan i SWMM definieras för ett helt eller delar av ett avrinningsområde (EPA 2014b).

I version 5.1.001 implementerades en specifik LID-modul för representation av gröna tak (EPA 2014b). I denna modul representeras det gröna taket som en kombination av tre komponenter: ytlager, substrat och dräneringslager (Rossman 2010). Vid simulering utför SWMM vattenbalansberäkningar för att avgöra hur vattnet förflyttas och lagras i de olika lagren (Rossman 2010; Burszta-Adamiak & Mrowiec 2013). De olika lagren definieras i SWMM av ett antal parametrar som tillåter användaren att anpassa modellen efter det specifika takets uppbyggnad.

2.4.2 Mike Urban

Mike Urban från DHI är en GIS-baserad programvara som kan användas för beräkning och modellering av transport i system för vattendistribution samt spill- och dagvattenhantering. Programvaran innehåller två metoder, så kallade beräkningsmotorer, för beräkning av vattentransport i spill- och dagvattenledningar: MOUSE (Modelling of Urban Sewers) och SWMM (Storm Water Management Model; Mike by DHI 2014a). MOUSE kan beräkna vattenflöden och nivåer i såväl öppna som slutna system, med både fri vattenyta och under trycksatta förhållanden (Mike by DHI 2014a; Mike by DHI 2014b). Flödet beräknas med hjälp av Saint Venants-ekvationerna (ekvation 4 och 5).

För att beskriva flödet till ledningsnätet beräknas avrinningen från delavrinningsområden som definieras i modellen. Avrinningen från delavrinningsområdena delas in i två kategorier:

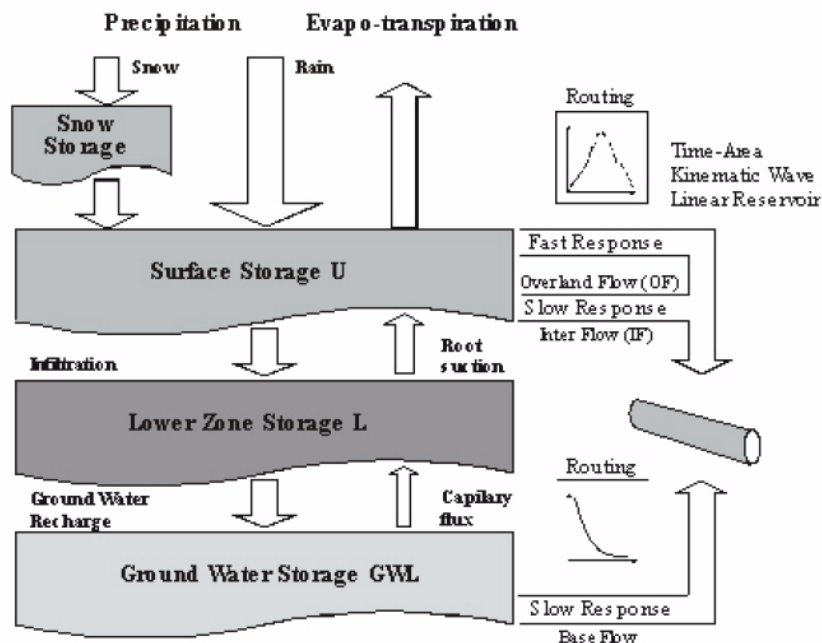
snabb avrinning och kontinuerlig avrinning (Mike by DHI 2014c). Den snabba avrinningen beskriver det flöde som uppstår genom ytavrinning, främst från hårdgjorda ytor, medan den kontinuerliga avrinningen simulerar flödet för genomsläppliga ytor där såväl ytavrinning som infiltration kan ske. Simuleringen av den snabba avrinningen kan i MOUSE ske med hjälp av fyra olika metoder: tid-area, linjär respektive icke-linjär reservoar samt enhetshydrograf. Den kontinuerliga avrinningen kan antingen simuleras som ett konstant tilläggsflöde eller med hjälp av MOUSE-funktionen RDI (Rainfall Dependent Infiltration). RDI-funktionen beskrivs ytterligare nedan.

2.4.2.1 MOUSE RDI

Den tidigare diskuterade tid-areametoden används för att beräkna den direkta avrinning som uppstår till följd av nederbörd på olika typer av ytor i urbana områden. Denna metod tar därmed inte hänsyn till den magasinering och transport av vatten som kan ske i markfasen och som kan ge upphov till en mer långvarig och långsam avrinning från ett markområde. Magasineringen kan också fungera som ett "hydrologiskt minne" där kvarvarande vatten från tidigare nederbördstillfällen kan bidra till en förstärkt avrinning vid efterföljande regn.

För att beskriva dessa processer finns i Mike Urban modulen MOUSE RDI som tar hänsyn till dessa processer i de hydrologiska beräkningarna. De i modulen ingående beräkningarna kan användas som komplement till beräkningar med tid-areametoden eller någon av de andra metoderna för beräkning av snabb avrinning. I modulen kan vattnet förflyttas mellan tre olika magasin: ytmagasin, rotzonsmagasin och grundvattenmagasin. Flöden mellan magasinen styrs av olika ekvationer som beskriver de hydrologiska processerna. Dessa ekvationer beskrivs i Mike by DHI (2014c).

De huvudsakliga transportvägarna för vatten som beskrivs i modellen är ytavrinning, infiltration från ytmagasinet till rotzonsmagasinet, perkolation till grundvatten samt basflödet som sker från grundvattenmagasinet (Mike by DHI 2014c). Den sistnämnda ger upphov till den långsamma avrinningen som sker genom markfasen, medan ytavrinningen utgör ett bidrag till den snabba avrinningen. Vid simulering med RDI kommer således den snabba avrinningen vanligtvis bestå av två delar, med bidrag från både RDI och den valda ytavrinningsmetoden, medan den långsamma avrinningen endast härrör från RDI-modulen. En schematisk beskrivning av RDI-modulens uppbyggnad visas i Figur 3.



Figur 3. Schematisk skiss över RDI-modulens uppbyggnad (Mike by DHI 2014c).

2.5 TIDIGARE FÖRSÖK ATT MODELLERA AVRINNING FRÅN GRÖNA TAK

Även om ett flertal studier har studerat gröna taks kapacitet att reducera och fördröja avrinningen så menar Alfredo m.fl. (2010) att dessa är av begränsad praktisk nytta i arbetet med dagvattenstrategier och vid bedömning av de gröna takens inverkan på de högsta flöden som kan uppstå i ett dagvattennät. Orsaken till detta är att avrinningen från taken i hög grad beror av takets mättnadsgrad vid tidpunkten för regnet, och därför inte kan beskrivas på ett enkelt sätt. Genom användning av hydrologiska och hydrauliska modelleringsverktyg för att simulera avrinningen från gröna tak kan mer omfattande utredningar rörande dagvattenflöden och den resulterande belastningen på dagvattennätet utföras (Alfredo m.fl. 2010). För att effektivt kunna utnyttja dessa simuleringar är det fördelaktigt om de kan göras i något av de väl använda programmen SWMM eller Mike Urban. Vid en genomgång av tidigare studier påträffades några relativt framgångsrika försök att representera avrinningen från gröna tak i SWMM, samt ett försök att göra detsamma i Mike Urban. Samtliga tidigare undersökningar i SWMM har modellerat enskilda nederbördshändelser och har alltså inte utvärderat modellens prestation vid långtidsanalyser.

2.5.1 SWMM

Alfredo m.fl. (2010) undersökte möjligheten att representera avrinningen från ett grönt tak i SWMM genom två olika metoder, kurvnummer och magasinering. Modelleringsresultaten jämfördes med empiriska data från tre extensiva gröna tak med varierande taktjocklek samt ett referenstag och såväl varaktigt lågintensivt regn samt kortvarigt högintensivt regn studerades (Alfredo m.fl. 2010). I försök med kurvnummermetoden representerades det gröna taket av en permeabel yta som anslutits direkt till en utloppsnod. Det resulterande flödet i utloppsnoden studerades sedan för varierande kurvnummer, vilket reglerar infiltrationen i den permeabla ytan, för att finna bästa överensstämmelse med empiriska data (Alfredo m.fl. 2010). Studien fann att denna metod genomgående underskattade såväl avrinningsvolym som maximalt flöde. Detta förklarades med att den infiltrerande nederbörden leddes ut ur systemet (Alfredo, m.fl. 2010).

I magasineringsförsöket representerades det gröna taket av en impermeabel yta varifrån avrinningen leddes till ett magasin med utlopp i botten och i magasinets övre kant (Alfredo m.fl. 2010). Detta syftade till att efterlikna det gröna takets konstruktion med ett undre dräneringslager och eventuell ytavrinning då magasineringskapaciteten överskridits. Modellresultaten stämde relativt väl överens med empiriska data för den nederbördsepisod som användes för validering, men underskattade det maximala flödet för åtminstone två taktjocklekar. Den använda modelluppbyggnaden tillät heller ingen kvarhållning i systemet (Alfredo m.fl. 2010).

I en senare studie av Burszta-Adamiak & Mrowiec (2013) utvärderades den då implementerade funktionen för att modellera flöden från LID-åtgärder i SWMM. Det gröna taket representerades av en *bio-retention cell* (Burszta-Adamiak & Mrowiec 2013), bestående av ytlager, substrat och ett genomsläppligt nedre lager varifrån vattnet både kunde infiltrera vidare och dräneras. De modellerade värdena jämfördes med empiriska data från tre gröna tak och ett referenstak (Burszta-Adamiak & Mrowiec 2013). Studien visade på begränsade möjligheter att på ett tillfredsställande sätt simulera avrinningen från gröna tak. Då modellen kalibrerades för en bättre överensstämmelse i total avrunnen volym tenderade det maximala flödet att överskattas, medan en bättre prediktion av det maximala flödet ledde till en underskattning av total avrunnen volym (Burszta-Adamiak & Mrowiec 2013). Burszta-Adamiak & Mrowiec (2013) förklarade dessa avvikelser med att modellen inte tog hänsyn till lutning och vegetationstyp och att många av de faktorer som påverkar substratets upptorkningsprocess inte hade inkluderats i modellen.

2.5.2 Mike Urban

Deutsch m.fl. (2007) konstruerade en modell i Mike Urban som syftade till att beskriva grönområdets inverkan på den urbana hydrologin i Washington DC. I modellen representerades gröna tak som impermeabla ytor med en lagringskapacitet motsvarande 1 tum (2,54 cm; Deutsch m.fl. 2007). Studien gjorde inga specifika undersökningar av hur väl detta antagande representerade den faktiska avrinningen från gröna tak i området. Målsättningen var att skapa en modell för användning i planeringssyfte i studier av hur förändringar i andelen grönområden påverkar den urbana hydrologin (Deutsch m.fl. 2007).

3. MATERIAL OCH METOD

Denna studie har använt empiriska data beträffande bland annat nederbörd och avrinning för att studera gröna taks effekt på avrinningen samt möjligheten att beskriva denna med hjälp av hydrologiska modeller i Mike Urban och SWMM. Avrinningsdata erhöles från gröna tak med tre olika tjocklekar och i de inledande analyserna studerades takens förmåga att reducera avrinningen. Därefter skapades enkla modeller av varje taktyp i de två programmen. Modellerna kalibrerades för att ge så god överensstämmelse som möjligt med den uppmätta avrinningen och resultaten från de två modellerna jämfördes med varandra. Mike Urban-modellen användes också i ett praktikexempel med MAX IV laboratoriet i Lund, där avrinningen simulerades för två scenarier där takytan antogs vara täckt med gröna respektive konventionella tak.

3.1 ERHÅLLNA DATA

För de analyser som genomförts i det här arbetet har data från olika typer av gröna tak erhållits från Veg Tech AB och AgroTech A/S:s demonstrationsanläggning i Taastrup utanför Köpenhamn. Dataseten omfattade information om bland annat nederbörd, beräknad potentiell avdunstning samt avrinning från de olika taktyperna under perioden mars 2011 till och med december 2012.

Under mätperioden samlades avrinningen från taken upp i regnvattenbehållare där vattenståndet mättes med hjälp av en P131 tryckgivare från Nöding Messtechnik. Utifrån vattenståndsdata kunde sedan avrinningen beräknas. Mätningarna registrerades för varje minut, vilket även gjordes för nederbörd och samtliga andra parametrar. Den potentiella avdunstningen beräknades av AgroTech, enligt *The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation* (ASCE 2005), utifrån mätningar av lufttemperatur, relativ luftfuktighet, vindhastighet och solinstrålning och erhöles i timupplösning. Delar av demonstrationsanläggningen visas i Figur 4.

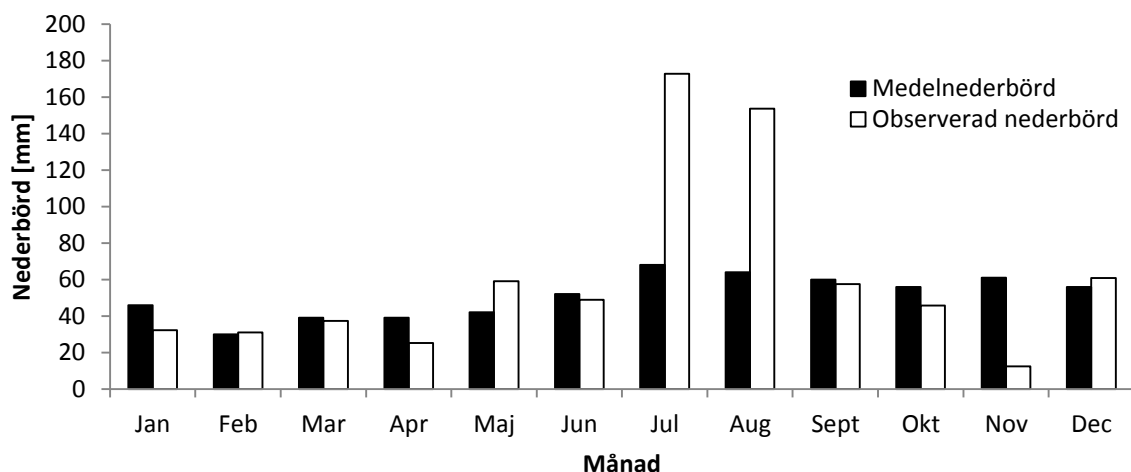


Figur 4. Demonstrationstaken på Veg Tech och AgroTechs anläggning i Taastrup. Foto: Lina Pettersson, Veg Tech (vänster) och Lars Jørgensen, AgroTech (höger).

3.2 OMRÅDESBESKRIVNING

Veg Tech och AgroTechs demonstrationstak är anlagda på taket av en byggnad vid Højbakkegård (55°40'8"N; 12°18'14"Ö), en försöksgård utanför Taastrup som tillhör institutionen för Växt- och Miljövetenskap vid Köpenhamns Universitet. Taastrup är en ort belägen cirka 15 km väst om Köpenhamn. I denna region av Danmark faller i medeltal 613 mm nederbörd årligen, med de största nederbördsmängderna under juli och augusti (DMI 2014). Området har en högsta månatlig medeltemperatur på 16,4 °C i juli, en lägsta månatlig medeltemperatur på -0,1 °C i februari, och i genomsnitt 1539 soltimmar per år (DMI 2014).

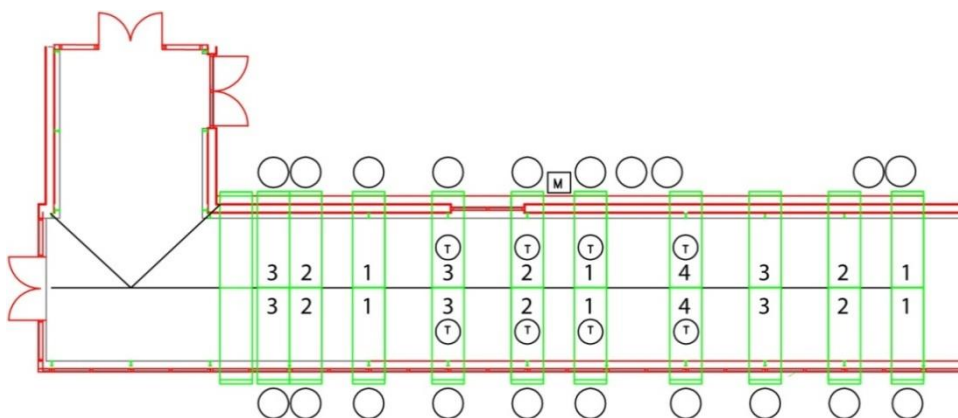
Den observerade nederbörden på platsen under 2011 var högre än ett medelår i regionen, vilket delvis kan förklaras med ett extremt nederbördstillfälle i början av juli som orsakade kraftiga översvämningar i Köpenhamn. Under denna månad uppmättes strax över 170 mm nederbörd, vilket motsvarar den ungefärliga sammanlagda nederbörden under perioden juni-augusti under ett medelår, se Figur 5. Även under augusti var den observerade nederbörden betydligt större än normalt, medan det under november föll ovanligt lite nederbörd.



Figur 5. Jämförelse av observerad månatlig nederbörd under 2011 och medelnederbörd i Köpenhamn/Nordsjälland för perioden 1961-1990 enligt DMI (2014).

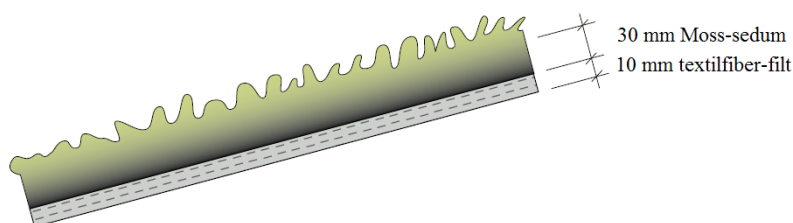
3.2.1 Takuppbyggnad

Demonstrationstaken bestod av fyra takuppbyggnader; moss-sedumtak med 4 cm djup (XMS 2-27), sedum-ört-grästak med 7 cm djup (XSÖG-Grodan) respektive 11 cm djup (XSÖG 5-14) samt ett referenstak motsvarande ett konventionellt tak. För samtliga uppbyggnader fanns sammanlagt sex replikat, varav tre var anlagda på den sida som vetter mot norr och resterande tre var anlagda på takets södra sluttning. I de mätdata som erhöles från AgroTech redovisades avrinningen för nord- respektive sydslutningen som ett medelvärde av de tre där belägna replikaten. Taklutningen var för samtliga tak 15° i förhållande till horisontalplanet. Taken var 81 cm breda och 240 cm långa, vilket för den givna lutningen ger den horisontella arean 1,869 m². En skiss över demonstrationstakens placering visas i Figur 6.

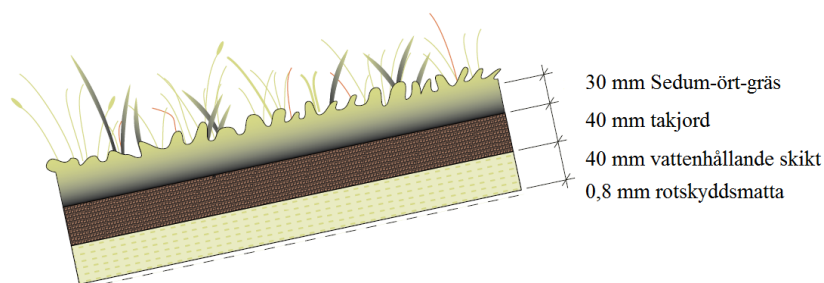


Figur 6. Skiss över Veg Techs demonstrationstak på Højbakkegård i Taastrup, återgiven från Pedersen m.fl. (2012). Områden märkta med 1 representerar moss-sedumtak med 4 cm djup, områden märkta med 2 respektive 3 representerar sedum-ört-grästak med djup 7 cm respektive 11 cm, och områden märkta med 4 representerar referenstak.

Taket med 4 cm djup bestod av en prefabricerad moss-sedummatta, med såväl takjord som vegetation, och ett undre vattenhållande lager i form av en filt av textilfibrer. En skiss över systemets uppbyggnad visas i Figur 7. De två tjockare takkonstruktionerna, 7 cm respektive 11 cm med sedum-ört-gräsvegetation, hade snarlika konstruktioner, men det tjockare taket hade ett extra 40 mm takjordslager under den prefabricerade vegetationsmattan. Under detta fanns ett 40 mm tjockt vattenhållande skikt bestående av materialet Veg Tech Grodan TT 100/40. I konstruktionens nedersta del var en rotskyddsmatta placerad. En skiss över uppbyggnaden för ett 11 cm sedum-ört-grästak visas i Figur 8.



Figur 7. Konstruktionsskiss för Veg Techs moss-sedumtak med 4 cm tjocklek, XMS 2-27. Baserad på Veg Tech (2014).



Figur 8. Konstruktionsskiss för Veg Techs sedum-ört-grästak med 11 cm tjocklek, XSÖG 5-14. Baserad på Veg Tech (2013).

3.3 TIDIGARE ANALYSER AV ERHÅLLNA DATA

AgroTech har tidigare använt de för detta arbete erhållna dataseten för att analysera de gröna takens förmåga att magasinera och fördröja avrinning. Undersökningarna har bland annat omfattat de gröna takens förmåga att magasinera avrinningen under såväl korta som långa tidsperioder. Resultaten från dessa analyser redovisas i Pedersen m.fl. (2012) och Pedersen m.fl. (n.d.) och sammanfattas i Tabell 5 och Tabell 6 nedan. Tabell 5 visar magasineringen över en längre tidsperiod, mars-november 2011 och april-november 2012. I Tabell 6 redovisas den observerade magasineringen respektive reduktionen av det maximala flödet vid två regnhändelser som inträffade 2 juli 2011. Den andra av dessa två regnhändelser var den största som inträffade under mätperioden (2011-2012).

Resultaten från Pedersen m.fl. (2012) och Pedersen m.fl. (n.d.) visade på relativt små skillnader i magasineringskapacitet för de olika takuppbyggnaderna, särskilt över längre tid. Dämpningen av det maximala flödet var väsentligt större för de större taktjocklekarna, dock var skillnaden mindre vid den andra regnhändelsen. Detta förklarades med att taken då hade ett högre initialt vatteninnehåll. Generellt var såväl magasinering och dämpning större för de tak som vette mot söder. Vid de två regnhändelserna den 2 juli 2011 observerade Pedersen m.fl. (2012) också att det högsta flödet från de gröna taken inträffade cirka 1 minut senare än för det konventionella taket.

Tabell 5. Observerad magasinering för de gröna taken, redovisat som ett medelvärde av nord och syd för 2011 och uppdelat på nord- och sydtak för 2012. Data från Pedersen m.fl. (2012) och Pedersen m.fl. (n.d.).

Tak	2011	2012	
	[%]	Nord [%]	Syd [%]
Moss-sedum, 4 cm	44	43	41
Sedum-ört-gräs, 7 cm	45	45	46
Sedum-ört-gräs, 11 cm	53	49	50

Tabell 6. Observerad magasinering samt reduktion av maximalt flöde vid regnhändelse 1 och regnhändelse 2 den 2 juli 2011 enligt Pedersen m.fl. (2012), redovisat som medelvärden för nord- och sydtak.

Tak	Regnhändelse 1 [%]	Regnhändelse 2 [%]
Magasineringskapacitet		
Moss-Sedum, 4 cm	88	9
Sedum-ört-gräs, 7 cm	98	19
Sedum-ört-gräs, 11 cm	100	25
Dämpning av maximalt flöde		
Moss-Sedum, 4 cm	50	33
Sedum-ört-gräs, 7 cm	72	45
Sedum-ört-gräs, 11 cm	80	57

3.4 INLEDANDE DATABEHANDLING

De från AgroTech erhållna dataseten inspekterades manuellt och det konstaterades att avrinningsmätningarna innehöll relativt stora mängder brus. Detta gjorde att det var svårt att såväl identifiera som kvantifiera den avrinning som uppstod under små nederbördstillfällen. Under vissa kortare tidsperioder upprepades varje tidssteg två gånger med olika värden på de

redovisade parametrarna. För dessa perioder justerades data manuellt genom att värden för avrinning respektive nederbörd summerades.

Avrinningsdata användes som kalibrerings- och valideringsdata i modellerna för att undersöka hur väl de kunde beskriva den observerade avrinningen från de gröna taken. För detta beräknades medelvärden av avrinningen från de nordligt och sydligt sluttande taken för respektive taktjocklek. För inläsning av avrinningsdata i såväl SWMM som Mike View räknades data om från enheten millimeter till enheten L/s. Detta gjordes med ekvationen

$$q = \frac{mm \cdot A}{\Delta t} \quad (6)$$

där

q är avrinningen i [L/s]

mm är avrinningen i [mm]

A är avrinningsområdets horisontella area [m²]

Δt är tidssteget i data [s].

Dataseten konverterades sedan till filformat anpassade för att läsas in i modelleringsprogrammen. I samband med detta konverterades även avrinningsdata vidare från L/s till m³/s för användning i Mike Urban. Vid de inledande modelleringsförsöken visade det sig att de uppmätta flödena var för små för att kunna beskrivas i modelleringsprogrammen. De gröna takens area i modellerna, samt avrinningsdata multiplicerades därför med en faktor 1000.

3.5 DATAANALYSER

För att ytterligare undersöka egenskaperna hos de gröna tak varifrån data erhöles kompletterades de tidigare analyserna utförda av AgroTech med en vidare analys av hur magasineringsskapaciteten varierade för olika nederbördshändelser under 2011, samt om något samband mellan nederbörd och avrinning kunde ses för de 25 mest intensiva nederbördstillfällena.

3.5.1 Magasineringsskapacitet

För denna analys erhöles behandlade data från AgroTech för total nederbörd och avrinning vid enskilda nederbördshändelser under mätperioden. Nederbördshändelserna hade definierats som perioder med mindre än 10 timmars intervall mellan nederbördsjäktarens registreringar. För att ta hänsyn till att avrinningen från taken kan fortgå efter att regnet upphört hade även en 10-timmarsperiod efter den sista nederbördsregistreringen inkluderats i nederbördshändelsen. Endast nederbördstillfällena som föregåtts av 24 timmars regnuppehåll inkluderades i den vidare analysen, detta för att påverkan från tidigare nederbördshändelser skulle minimeras. För perioden 25 mars till 22 november 2011 återfanns 80 nederbördshändelser, av vilka 47 föregicks av 24 timmars regnuppehåll och därmed inkluderades i den följande analysen.

För varje nederbördshändelse beräknades den totala magasineringen för de gröna taken med varierande taktjocklek enligt ekvation 3. Magasineringen relaterades sedan till nederbördsvolymen för de olika regnhändelserna för att undersöka huruvida något samband kunde ses. För att undersöka om ett eventuellt samband gällde oberoende av tidigare nederbördsepisoder gjordes även en översiktlig analys där kriteriet om 24 timmars regnuppehåll inte användes

3.5.2 Samband mellan nederbörd och avrinning

För att undersöka om det fanns ett samband mellan nederbörd och avrinning från de gröna taken gjordes en analys av data från de mest intensiva nederbördstillfällena. Analysen omfattade nederbörd och avrinning med varaktigheterna 5, 10, 60, 120 samt 240 minuter från taket med 4 cm tjocklek. I likhet med metoden använd av Braskerud (2014) valdes de 25 mest intensiva nederbördstillfällena för varje varaktighet ut för analys. För dessa nederbördstillfällen plottades sedan avrinningen mot den korresponderande nederbörden och möjligheten att beskriva sambandet med en linjär ekvation undersöktes.

3.6 MODELLERING AV GRÖNA TAK

Möjligheten att modellera avrinningen från gröna tak undersöktes för modelleringsprogrammen SWMM och Mike Urban. I båda programmen gjordes undersökningarna i form av simuleringar över en tvåårsperiod, från mars 2011 till och med december 2012, med nederbörd och potentiell avdunstning som indata.

3.6.1 Representation av gröna tak i SWMM

För varje takkonstruktion skapades en enkel modell bestående av ett avrinningsområde, en nod samt en kort ledning med utlopp. Därefter implementerades en LID-modul för ett grönt tak för hela avrinningsområdet. De i LID-modulen ingående parametrarna ställdes, i den mån det var möjligt, initialt in för att efterlikna konstruktionen för de tak varifrån data erhöles. Undersökningar av dessa parametrar hade dock, med undantag för takets lutning och lagrens tjocklek, inte gjorts för de tak som använts i denna studie och parametervärden hämtades därför från litteraturen. Då de aktuella taken inte heller innehöll något dräneringslager fanns dock inte heller några givna värden för tjockleken, eftersom det snabbt visade sig att modellen krävde ett åtminstone 10 mm djupt dräneringslager för att fungera normalt. En sammanställning av de ursprungliga parameterinställningarna och de källor varifrån data hämtats visas i Tabell 7. Under kalibreringen tilläts alla parametrar variera, undantaget takets lutning och totala djup. Kalibrerings- och valideringsprocessen beskrivs närmare i avsnitt 3.6.3.

Tabell 7. Sammanställning av ursprungliga parameterinställningar i SWMM samt källor varifrån dessa värden hämtats. För lutning och skiktens tjocklek anges tre värden, för 4, 7 respektive 11 cm taktjocklek. Information om lutning och total tjocklek angavs med hjälp av information om testtaken från VegTech.

Parameter	Värde	Källa
Surface		
Berm height [mm]	3,81	Roehr & Kong (2010)
Vegetation volume fraction [-]	0,1	SWMM Help
Surface roughness [-]	0,24	McCuen m.fl. (1996).
Surface slope [°]	15	-
Soil		
Thickness [mm]	30/30/70	-
Porosity [-]	0,7	Bengtsson m.fl. (2005)
Field capacity [-]	0,45	Bengtsson m.fl. (2005)
Wilting point [-]	0,15	Bengtsson m.fl. (2005)
Conductivity [mm/h]	1440	Bond & Thompson (2013)
Conductivity slope [-]	4,85	SWMM Help
Suction head [mm]	3,5	Roehr & Kong (2010)
Drainage mat		
Thickness [mm]	10/40/40	-
Void fraction [-]	0,6	SWMM Help
Roughness [-]	0,2	SWMM Help

3.6.2 Representation av gröna tak i Mike Urban

I likhet med modelluppbyggnaden i SWMM skapades i Mike Urban en enkel modell för varje takkonstruktion, bestående av ett avrinningsområde, en nod samt en kort ledning med utlopp. Avrinningen från taken simulerades med en kombination av tid-areametoden och MOUSE RDI, där de två metoderna applicerades på olika andelar av avrinningsområdets yta. Primärt undersöktes olika kombinationer där de två metoderna tillsammans utgjorde 100 % av avrinningsområdets yta. Även kombinationer där andelarna tid-area och MOUSE RDI inte summerades till 100 % studerades, men då dessa inte föreföll ge lika goda resultat utvärderades de ej vidare.

Tid-areametoden beskrivs i Mike Urban av fyra hydrologiska parametrar: Time-area coefficient, reduction factor, time of concentration och initial loss. *Time-area coefficient* beskriver avrinningsområdets form, och *reduction factor* motsvarar avrinningskoefficienten och beskriver därmed hur stor del av nederbörden som blir kvar i systemet efter exempelvis avdunstning och läckage genom hårdgjorda ytor (Mike by DHI 2014d). *Time of concentration* anger koncentrationstiden, det vill säga den maximala tid det tar för nederbörd att nå fram till avrinningsområdets utloppspunkt, och *initial loss* är den mängd nederbörd som krävs innan avrinning uppstår (Mike by DHI 2014d).

MOUSE RDI använder sig av ett antal parametrar som beskriver magasineringen i olika delar av markfasen, samt hur vatten kan transporteras mellan dessa. Magasineringskapaciteten beskrivs av de två parametrarna U_{max} och L_{max} , som representerar den maximala magasineringen i yt- respektive jordlagret (Mike by DHI 2014c). För simulering av vattentransport mellan lagren samt ut ur systemet används parametrarna CQ_{OF} , CK_{OF} , CK_{IF}

och CK_{BF} , där CQ_{OF} anger ytaavrinnings storlek medan övriga är tidskonstanter som styr hur snabbt vattentransporten sker inom, samt ut ur, olika delar av markfasen (Mike by DHI 2014c).

Utöver dessa parametrar innehåller MOUSE RDI ytterligare ett antal parametrar som beskriver initiala förhållanden samt egenskaper för grundvattenmagasin. Dessa justerades initialt, bland annat eftersom gröna tak inte innehåller något grundvatten, men hölls sedan konstanta under modellkalibreringen. Parametrarna var C_{area} , T_{OF} , T_{IF} , T_G , U , L , GWL , OF , IF , S_y , GWL_{min} , $GWLbf_0$ och $GWLfl_1$. Parametervärden för dessa anges i Tabell 8. För mer information beträffande parametrarna, se Mike by DHI (2014c). Kalibrerings- och valideringsprocessen beskrivs närmare i kapitel 3.6.3.

Tabell 8. Använda värden för de parametrar som justerades initialt men sedan hölls konstanta under kalibreringen av modellen. Parametervärden markerade med * är desamma som Mike Urbans standardinställningar.

Parameter	Använt värde
Main parameters	
C_{area} [-]	1,00*
Threshold parameters	
T_{OF} [-]	0,00*
T_{IF} [-]	0,00*
T_G [-]	0,00*
Groundwater parameters	
S_y [-]	1,00
GWL_{min} [m]	0,00*
$GWLbf_0$ [m]	1,00
$GWLfl_1$ [m]	0,00*
Initial conditions	
U [mm]	0,00*
L [mm]	0,00*
GWL [m]	1,00
OF [mm/h]	0,00*
IF [mm/h]	0,00*

3.6.3 Kalibrering och validering av modellerna

Kalibrering och validering gjordes mot empiriska data för nederbörd och avrinning från 2011 respektive 2012, enligt den så kallade ”split sample”-metoden, vilken innebär att halva datamängden används för kalibrering av modellen och resterande data används för validering av densamma (Gustafsson 1993). Kalibrerings- och valideringsprocessen var densamma för de två programvarorna. Kalibreringen utfördes i båda fallen genom att de i modellerna ingående parametrarna justerades, med ett iterativt tillvägagångssätt, för att finna bästa möjliga överensstämmelse mellan modellerad och uppmätt avrinning.

I första hand kalibrerades modellerna mot avrinningsförloppet vid enskilda nederbördshändelser. För detta studerades modellernas prestation vid några utvalda tidpunkter under 2011, omfattande både större och mindre regnepisoder. Denna utvärdering gjordes i programmet Mike View, till vilket resultat från såväl SWMM som Mike Urban kunde importeras och jämföras med varandra. De kriterier som undersöktes var modellernas förmåga att simulera ett korrekt maxflöde, en korrekt avrunnen volym samt hur väl den modellerade

avrinningen följde den empiriska avrinningskurvan. Kriterierna utvärderades genom visuell inspektion samt, för större regn, genom statistiska beräkningar. Jämförelserna gjordes med den uppmätta avrinningen från respektive taktjocklek. Vid valideringen utvärderades modellernas prestation enligt samma kriterier som i kalibreringssteget. Samtliga beräkningsresultat importerades, liksom i kalibreringssteget, till Mike View där utvärderingen av modellernas prestation först gjordes visuellt för hela tidsperioden. Vidare utvärdering gjordes sedan för några utvalda nederbördshändelser under 2012, där större regn även valdes ut för statistiska beräkningar.

3.6.4 Sammanlagd avrinning från testtaken

För att bättre efterlikna ett naturligt avrinningsförlopp från ett område med gröna tak skapades också en modell där samtliga gröna tak kopplades till samma utloppsnod. På det viset erhöles en samlad avrinning från tak med olika taktjocklek. Den modellerade avrinningen jämfördes med en summerad avrinning från de undersökta taken. I denna modell användes de parameteruppsättningar som givit bäst resultat i de separata modellerna.

3.7 BESTÄMNING AV AVRINNINGSKOEFFICIENTER I MIKE URBAN

Det faktum att gröna taks vattenhållande förmåga påverkas av nederbördens storlek och intensitet gör att det inte är möjligt att definiera en avrinningskoefficient som ger en korrekt beräknad avrinning från gröna tak för alla typer av regn. För dimensionering av dagvattenledningar används dock regn med specifika återkomsttider, ofta 10-årsregn, och det är därför av särskilt intresse att definiera vilka avrinningskoefficienter som bör användas för gröna tak vid just dessa regn. I denna studie undersöktes möjligheten att finna lämpliga värden för *reduction factor*, den parameter i Mike Urbans tid-areametod som motsvarar avrinningskoefficienten. För att identifiera lämpliga parametervärden gjordes försök i Mike Urban där tid-areametoden användes för att beskriva avrinningsförloppet för det högsta flödet samt flödestoppens stig- och sjunktid under enskilda nederbördshändelser. Detta förfarande skiljde sig från tidigare genomförda studier där avrinningskoefficienter beräknats utifrån nederbörd och det maximala flödet.

För att finna nederbördsepisoder med intressanta återkomsttider beräknades medelintensiteter med 10 respektive 60 minuters varaktighet utifrån den erhållna nederbördsserien. Återkomsttiderna beräknades sedan med Dahlströms formel (ekvation 2) för de största medelintensiteterna inom varje nederbördshändelse. Episoder med lämpliga återkomsttider valdes sedan ut, med kravet att de föregåtts av minst tre timmars torrväder. Totalt valdes fyra nederbördstillfällen för respektive varaktighet ut till bestämningen av avrinningskoefficienter. Bestämningen utfördes genom att parametrarna *reduction factor*, *time of concentration* och *initial loss* varierades tills bästa överensstämmelse uppnåts mellan modellerad och uppmätt avrinning för den största toppen i nederbördshändelsen. Överensstämmelsen bedömdes visuellt utifrån flödestoppens stig- och sjunktid samt hur väl modellen beskrev det högsta flödet. På grund av tidsbegränsningar studerades inte taken med 7 cm djup i denna del av arbetet.

3.8 MAX IV-LABORATORIET I LUND

För att studera vilken effekt implementering av gröna tak kan ha på avrinningen från ett bebyggt område byggdes en enkel modell av MAX IV-laboratoriet upp i Mike Urban, som valdes framför SWMM då den generellt gett en bättre överensstämmelse med såväl kalibrerings- som valideringsdata. MAX IV är en forskningsanläggning som vid tidpunkten för denna rapport håller på att anläggas utanför Lund. Gröna tak, med lutningen 2°, har uppförts på ett flertal byggnader. Sammanlagt har cirka 24 000 m² takyta täckts av moss-

sedummattor med 4 cm tjocklek (system XMS 2-27 från Veg Tech). Dagvattnet från området avleds inte till det kommunala dagvattennätet utan omhändertas inom området varifrån vattnet sedan leds vidare till två dikningsföretag.

I modelleringsförsöket konstruerades ett fiktivt scenario, i vilket dagvattnet istället avleddes till ett tänkt befintligt ledningsnät. I det fiktiva scenariot antogs att två industriområden fanns anslutna 1000 m respektive 1500 m nedströms det nya området. De två industriområdena tilldelades båda en lika stor area som MAX IV-laboratoriet, där halva ytan angavs som hårdgjord. Ledningsnätet dimensionerades enligt dimensioneringskriterier från Svenskt Vatten (2004) för instängt område utanför citybebyggelse, så att vattennivåerna inte steg över ledningshjässan vid ett 5-årsregn samt marknivå vid ett 10-årsregn då endast de två industriområdena var anslutna. Dimensioneringskriteriet baserades på antagandet att det skulle förekomma delvis instängda områden inom industriområdena. För dimensioneringen skapades två CDS-regn med 5 respektive 10 års återkomsttid. Regnens varaktighet sattes till 720 minuter och det centrala blocket till 10 minuter. En översiktsbild över MAX IV-laboratoriet och det fiktiva ledningsnätet visas i Figur 9.



Figur 9. Översiktsbild över MAX IV-laboratoriet till vänster och det fiktiva ledningsnätet till höger. Foto: Perry Nordeng (vänster), publicerad med tillstånd av Fastighets AB ML4.

Simuleringarna gjordes med de parameterinställningar för 4 cm taktjocklek som konstruerats i Mike Urban. Inledningsvis studerades vilken effekt de gröna taken på MAX IV hade på flödet i ledningsnätet jämfört med om konventionella tak hade anlagts på byggnaderna. Vid dessa beräkningar användes de nederbördsdata som tidigare använts för kalibrering och validering av modellerna för gröna tak. Då det visade sig att vattennivåerna i ledningsnätet i båda fallen översteg marknivån vid två tidpunkter gjordes en ytterligare simulering. I denna simulering anlades ett fördröjningsmagasin mellan MAX IV och det övriga ledningsnätet och de magasinsvolymer som krävdes för att undvika marköversvämning i de två scenarierna bestämdes.

De avrinningsparametrar som användes för att beräkna avrinningen från industriområdena samt för de konventionella taken redovisas i Tabell 9. Parametrarna valdes enligt schablonvärden för de aktuella typerna av ytor, där värden för *reduction factor* har hämtats från Svenskt Vatten (2004), se Tabell 3, med ett antagande om att industriområdena till

hälften utgjordes av hårdgjorda ytor, varav 50 % tak och 50 % andra hårdgjorda ytor. Koncentrationstiden, *time of concentration*, för industriområdena beräknades enligt

$$t_{konc} = 5 + \frac{2 \cdot \sqrt{C_{area}}}{60} \quad (7)$$

där

t_{konc} är koncentrationstid [min]

C_{area} är avrinningsområdets storlek [m²].

Tabell 9. Schablonvärden för tid-areaparameterar hos industriområden och konventionella tak.

Typ av yta	Time-area coefficient [-]	Reduction factor [-]	t_{konc} [min]	Initial loss [mm]
Industriområde	0,33	0,85	10	0,6
Hårdgjort tak	0,33	0,9	10	0,6

3.8.1 Takstorlek och lutning

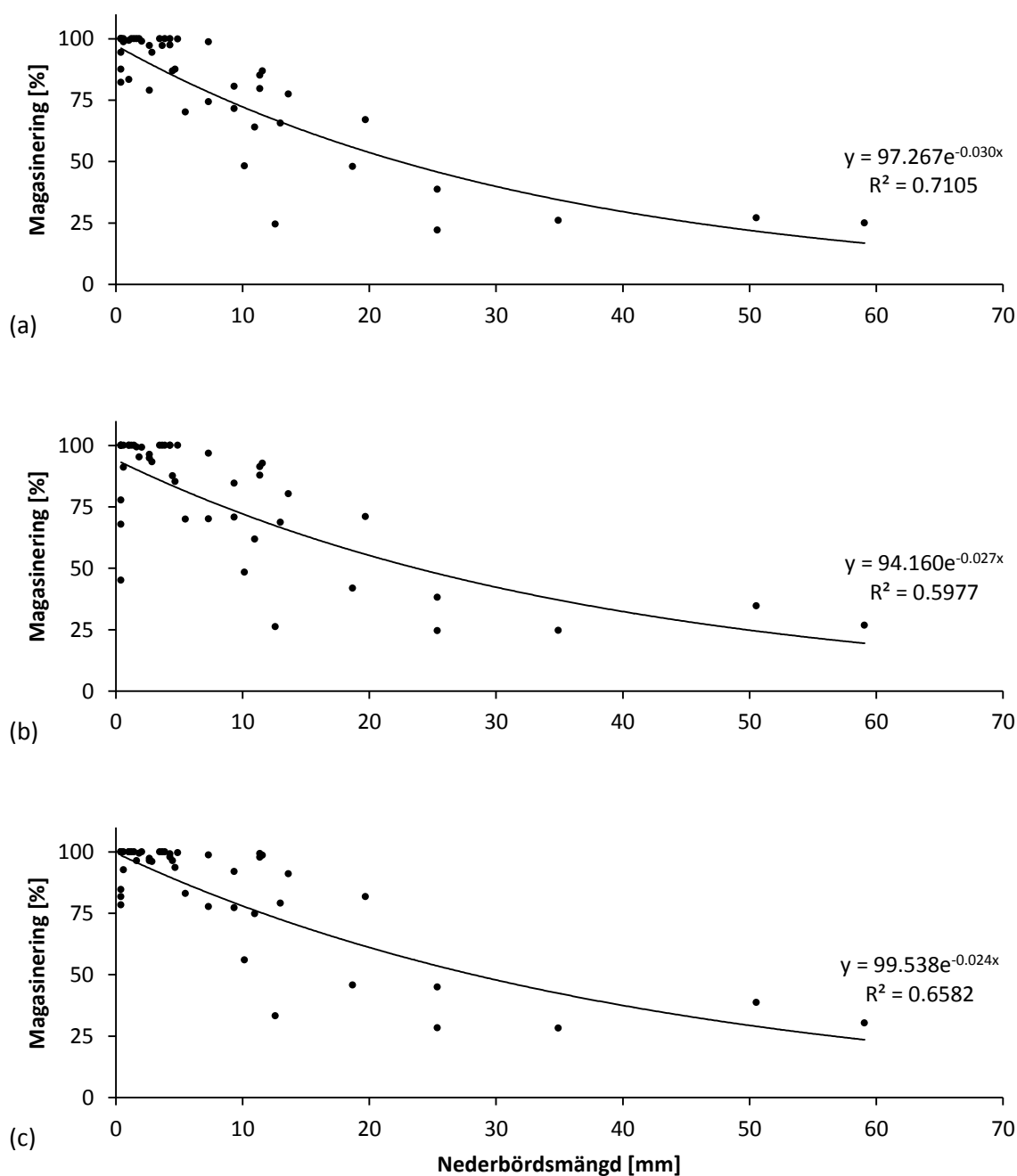
Taken på MAX IV-laboratoriet var väsentligt mycket större och hade en mindre lutning än de gröna tak som använts vid kalibreringen, vilket påverkar bland annat takytans koncentrationstid. Därför undersöktes också ett scenario där RDI-modulens tidskonstant för ytavrinning, T_{OF} , och tid-areaparametern t_{konc} justerades för att kompensera för detta faktum. t_{konc} för de gröna taken sattes till 5 min och T_{OF} ökades stegvis tills det inte längre behövdes något fördröjningsmagasin för att undvika marköversvämning i modellen. Genom att studera hur stor ändring av parametrarna som behövdes för att undvika översvämning kunde en indikation om modellens tillämpbarhet på tak med en annan storlek och lutning erhållas. En liten påverkan skulle tyda på en låg känslighet för förändringar i dessa parametrar.

4. RESULTAT

4.1 DATAANALYSER

4.1.1 Magasineringskapacitet

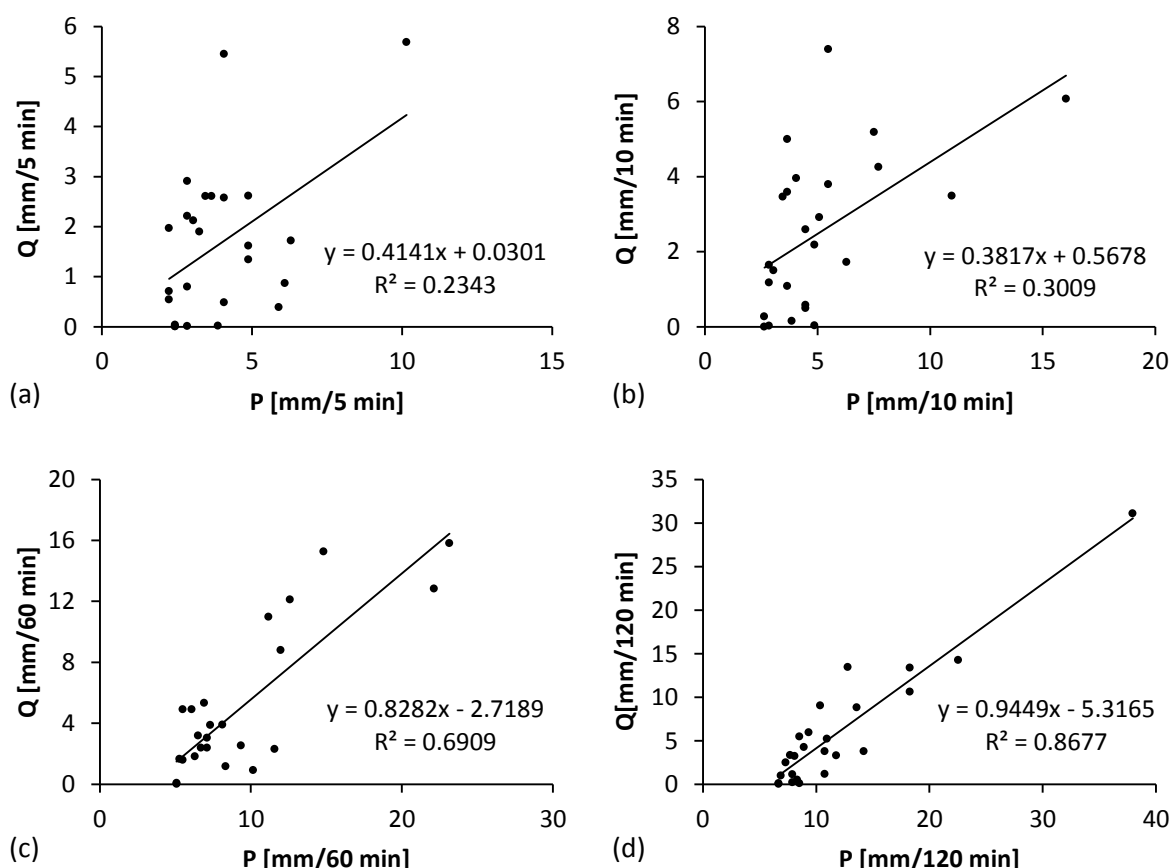
Sambanden mellan andel magasinerad nederbörd och nederbördsmängd beskrevs för samtliga tak bäst av en exponentiell ekvation och var starkast för det 4 cm djupa taket (Figur 10). Ekvationernas koefficienter indikerar att en fullständig magasinering inte sker ens för mycket små nederbördsmängder, men i figuren kan ses att ingen avrinning uppstod för många av de mindre nederbördshändelserna. Oavsett nederbördsmängd understeg magasineringen inte cirka 25 % för någon av taktjocklekarna.



Figur 10. Andel magasinerad nederbörd för (a) 4 cm moss-sedum, (b) 7 cm sedum-ört-gräs och (c) 11 cm sedum-ört-gräs vid olika nederbördsmängder.

4.1.2 Samband mellan nederbörd och avrinning

Sambandet mellan nederbörd och avrinning från det gröna taket med 4 cm tjocklek undersöktes för varaktigheterna 5, 10, 60, 120 och 240 minuter. För 240 minuters varaktighet observerades inte något tydligare samband än vad som var fallet för 120 minuters varaktighet. I Figur 11 ses att sambandet mellan nederbörd och avrinning blir starkare då varaktigheten ökar. För 5 minuters varaktighet kan inget visuellt samband ses och det korresponderande R^2 -värdet är 0,23. För 120 minuters varaktighet har R^2 -värdet ökat till 0,87 och det finns även ett tydligt visuellt samband mellan nederbörd och avrinning. R^2 -värdena för de olika varaktigheternas samband återfinns sammanställda i Tabell 10.



Figur 11. Samband mellan nederbörd, P, och avrinning, Q, för (a) 5 minuters varaktighet, (b) 10 minuters varaktighet, (c) 60 minuters varaktighet och (d) 120 minuters varaktighet.

Tabell 10. R^2 -värden för sambandet mellan nederbörd och avrinning med de undersökta varaktigheterna.

Varaktighet [min]	R^2
5	0,23
10	0,30
60	0,69
120	0,87
240	0,82

I Tabell 11 redovisas den genomsnittliga magasineringen av nederbördsepisoder med olika varaktighet för 4 cm moss-sedumtaket. Magasineringen var relativt likvärdig för de olika varaktigheterna och någon tydlig trend kan inte ses.

Tabell 11. Genomsnittlig magasinering [%] av nederbördsepisoder med olika varaktighet på 4 cm moss-sedumtaket. De små talen anger standardavvikelser.

	5 min		10 min		60 min		120 min	
4 cm moss-sedum	58	±37	50	±40	53	±32	59	±30

4.2 MODELLERING AV GRÖNA TAK

Nedan presenteras de modellparametrar för SWMM och Mike Urban som gav bäst överensstämmelse mellan modellerad och uppmätt avrinning. Därefter presenteras modellresultat för några nederbördshändelser som illustrerar viktiga egenskaper hos de kalibrerade modellerna.

4.2.1 Modellparametrar i SWMM

Parametrarna i LID-modulen som gav bäst överensstämmelse med uppmätt data skiljde sig åt mellan de olika takkonstruktionerna. De valda uppsättningarna återfinns sammanställda i Tabell 12.

Tabell 12. Kalibrerade parametervärden för LID-modulen i SWMM för de tre olika takkonstruktionerna.

Parameter	4 cm	7 cm	11 cm
Width [m]	50	780	780
Surface			
Berm height [mm]	1	10	10
Vegetation volume fraction [-]	0,1	0,1	0,1
Surface roughness [-]	0,24	0,42	0,42
Surface slope [°]	15	15	15
Soil			
Thickness [mm]	30	50	70
Porosity [-]	0,7	0,65	0,62
Field capacity [-]	0,45	0,25	0,25
Wilting point [-]	0,15	0,21	0,21
Conductivity [mm/h]	420	600	600
Conductivity slope [-]	4,85	20	20
Suction head [mm]	3,5	3,5	3,5
Drainage mat			
Thickness [mm]	12	20	40
Void fraction [-]	0,9	0,2	0,9
Roughness [-]	0,2	0,9	0,05

4.2.2 Modellparametrar i Mike Urban

De bästa funna parameteruppsättningarna skiljde sig åt mellan de olika takkonstruktionerna. De valda uppsättningarna återfinns sammanställda i Tabell 13.

Tabell 13. Kalibrerade parametervärden för tid-areametoden och RDI-modulen samt andel av takets area som använder respektive metod.

Parameter	4 cm	7 cm	11 cm
A_{TA} [%]	10	10	10
A_{RDI} [%]	90	90	90
Tid-areaparametrar			
Time-area coefficient [-]	0,33	0,33	0,33
Reduction factor [-]	1,0	1,0	1,0
t_{konc} [min]	1,0	7,0	7,0
Initial loss [mm]	9,0	9,0	9,0
RDI-parametrar			
U_{max} [mm]	5,0	5,0	5,0
L_{max} [mm]	5,0	10,0	10,0
CQ_{OF} [-]	1,0	0,85	0,85
CK_{OF} [h]	0,3	0,4	0,5
CK_{IF} [h]	6,0	3,0	3,0
CK_{BF} [h]	1,0	1,0	1,0

4.2.3 4 cm moss-sedum

Nedan presenteras modelleringsresultat från såväl Mike Urban som SWMM för några utvalda nederbördshändelser, kalibrerat och validerat mot den uppmätta avrinningen från 4 cm moss-sedumtaken. Ingen av modellerna gav korrekt avrinning vid samtliga nederbördstillfällen under simuleringsperioden. Generellt beskrev Mike Urban avrinningen från nederbördshändelserna mer korrekt än modellen konstruerad i SWMM. Undantaget var under de första månaderna av simuleringen, därefter presterade Mike Urban allt bättre - framförallt under valideringsperiodens andra hälft.

Mike Urban gav i större utsträckning än SWMM avrinning vid tillfällen då ingen sådan kunde ses i kalibreringsdata, dock var flödet oftast väldigt litet. SWMM-modellen gav istället ingen avrinning vid somliga tillfällen då sådan kunde ses i kalibreringsdata, samt gjorde mer frekventa och större överskattningar av avrinningen än vad som var fallet för Mike Urban-modellen. Mike Urban-modellen gav också avrinning under långa tidsperioder efter det att nederbörd fallit, ofta under betydligt längre tid än vad som kunde utläsas av kalibreringsdata. Detta inträffade inte i lika stor utsträckning för SWMM-modellen.

De nederbördshändelser som valts ut för att illustrera modellernas styrkor och svagheter presenteras för kalibreringsperioden i avsnitt 4.2.3.1, och för valideringsperioden i avsnitt 4.2.3.2. För såväl kalibrerings- som valideringsperioden har några av de största nederbördshändelserna valts ut för presentation. Dessa har sedan kompletterats med ytterligare nederbördshändelser som bedömts vara av intresse för att åskådliggöra egenskaper hos modellerna.

R^2 -värden, volymfel samt fel i maximalt flöde för samma nederbördshändelser presenteras i Tabell 14. De nederbördshändelser där endast en liten mängd avrinning uppstod har exkluderats eftersom bruset i kalibreringsdata gjorde beräkningarna mycket osäkra i dessa

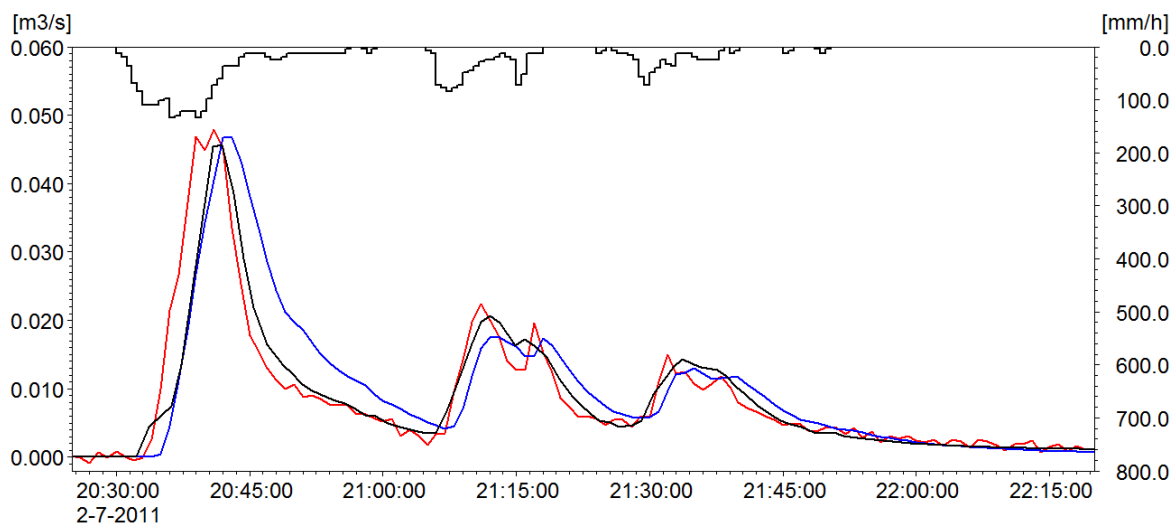
fall. Mike Urban-modellen gav ett högre R^2 -värde för samtliga nederbördshändelser och ett lägre volymfel i tre av fem fall. SWMM-modellen gav ett mindre fel i maximalt flöde i fyra av fem fall, dock var skillnaden mot Mike Urban-modellen ofta relativt liten.

Tabell 14. Nederbördsmängd (P), R^2 -värde, volymfel (V_{fel}) samt fel i maximalt flöde (Q_{fel}) för Mike Urban (MU) och SWMM för 4 cm taktjocklek vid de utvalda nederbördshändelserna.

Nederbördshändelse	P [mm]	Modell	R ²	V _{fel} [%]	Q _{fel} [%]
Kalibreringsperiod					
2/7 2011	51	MU	0,87	-1,4	-5,2
		SWMM	0,69	11	-3,3
14-15/8 2011	25	MU	0,94	0,4	8,2
		SWMM	0,86	13	-4,9
27/8 2011	59	MU	0,72	5,3	-1,5
		SWMM	0,54	2,6	1,4
Valideringsperiod					
29/6 2012	37	MU	0,88	-1,6	14,4
		SWMM	0,71	15	-21
30/7 2012	21	MU	0,09	-23	-57
		SWMM	0,04	-20	-49

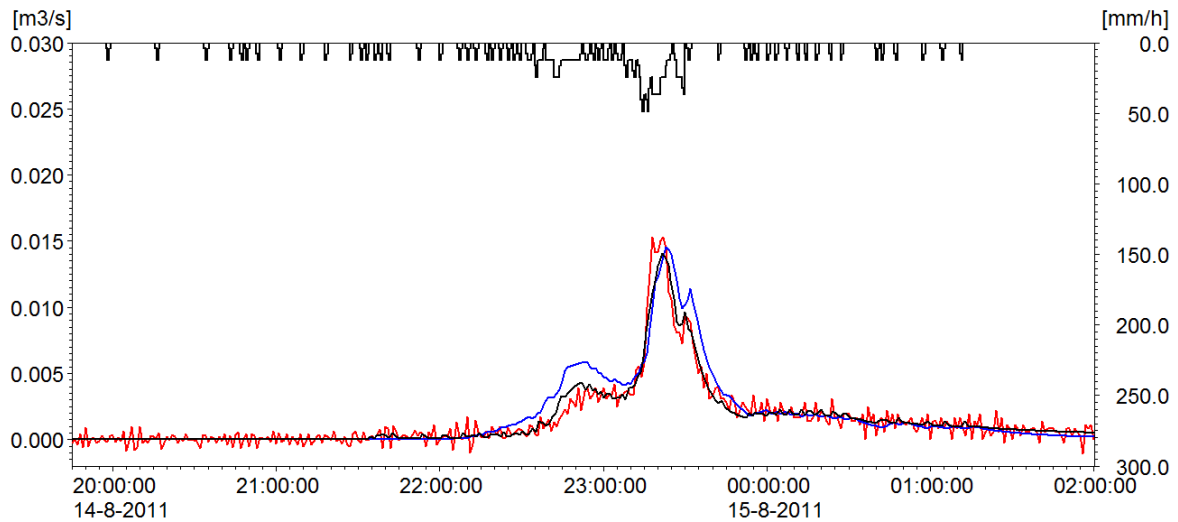
4.2.3.1 Kalibreringsperiod

Vid nederbördshändelsen den 2 juli 2011, som var den kraftigaste under den period för vilken mätdata erhållits, stegrades avrinningen till den första flödestoppen något sent, varpå den i SWMM modellerade avrinningen också pågick längre än vad som ges av kalibreringsdata (Figur 12). Båda modellerna gav en relativt god överensstämmelse vid samtliga tre flödestoppar.



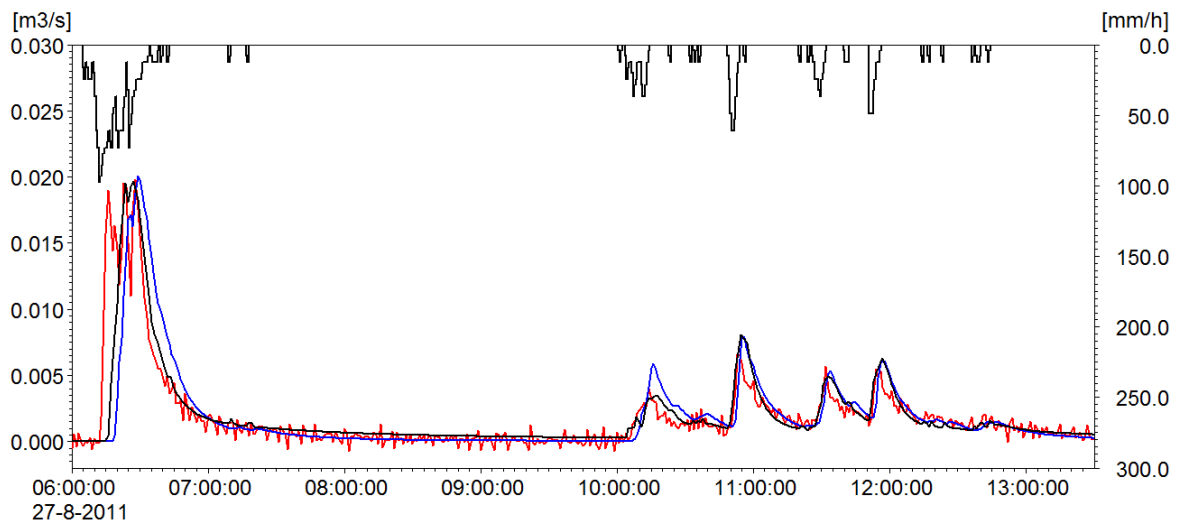
Figur 12. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 2/7 2011. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.

För nederbördshändelsen i Figur 13 kan ses att Mike Urban-modellen gav en bättre överensstämmelse med kalibreringsdata. Framförallt överskattades den tidiga avrinningen av SWMM-modellen. Båda modellerna magasinerade den nederbörd som föll under de inledande timmarna.



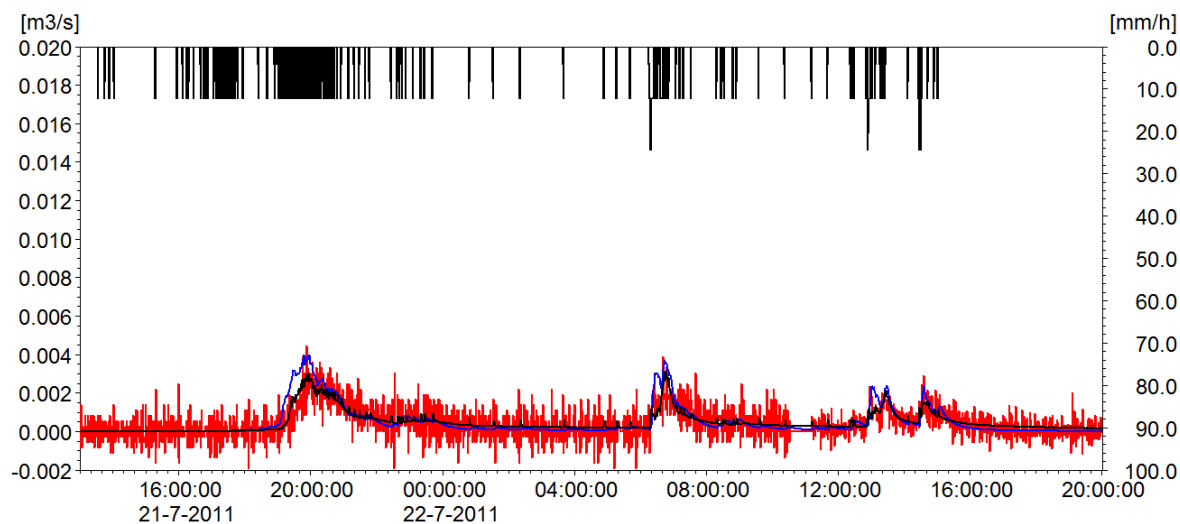
Figur 13. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 14-15/8 2011. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.

För nederbördshändelsen i Figur 14 kan ses att avrinning uppstod för sent i båda modellerna för den inledande flödestoppen. Båda modellerna gav en relativt god överensstämmelse för de efterföljande flödestopparna, dock överskattade SWMM-modellen den första av dessa.



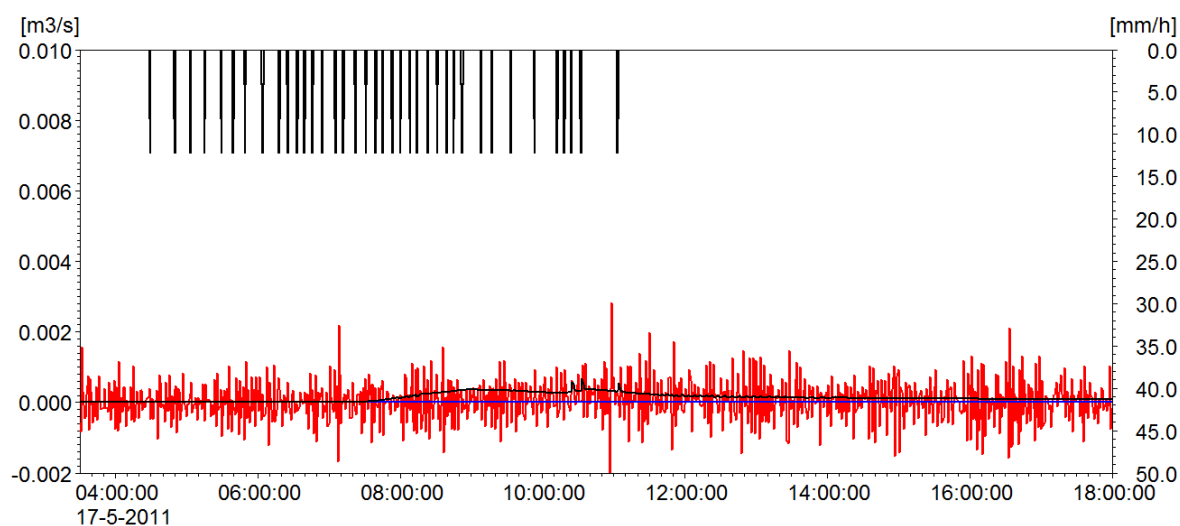
Figur 14. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 27/8 2011. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.

För den långvariga men lågintensiva nederbördshändelse som inträffade den 21-22/7 2011 gav båda modellerna en förhållandevis god överensstämmelse med kalibreringsdata (Figur 15). SWMM-modellen tenderade dock att ge en viss överskattning av de maximala flödena och avrinningen som skedde innan dessa.



Figur 15. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 21/7 2011. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.

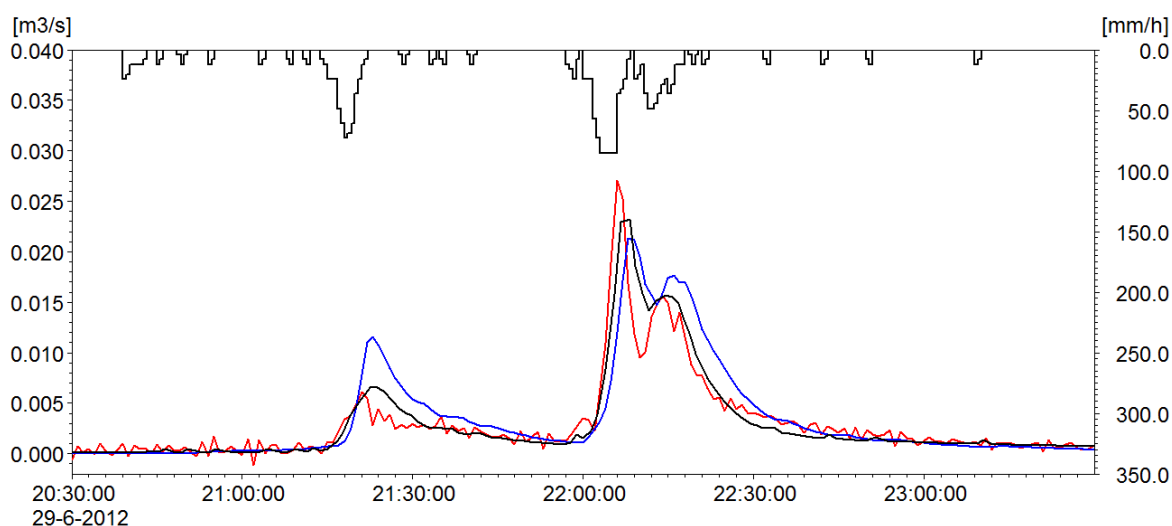
I Figur 16 kan ses att Mike Urban-modellen överskattade avrinningen under nederbördshändelsen, medan SWMM-modellen inte genererade någon avrinning alls. Bruset i kalibreringsdata gör det svårt att utläsa huruvida en viss avrinning skedde, men om så var fallet bör det ha rört sig om en mycket liten mängd.



Figur 16. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 17/5 2011. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.

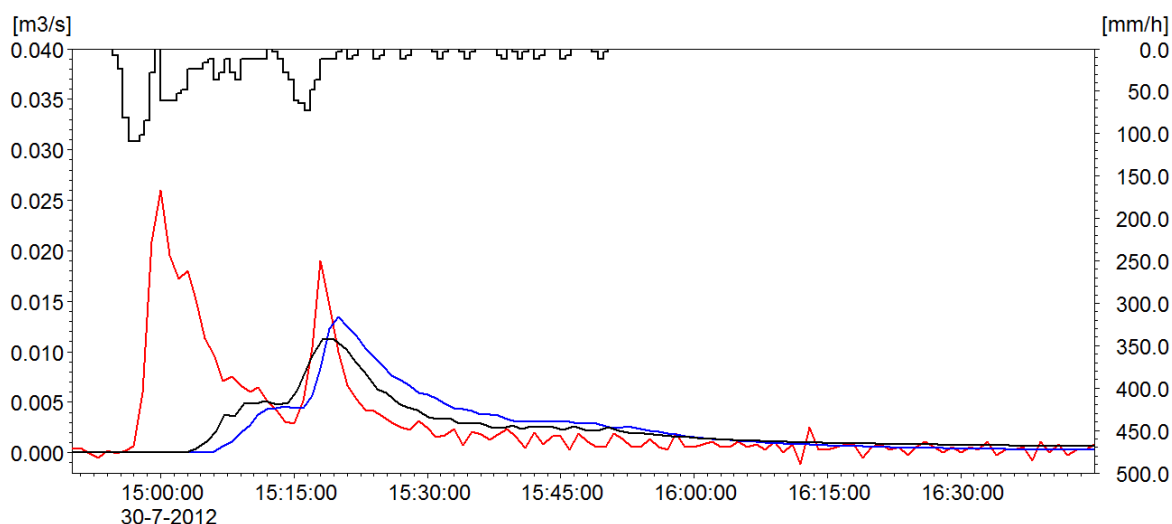
4.2.3.2 Valideringsperiod

I Figur 17, som illustrerar en av de större nederbördshändelser som inträffade under valideringsperioden, kan ses att SWMM-modellen gav en förhållandevis grov överskattning av den inledande flödestoppen. Såväl SWMM-modellen som Mike Urban-modellen gav däremot en relativt god överensstämmelse för den efterföljande större flödestoppen, även om det maximala flödet underskattades något.



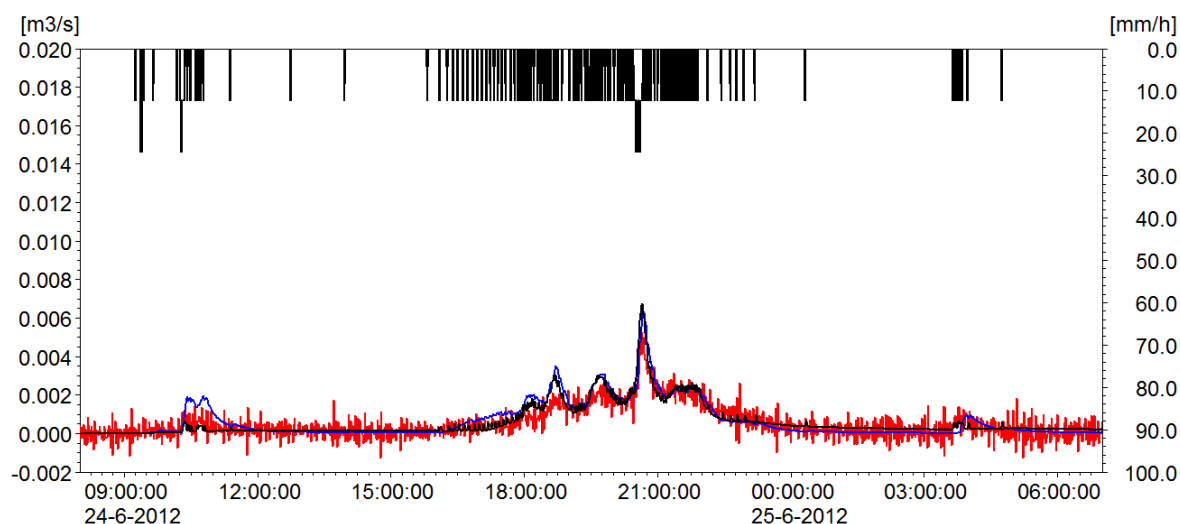
Figur 17. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 29/6 2012. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.

För nederbördshändelsen den 30/7 2012 återgav varken SWMM- eller Mike Urban-modellen det snabba avrinningsförlopp som återfanns i kalibreringsdata, utan underskattade såväl maximalt flöde som avrunnen volym under nederbördshändelsens förlopp (Figur 18).



Figur 18. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 30/7 2012. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.

I Figur 19 visas en nederbördshändelse där båda modellerna överskattade det högsta flödet. Mike Urban-modellen gav dock en bättre överensstämmelse under det övriga avrinningsförloppet.

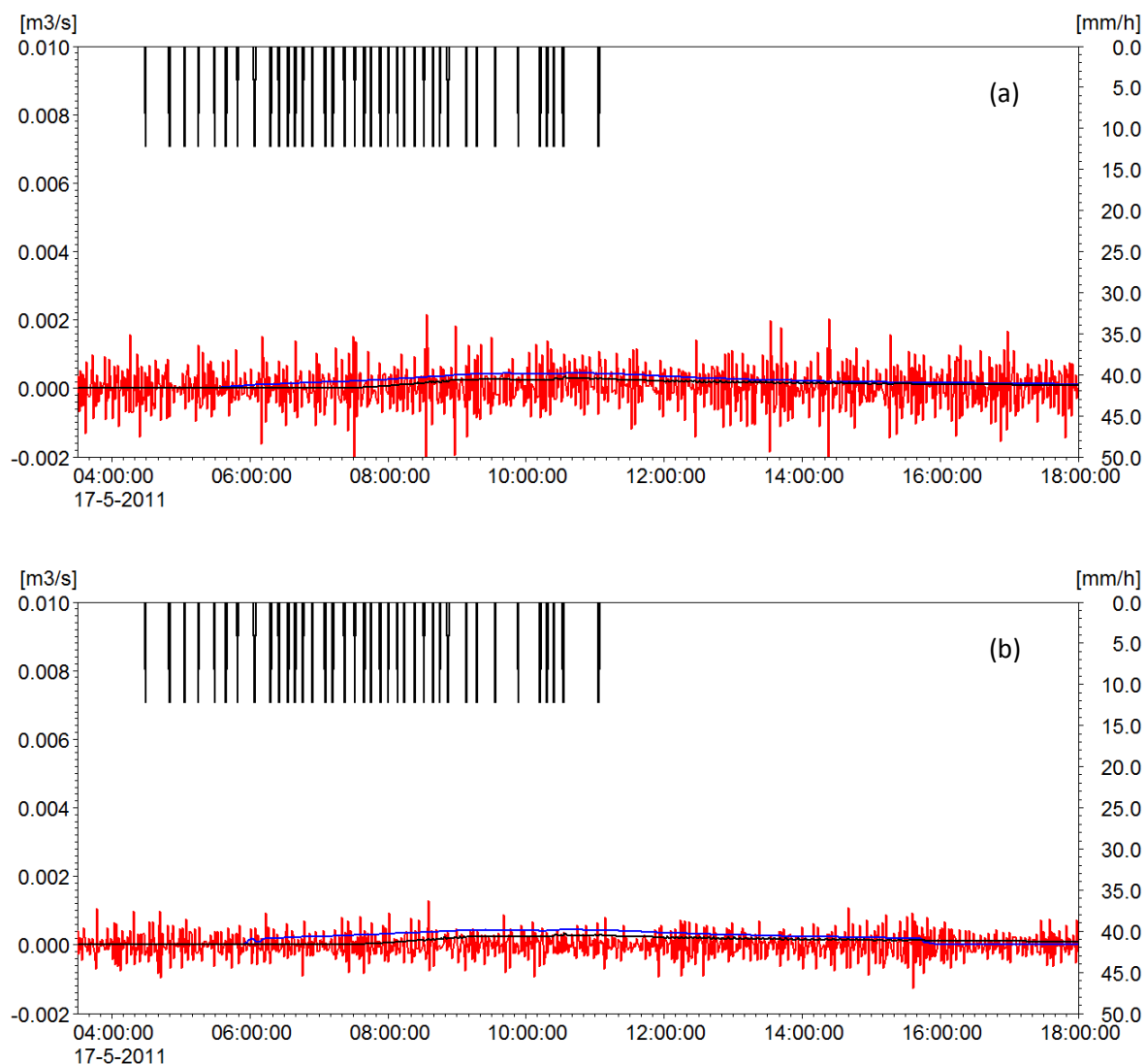


Figur 19. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 24/6 2012. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.

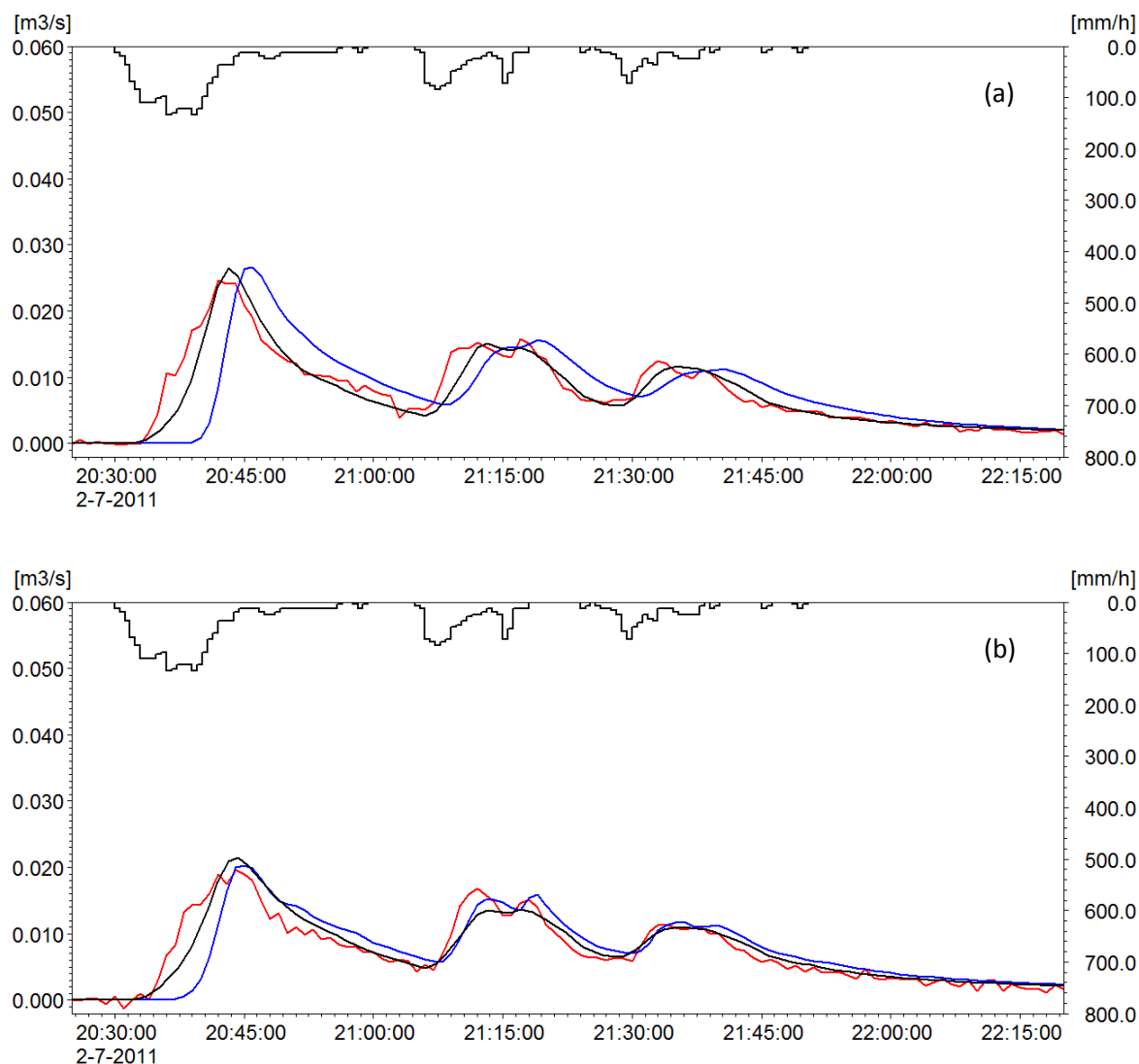
4.2.4 7 och 11 cm sedum-ört-gräs

Nedan presenteras modelleringsresultat från Mike Urban och SWMM för några utvalda nederbördshändelser, kalibrerat och validerat mot den uppmätta avrinningen från sedum-ört-grästaken med 7 respektive 11 cm tjocklek. Modellresultaten för de två takkonstruktionerna hade stora likheter med varandra. Mike Urban-modellerna gav generellt, i likhet med vad som var fallet för 4 cm tjocklek, en alltför långvarig avrinning efter en nederbördshändelse. Detta var också fallet för SWMM-modellerna, vilket skiljer sig från de resultat som erhöles för modellen för 4 cm tjocklek.

För såväl 7 som 11 cm tjocklek gav modellerna ibland också avrinning trots att ingen sådan kunde ses i den uppmätta avrinningen, se Figur 20, vilket för SWMM-modellen inte var fallet med 4 cm taktjocklek (Figur 16). För både Mike Urban och SWMM resulterade denna felaktigt simulerade avrinning i en överskattning av den totala avrunna volymen under simuleringsperioden. Parameterinställningar som gav en mer korrekt total volym i SWMM-modellen underskattade istället avrinningen vid större nederbördstillfällen grovt. Detta innebär att modellerna i SWMM och Mike Urban delvis hade samma svårigheter att efterlikna den uppmätta avrinningen, exempelvis genom att avrinning genererades då den inte borde, samt genom att den pågick under en längre tidsperiod än vad som uppvisas i kalibreringsdata. Mike Urban-modellerna hade dock i de flesta fall en bättre överensstämmelse med den uppmätta avrinningen för både 7 och 11 cm taktjocklek. Till detta bidrog exempelvis det faktum att SWMM-modellerna gav en tydligt tidsförskjuten avrinning för större nederbördshändelser, se Figur 21, vilket också var fallet för 4 cm taktjocklek (Figur 12).



Figur 20. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 17/5 2011 för (a) 7 cm och (b) 11 cm taktjocklek. De röda linjerna visar uppmätt avrinning och de svarta respektive blå linjerna visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. De svarta linjerna i diagrammens topp representerar nederbörden.



Figur 21. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 2/7 2011 för (a) 7 cm och (b) 11 cm taktjocklek. De röda linjerna visar uppmätt avrinning och de svarta respektive blå linjerna visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. De svarta linjerna i diagrammens topp representerar nederbörden.

R^2 -värden, volymfel samt fel i maximalt flöde presenteras i Tabell 15 (7 cm sedum-ört-gräs) och i Tabell 16 (11 cm sedum-ört-gräs) för samma nederbördshändelser som för 4 cm taktjocklek.

Mike Urban-modellerna för 7 och 11 cm taktjocklek gav ett högre R^2 -värde än SWMM-modellerna för samtliga nederbördshändelser, medan resultaten för volymfel och fel i maximalt flöde skiljde sig åt mellan de båda taktjocklekarna. Figurer för övriga nederbördshändelser som redovisats för 4 cm taktjocklek återfinns i Bilaga A och B.

Tabell 15. Nederbördsmängd (P), R^2 -värde, volymfel (V_{fel}) samt fel i maximalt flöde (Q_{fel}) för Mike Urban (MU) och SWMM för 7 cm taktjocklek vid de utvalda nederbördshändelserna.

Nederbördshändelse	P [mm]	Modell	R ²	V _{fel} [%]	Q _{fel} [%]
Kalibreringsperiod					
2/7 2011	51	MU	0,91	4,6	6,3
		SWMM	0,45	2,6	8,3
14-15/8 2011	25	MU	0,90	-4,8	1,1
		SWMM	0,81	-0,60	1,3
27/8 2011	59	MU	0,94	-3,2	-12
		SWMM	0,71	15	8,4
Valideringsperiod					
29/6 2012	37	MU	0,90	-4,1	-0,94
		SWMM	0,60	1,4	4,8
30/7 2012	21	MU	0,04	-27	-65
		SWMM	0,00	9,5	-57

Tabell 16. Nederbördsmängd (P), R^2 -värde, volymfel (V_{fel}) samt fel i maximalt flöde (Q_{fel}) för Mike Urban (MU) och SWMM för 11 cm taktjocklek vid de utvalda nederbördshändelserna.

Nederbördshändelse	P [mm]	Modell	R ²	V _{fel} [%]	Q _{fel} [%]
Kalibreringsperiod					
2/7 2011	51	MU	0,89	1,7	9,1
		SWMM	0,68	4,7	5,0
14-15/8 2011	25	MU	0,89	3,6	-0,38
		SWMM	0,87	2,2	-13
27/8 2011	59	MU	0,93	12	-11
		SWMM	0,82	21	-10
Valideringsperiod					
29/6 2012	37	MU	0,92	1,0	16
		SWMM	0,79	-2,1	10
30/7 2012	21	MU	0,12	16	-56
		SWMM	0,03	21	-54

4.2.5 Modellerad och observerad avrunnen volym

Den uppmätta och modellerade avrunna volymen under 2011 respektive 2012 redovisas i Tabell 17. De uppmätta volymerna har hämtats från Pedersen m.fl. (2012) och Pedersen m.fl. (n.d.). Där kan ses att skillnaden i avrunnen volym mellan de olika taktjocklekarna var relativt liten, men att taket med 11 cm tjocklek ändå gav minst avrinning. Såväl Mike Urban som SWMM överskattade de avrunna volymerna under båda åren och för alla tjocklekar, och de beräknade volymerna för 7 cm och 11 cm taken var av samma storleksordning för de båda programmen. Överskattningen var dock betydligt mindre för den SWMM-modell som kalibrerats för 4 cm tjocklek, medan Mike Urban-modellen hade en genomgående liten

skillnad i beräknad avrunnen volym mellan de olika takkonstruktionerna. I de flesta fall gav modellerna en större avrunnen volym från de djupare taken, vilket är tvärtemot de uppmätta volymerna.

För SWMM-modellen hittades andra parameterinställningar som gav mer korrekta volymer för 7 cm och 11 cm taktjocklek. Dock underskattade dessa modellkalibreringar de flödestoppar som uppstod vid ett flertal nederbördshändelser.

Tabell 17. Uppmätt och modellerad avrunnen volym under 2011 samt 2012 för de olika taktjocklekarna. Uppmätt avrunnen volym hämtad från Pedersen m.fl. (2012) och Pedersen m.fl. (n.d.).

Tjocklek	2011			2012		
	Uppmätt [mm]	MU [mm]	SWMM [mm]	Uppmätt [mm]	MU [mm]	SWMM [mm]
4 cm	258	398	265	199	349	262
7 cm	255	402	389	189	342	347
11 cm	219	402	370	174	342	334

4.2.6 Sammanlagd avrinning från testtaken

Nedan presenteras modelleringsresultat från såväl Mike Urban som SWMM, från modellen där samtliga gröna tak kopplats till samma utloppsnod. Den modellerade avrinningen jämförs med den samlade avrinningen från de undersökta taken för samma nederbördshändelser som för modellerna som skapats för enskilda taktjocklekar. Figurer som illustrerar resultaten återfinns i Bilaga C.

R^2 -värden, volymfel samt fel i maximalt flöde för nederbördshändelserna presenteras i Tabell 18. De nederbördshändelser där endast en liten mängd avrinning uppstod har exkluderats eftersom bruset i kalibreringsdata gjorde beräkningarna mycket osäkra i dessa fall. Mike Urban-modellen gav ett högre R^2 -värde för samtliga undersökta nederbördshändelser och ett mindre volymfel i fyra av fem fall. SWMM-modellen gav ett mindre fel i maximalt flöde i tre av fem fall.

Tabell 18. Nederbördsmängd (P), R^2 -värde, volymfel (V_{fel}) samt fel i maximalt flöde (Q_{fel}) för Mike Urban (MU) och SWMM för de utvalda nederbördshändelserna.

Nederbördshändelse	P [mm]	Modell	R^2	V_{fel} [%]	Q_{fel} [%]
2/7 2011	51	MU	0,91	-0,54	0,41
		SWMM	0,59	6,4	1,4
14-15/8 2011	25	MU	0,96	-0,68	5,2
		SWMM	0,92	5,1	-1,1
27/8 2011	59	MU	0,93	6,6	-6,9
		SWMM	0,77	13	1,7
29/6 2012	37	MU	0,92	-1,4	-5,4
		SWMM	0,75	5,4	-12
30/7 2012	21	MU	0,10	-20	-55
		SWMM	0,02	0,65	-49

4.3 BESTÄMNING AV AVRINNINGSKOEFFICIENTER I MIKE URBAN

De avrinningskoefficienter som bäst beskrev avrinningen från 4 cm moss-sedumtak för respektive nederbördshändelse presenteras i Tabell 19. Motsvarande avrinningskoefficienter för 11 cm sedum-ört-grästak presenteras i Tabell 20.

Ett modelleringsexempel för en nederbördshändelse den 2 juli 2011 visas i Figur 22. Parametrarna har kalibrerats mot den största toppen, och modellen ger i detta fall en god överensstämmelse med stigtiden, det maximala flödet samt med den efterföljande flödesminskningen. Då det i en tid-areamodell inte finns någon lagringsförmåga sker dock inte samma långsamma avklingning som är fallet för den uppmätta avrinningen. Modellresultat för övriga nederbördshändelser redovisas i Bilaga D.

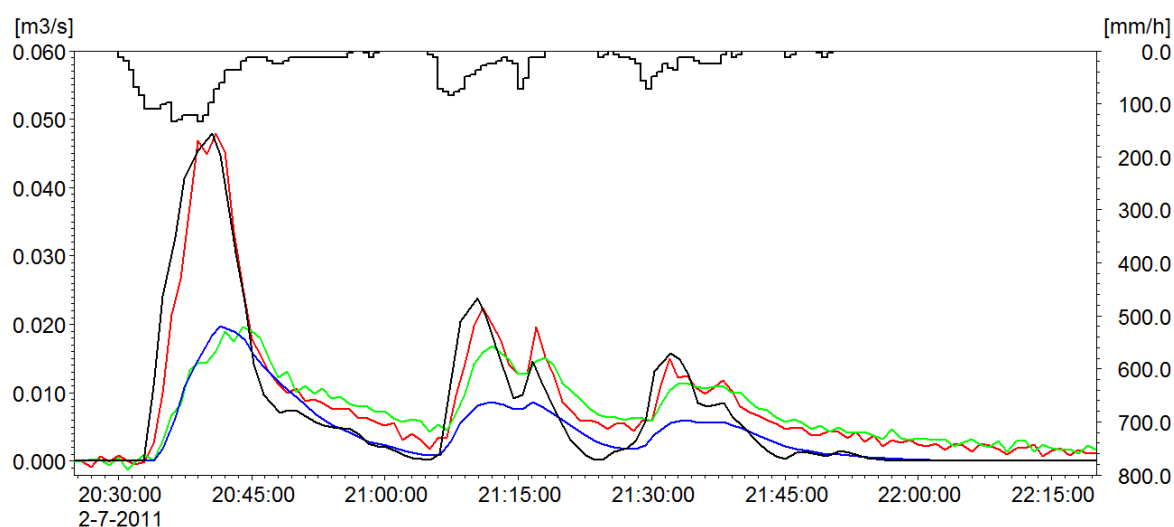
För 4 cm moss-sedumtaken varierar *reduction factor* mellan 0,52 och 0,78 för nederbördshändelser med varierande återkomsttid, och *time of concentration* ligger stadigt runt 7 min. För taket med 11 cm taktjocklek återfinns en större variation för både *reduction factor* och *time of concentration*.

Tabell 19. Avrinningskoefficienter för 4 cm moss-sedumtak vid nederbördshändelser med varierande återkomsttid. Återkomsttider angivna med kursiv stil har inte bedömts som intressanta för den nederbördshändelsen.

	Återkomsttid [år]		Time of conc. [mm]	T-A coeff [-]	Initial loss [mm]	Red. factor [-]
	10 min varaktighet	60 min varaktighet				
2011-07-02	22	24	7	0,33	2,84	0,74
2011-08-27	6	6	7	0,33	3,34	0,52
2011-08-14	0,7	2	7	0,33	4,47	0,78
2012-06-29	2	3	7	0,33	2,23	0,67
2012-07-30	4	3,5	5	0,33	1,85	0,72

Tabell 20. Avrinningskoefficienter för 11 cm sedum-ört-grästak vid nederbördshändelser med varierande återkomsttid. Återkomsttider angivna med kursiv stil har inte bedömts som intressanta för den nederbördshändelsen.

	Återkomsttid [år]		Time of conc. [min]	T-A coeff [-]	Initial loss [mm]	Red. factor [-]
	10 min varaktighet	60 min varaktighet				
2011-07-02	22	24	20	0,33	4,67	0,45
2011-08-27	6	6	30	0,33	11,0	0,72
2011-08-14	<i>0,7</i>	2	60	0,33	5,89	0,83
2012-06-29	2	3	50	0,33	2,84	0,70
2012-07-30	4	3,5	1	0,33	4,06	0,29

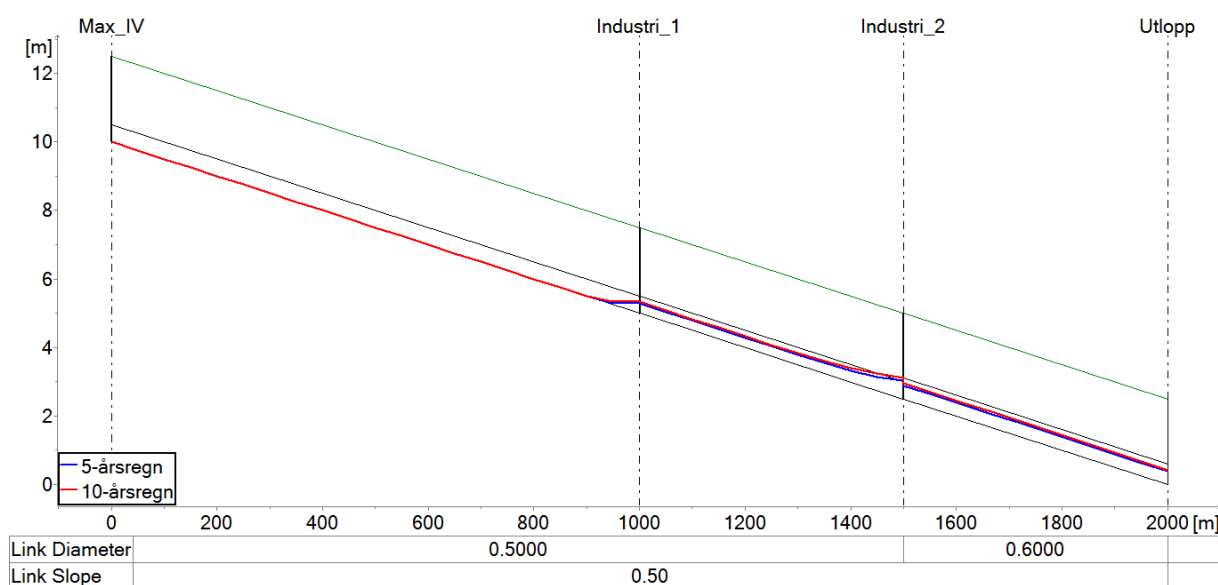


Figur 22. Avrinning beräknad med tid-areamethoden för nederbördshändelsen den 2 juli 2011. Den röda respektive svarta linjen visar observerad respektive modellerad avrinning för 4 cm moss-sedumtak. Den gröna respektive blå linjen visar observerad respektive modellerad avrinning för 11 cm sedum-ört-grästak. Nederbörden representeras av den svarta linjen i diagrammets topp.

4.4 MAX IV-LABORATORIET I LUND

4.4.1 Dimensionering

För försöket att applicera den i Mike Urban konstruerade modellen på ett verkligt område konstruerades ett fiktivt ledningsnät från MAX IV-laboratoriet. Ledningsnätets dimensioner bestämdes utifrån avrinningen från två i modellen konstruerade industriområden belägna nedströms MAX IV-laboratoriet. Dimensionerna redovisas tillsammans med en profilplott över systemet i Figur 23.



Figur 23. Profilplott och dimensioner för ledningsnätet nedströms MAX IV när det belastats med ett 5- respektive 10-årsregn. Den blå linjen representerar högsta trycklinje vid ett 5-årsregn och den röda linjen representerar högsta trycklinje vid ett 10-årsregn.

4.4.2 Avrinning och ledningspåverkan från MAX IV-laboratoriet

När området för MAX IV-laboratoriet anslöts till ledningsnätet gjordes först en beräkning av dagvattenflödet för ett scenario där anläggningen täcktes av konventionella tak. Under de två år som simulerades steg trycklinjen över marknivå vid två tillfällen, vilket innebär att marköversvämning skulle ske. Därefter gjordes motsvarande simulering för det andra scenariot, där den konstruerade modellen för avrinning från gröna tak applicerades på området för MAX IV-laboratoriet. Även i detta fall steg trycklinjen över marknivå vid två tillfällen.

Det fördröjningsmagasin som skapades nedströms MAX IV-laboratoriet, i syfte att undvika marköversvämning i nedströms liggande områden, dimensionerades så att ingen översvämning skedde i respektive tidigare scenario. I scenariot där gröna tak användes på anläggningen krävdes ett fördröjningsmagasin med cirka en fjärdedel så stor volym som var fallet i scenariot med hårdgjorda tak. Fördröjningsmagasinens volymer presenteras i Tabell 21.

Tabell 21. Volymer för fördröjningsmagasin nedströms MAX IV-laboratoriet vid scenarier med gröna respektive hårdgjorda tak.

Taktyp	Volym fördröjningsmagasin [m ³]
Gröna tak	40
Hårdgjorda tak	160

4.4.3 Takstorlek och lutning

De mindre och brantare kalibreringstaken innebär att den modellerade avrinningen i fallet med gröna tak sannolikt skedde snabbare än vad som egentligen borde ha varit fallet för MAX IV-laboratoriet. Försöket att representera denna förändring genom att justera två tidsp parametrar, $t_{k_{onc}}$ för tid-areametoden samt T_{OF} i RDI-modulen, visade att T_{OF} behövde justeras med en faktor 1,7 för att ingen marköversvämning skulle ske då $t_{k_{onc}}$ angivits som 5 min. $t_{k_{onc}}$ hade då ökats med en faktor 5 från de kalibrerade inställningarna, vilket kan ses som en förändring inom rimliga nivåer eftersom avrinningen sannolikt inte kan ske snabbare för en

yta av motsvarande storlek. En sammanställning av kalibrerade och justerade parametervärden ges i Tabell 22.

Tabell 22. Värden för t_{konc} och T_{OF} enligt den ursprungliga modellkalibreringen samt efter justering för den större och planare takytan.

Parameteruppsättning	t_{konc} [min]	T_{OF} [h]
Kalibrerade	1	0,3
Justerade	5	0,5

5. DISKUSSION

5.1 MAGASINERINGSKAPACITET

Undersökningen av huruvida det var möjligt att se ett samband mellan de gröna takens magasineringsskapacitet och den totala nederbördsmängden under en nederbördshändelse visade, i likhet med vad som observerats av Carter & Rasmussen (2006) och VanWoert m.fl. (2005), att en mindre andel av nederbörden i regel kan magasineras då nederbördsmängderna ökar (Figur 10). Överlag sågs en liknande trend för alla de tre takkonstruktionerna, men de djupare taken hade förmåga att fullständigt magasinera episoder med större nederbördsmängder än de med mindre djup. Taket med 11 cm djup magasinerade exempelvis vid ett flertal tillfällen nederbördsmängder på närmare 12 mm. Det förekom dock också episoder av liknande storlek där en betydligt mindre andel av nederbörden kunde magasineras. De exponentiella anpassningarna i Figur 10 indikerar att en avrinning sker även vid mycket små regn, vilket för majoriteten av dessa observationer inte var fallet.

Oberoende av taktyp förefaller magasineringen inte understiga cirka 25 % för någon nederbördsmängd. Detta indikerar att man vid beräkning av avrunna volymer från gröna tak kan anta att åtminstone 25 % av nederbörden kommer att magasineras i taket. Med detta antagande bör man i de flesta fall få en extra marginal till den faktiska avrunna volymen och riskerar sannolikt inte att underskatta densamma. Förhållandena skulle kunna misstänkas vara annorlunda om inte kriteriet med 24 timmars torrperiod använts. När detta kriterium avlägsnades sågs dock fortfarande en minsta magasineringsskapacitet på cirka 25 %, men skillnaderna i magasinering av en viss nederbördsmängd var betydligt större. Det faktum att de gröna taken endast kan magasinera en begränsad nederbördsmängd innebär dock att magasineringen rimligen bör avta ytterligare för regn med stora nederbördsmängder och närma sig 0 % då nederbördsmängderna ökar. Att detta inte kunde observeras beror troligen på att dataunderlaget var litet vad gäller stora nederbördshändelser. För regn med mindre nederbördsmängder förefaller det dock vara rimligt att anta att åtminstone 25 % av nederbörden kan magasineras oberoende av tidigare väderförhållanden.

5.2 SAMBAND MELLAN NEDERBÖRD OCH AVRINNING

Studien av ett eventuellt samband mellan total nederbörd och avrinning under de 25 mest intensiva nederbördshändelserna för olika varaktigheter visade att sambandet var tydligare för längre varaktigheter upp till 120 minuter (Figur 11 och Tabell 10). Detta stämmer överens med resultat från Braskerud (2014), som genomfört en liknande studie upp till 60 minuters varaktighet för en liknande takkonstruktion.

I Figur 11 syntes inget samband alls för 5 minuters varaktighet; för nederbördsintensiteter mindre än cirka 4 mm/5 min kunde taket ge såväl fullständig som obefintlig magasinering av nederbörden. I samma figur sågs en liknande situation med avsevärd spridning i data för 10 minuters varaktighet, där magasineringen varierade mellan fullständig och obefintlig för nederbördsintensiteter mindre än cirka 5 mm/10 min. För 60 minuters varaktighet stärktes sambandet markant, vilket kan ses såväl visuellt som i det högre R^2 -värdet. Även i detta fall fanns dock en betydande spridning i data, men sambandet var ändå relativt tydligt. Undersökningen med 120 minuters varaktighet visade ett än starkare samband. Den mest intensiva nederbördsepisoden ligger långt från övriga och kan därmed ha en stor inverkan på R^2 -värdet, men även då den avlägsnades ur diagrammet kvarstod sambandet med relativt god styrka ($R^2 = 0,68$). För 240 minuters varaktighet var sambandet ungefär lika starkt som för 120 minuter, och därmed förefaller säkerheten i sambandet inte stärkas ytterligare. Vid dimensionering kan det därför vara lämpligt att använda sig av regn med någon av de längre

varaktigheterna 60 och 120 minuter, där de gröna takens beteende är mer förutsägbart. Hänsyn bör dock tas till att det fortfarande kan förekomma en relativt stor variation i de gröna takens funktion.

Det hade för alla varaktigheter varit önskvärt med fler observationer för de högre nederbördsintensiteterna för att få säkrare information om de gröna takens egenskaper under dessa förhållanden. Om detta funnits hade en tydligare bedömning av den linjära approximationens tillförlitlighet för större nederbördsmängder kunnat göras. Det förefaller dock ändå som att sambandet mellan nederbörd och avrinning med relativt god säkerhet kan approximeras som linjärt också för de längre varaktigheterna. Detta är rimligt eftersom de gröna taken har kapacitet att magasinera en viss mängd nederbörd, efter vilken all ytterligare nederbörd bör rinna av från takytan.

Den genomsnittliga magasineringen av nederbörd var relativt likartad för de olika varaktigheterna, vilket tyder på att regnens varaktighet inte påverkade takens genomsnittliga förmåga att magasinera nederbörd. Skillnaden i magasinering var dock mycket stor inom var och en av varaktigheterna, vilket återspeglas i de höga standardavvikelseerna. För dessa kan dock en svagt minskande trend ses mot högre varaktigheter, vilket liksom ovan visar att nederbördsepisoder med större varaktighet magasineras mer likartat. Resultaten skiljer sig från vad som konstaterats av Braskerud (2014), där en något minskad magasinering observerades för längre varaktigheter. Den genomsnittliga magasineringen var dock i samma storleksordning som i ovan nämnda studie.

5.3 MODELLERING AV GRÖNA TAK

De i Mike Urban konstruerade modellerna gav genomgående ett högre R^2 -värde för samtliga analyserade nederbördshändelser än motsvarande modeller i SWMM. I övrigt var skillnaderna mellan de båda modellerna mindre. Felen i maximalt flöde och volym var i allmänhet relativt likartade i de båda modellerna, och vilken modell som presterade bättre avseende dessa parametrar varierade mellan de olika takkonstruktionerna. Det är också värt att notera att båda modellerna ofta hade svårigheter vid samma nederbördstillfällen, exempelvis den redovisade nederbördsepisoden den 30/7 2012. Något skäl till varför modellerna missade just dessa episoder var svårt att finna, men felaktigheter i erhållna data kan inte uteslutas.

Visuellt gav modellerna för 4 cm taktjocklek båda relativt goda prediktioner av de redovisade nederbördshändelserna. Mike Urban-modellen föreföll i de flesta fall följa den uppmätta avrinningen mer exakt, men presterade svagare under simuleringens första månader varefter den blev allt bättre. Detta förklaras av att den i Mike Urban använda RDI-modulen behöver en inledande simuleringsperiod för att ställa in sig innan den börjar fungera optimalt (Mike by DHI 2014c). Efter denna inledande period gav Mike Urban-modellen generellt en mer exakt beskrivning av den observerade avrinningen genom hela tidsserien, men genererade ibland avrinning då ingen sådan kunde ses i den uppmätta avrinningen. Mike Urban-modellen gav också genomgående en långvarig avrinning efter varje nederbördsepisod. Den genererade avrinningen var dock väldigt liten. Dessa ovannämnda observationer beror troligen på att RDI-modulen, åtminstone med de inställningar som undersökts i detta arbete, genererar ett utflöde så länge något vatten finns kvar i dess lager och magasineras därför ingen nederbörd permanent. Detta skiljer sig från egenskaperna hos ett grönt tak där avrinningen upphör när takets vatteninnehåll understiger fältkapaciteten, vilket ger möjligheter till en mer långvarig avdunstning än vad som var fallet för modellen med de valda parameterinställningarna.

Den långvariga avrinningen ger, trots sin låga magnitud, en stor avvikelse i total avrunnen volym jämfört med den uppmätta avrinningen då en längre tidsperiod studeras. SWMM-modellen hade för tak med 4 cm djup inte samma problem med alltför långvarig avrinning. Dess tendens att istället missa vissa observerade avrinningsepisoder tyder på att den kan magasinera lite större nederbördsmängder än vad som är fallet för de verkliga taken. Samtidigt överskattade den avrinningen vid vissa mindre nederbördshändelser, vilket tyder på det motsatta. Avvikelserna kan därför bero på att modellen har svårt att ta hänsyn till de förhållanden som råder omkring varje enskild nederbördshändelse.

Resultaten från modellerna för 7 och 11 cm taktjocklek uppvisade många likheter. Mike Urban-modellerna gav, precis som för 4 cm taktjocklek, en långvarig avrinning efter nederbördshändelserna, vilket även i detta fall troligen beror på de egenskaper hos RDI-modulen som diskuterats ovan. De stora likheterna kan förklaras av att de bästa funna parameteruppsättningarna för 7 cm och 11 cm taktjocklek var likartade i Mike Urban.

För de två tjockare takkonstruktionerna kunde samma tendens till långvarig avrinning också ses i SWMM-modellerna. Detta beror troligen på att modellerna, när de kalibrerats för att få en bra överensstämmelse med de högre flödena, hade parameteruppsättningar där den vattenhållande förmågan var liten. Om parametrarna istället valdes för en bättre överensstämmelse i total avrunnen volym uppstod istället en markant underskattning av flödestopparna, och någon parameteruppsättning som gav tillfredsställande överensstämmelse för såväl volym som maxflöde kunde inte hittas. För dimensioneringssyften bedömdes korrekta beräkningar av de höga flödena vara av stor vikt och därför prioriterades de parameteruppsättningar som presterade bättre med avseende på detta.

Överlag gav Mike Urban-modellerna bättre uppskattningar av de observerade flödena för samtliga tre taktjocklekar, särskilt en tid in i simuleringen där RDI-modulen hade haft möjlighet att ställa in sig. SWMM-modellerna tenderade att ge större avvikelser från det observerade flödet vid såväl höga som låga avrinningsepisoder, även om det fanns vissa undantag. För många av de större avrinningsepisoderna gav SWMM-modellerna även en stor tidsförskjutning jämfört med den observerade avrinningen, såväl vid inledningen som vid avklingandet av episoderna.

Simuleringen där avrinningen från taken med de olika tjocklekarna samlades till samma utloppsnod gav något bättre resultat än vad som varit fallet för de individuella taktjocklekarna. Förbättringen var generellt större i Mike Urban-modellen, men överlag var förbättringarna av såväl R^2 -värde som fel i volym och maximalt flöde ändå relativt små för båda modellerna.

5.4 BESTÄMNING AV AVRINNINGSKOEFFICIENTER I MIKE URBAN

De avrinningskoefficienter som togs fram för taket med 4 cm djup var relativt likartade, men den inbördes variationen följde inget tydligt mönster. För taket med 11 cm djup uppvisades en större variation i samtliga parametrar. För denna taktjocklek krävdes stora ökningar av koncentrationstiden, *time of concentration*, för att en god överensstämmelse i topparnas stig- och sjunktid skulle uppnås. Den längre koncentrationstiden minskade det maximala modellerade flödet, vilket fick till följd att även avrinningskoefficienten, *reduction factor*, behövde varieras i större utsträckning än vad som varit fallet för taket med 4 cm tjocklek. I vissa fall var *reduction factor* större för taket med 11 cm tjocklek än för 4 cm tjocklek. Detta betyder inte att flödet var större från det tjockare taket utan var en effekt av ett högt värde för *time of concentration*. Om hänsyn inte togs till stig- och sjunktiden erhöles mer enhetliga

parametervärden, men det bedömdes ändå att bästa möjliga överensstämmelse med hela flödestoppen var det mest önskvärda.

Parametervärdenas stora variation visar att det kan vara svårt att anta ett rimligt värde på avrinningskoefficienten för ett givet regn, och att det därför kan vara svårt att använda sig av avrinningskoefficienter för gröna tak vid exempelvis dimensioneringsberäkningar. Det vore ändå önskvärt att verifiera resultaten från denna undersökning eftersom den använda nederbördsserien inte innehöll flera regn med samma återkomsttid för de använda varaktigheterna. De beräknade avrinningskoefficienterna för regn med en given återkomsttid har därför inte kunnat jämföras med vad som skulle ha erhållits från andra regn med liknande återkomsttider.

5.5 MAX IV-LABORATORIET I LUND

Baserat på modelleringsresultat från Mike Urban och SWMM, där Mike Urban generellt gav en bättre överensstämmelse med såväl kalibrerings- som valideringsdata, valdes Mike Urban-modellen ut för simuleringsexemplet med MAX IV-laboratoriet. Den inledande simuleringen, där dagvattenflödet jämfördes för två scenarier i vilka laboratoriets tak antogs vara hårdgjort respektive belagt med gröna tak, resulterade för båda scenarierna i översvämningar vid två tillfällen. Att samma antal översvämningar skedde i de två scenarierna är förvånande, eftersom studier som jämfört avrinningen från gröna tak med avrinningen från referenstak visat att gröna tak såväl magasineras som dämpar de högsta flödena även vid stora nederbördshändelser. Att någon skillnad ändå inte observerades i modelleringen beror troligen på att modellen kalibrerats för ett mindre tak med 15° lutning medan taket på MAX IV-laboratoriet var större och endast hade 2° lutning. Lutningen har av bland annat Villarreal & Bengtsson (2005) visats ha en betydande inverkan på avrinningen. Det fanns i Mike Urban-modellen inget givet sätt att kompensera för att det därmed tar längre tid för avrinningen från MAX IV-taket att nå sitt maximum än vad som ges av modellen, och försök att justera modellens tidskonstanter (kapitel 4.4.3) visade att det inte krävdes några särskilt stora förändringar för att ingen översvämning skulle ske. Det är därför möjligt att modellen i detta fall gav en felaktig bild av vattennivåerna i ledningsnätet och rimligt att anta att det i scenariot med de gröna taken egentligen inte borde ske någon översvämning.

Undersökningen av hur stort ett eventuellt fördröjningsmagasin skulle behöva vara för att undvika översvämning på ledningsnätet visade att det enbart krävdes ett magasin med en fjärdedel så stor volym då gröna tak anlagts på laboratoriet jämfört med om anläggningen varit konstruerad med konventionella tak. Detta är ett intressant resultat som, trots osäkerheten i den modellerade avrinningen från taket, visar gröna taks kapacitet att påverka dagvattenflödet på ett positivt sätt. De ovan diskuterade skillnaderna i lutning och storlek mellan kalibreringstaket och MAX IV-taket innebär också att detta kan ses som den minsta förbättringen jämfört med ett konventionellt tak, sannolikt blir de positiva effekterna större än vad som påvisats i detta exempel.

5.6 FELKÄLLOR

Under arbetets gång har ett antal problem framträtt som på olika sätt bidrar till en osäkerhet beträffande modellernas resultat. Det relativt stora bruset i erhållna flödesdata har delvis begränsat vilka analyser som kunnat genomföras, såväl för avrinningen i sig som för modellernas prestation i förhållande till den uppmätta avrinningen. De erhållna värdena för potentiell avdunstning har beräknats baserat på ett antal meteorologiska parametrar och återspeglar således också osäkerheterna i dessa mätningar. Vid användning av resultaten från detta arbete bör också det faktum att erhållna data härstammar från Danmark tas i beaktande.

Eftersom klimatet i allra högsta grad inverkar på de gröna takens egenskaper kan modellerna översiktligt sägas vara kalibrerade mot gröna tak i södra Sverige snarare än för svenska förhållanden generellt. Det är exempelvis osäkert hur avrinningen skulle påverkas om taken var belägna i ett klimat där de var snötäckta under vintermånaderna.

Vad gäller modellerna går det inte att säkert säga huruvida de modeller som hittats är de bästa möjliga eller ej. Det stora antalet modellparametrar komplicerade kalibreringen och antalet undersökta parameteruppsättningar framstår som litet då det sätts i relation till antalet möjliga sådana. SWMMs modul för simulering av gröna tak krävde också indata för många parametrar som det inte fanns kännedom om för de aktuella kalibreringstaken och som det därför rädde stora osäkerheter kring. Dessa parametrar ansattes inledningsvis till värden som hittats i litteraturen, men eftersom de sedan justerades fritt under kalibreringsprocessen tills bästa möjliga resultat erhöles blir effekten av dessa osäkerheter begränsad, åtminstone under förutsättning att de värden som ansatts från början var av en rimlig storleksordning.

Det faktum att det var nödvändigt att multiplicera avrinningen och takens areor med en faktor 1000 för att modellerna skulle kunna simulera flödet skapade en skillnad i vattnets färdsträcka mellan modellen och de verkliga förhållandena på mätplatsen. I SWMM var det möjligt att kompensera för detta med hjälp av parametern *widht*. Denna var dock en av de parametrar som tilläts variera för att uppnå bästa möjliga modelleringsresultat och i vissa fall finns därför ändå en avvikelse i transportsträcka för modellerna i SWMM. I Mike Urban bör förändringen ha haft en direkt påverkan på transporttiden, vilket kan ha gett parameterinställningar som skiljer sig från vad som annars skulle ha varit fallet.

Det var inte möjligt att anpassa Mike Urban-modellen till tak med annan storlek och lutning; för detta skulle det krävas mätningar och analyser av avrinning från tak med andra egenskaper än de som använts i detta fall. Att små förändringar hos tidskonstanterna påverkade nivåerna i ledningsnätet markant visar vikten av detta problem och därför skulle det i dagsläget inte vara möjligt att applicera modellen på taktytor med annan storlek och andra egenskaper. Det bör dock också konstateras att även om det i SWMM finns möjlighet att på ett enkelt sätt justera också parametrar som lutning och storlek så är det mycket osäkert vilken effekt en sådan justering skulle få. Erfarenheter från kalibreringsprocessen säger att effekten av sådana justeringar kan ha olika stor effekt beroende på övriga inställningar i modulen.

6. SLUTSATSER

Gröna tak har potential att påverka dagvattenavrinningen över såväl kortare som längre tidsperioder, men för enskilda nederbördshändelser beror deras kapacitet i stor utsträckning på takets initiala vatteninnehåll. Detta leder till att vissa små regn kan magasineras helt medan nästan ingen magasinering sker för andra regn av liknande storlek. Det fanns ett starkare samband mellan nederbördsmängd och avrunnen volym för 60 respektive 120 minuters varaktighet än vad som var fallet för de kortare varaktigheterna. Det kan således vara lämpligt att använda sig av de längre varaktigheterna vid exempelvis dimensioneringsutredningar i områden med gröna tak.

Avrinningsmodelleringen visade att båda de undersökta modelleringsprogrammen, SWMM och Mike Urban, har relativt goda förutsättningar att kunna ge korrekta representationer av avrinningen från gröna tak sett över enskilda nederbördshändelser, men att de i de flesta fall inte ger tillförlitliga beräkningar av avrunnen volym över längre tidsperioder. Båda modellerna genererade vid vissa tillfällen avrinning trots att någon sådan inte kunde ses i mätdata, men sådana avvikelser bör främst generera fel vid beräkning av avrunna volymer och inte ha särskilt stor inverkan på möjligheten att tillämpa modellerna vid exempelvis dimensioneringsberäkningar. Överlag gav Mike Urban resultat som överensstämde bättre med uppmätta data än vad som var fallet för SWMM, även om skillnaderna ofta var små. Resultaten i Mike Urban blev också allt bättre längre in i simuleringsperioden. För att modellen ska prestera så bra som möjligt kan det därför vara nödvändigt att inledningsvis köra modellen för en tidsperiod med realistiska nederbördsepisoder även vid modellering med konstruerade regn. Utifrån resultaten i detta arbete verkar det dock i dagsläget inte vara möjligt att ge en i alla lägen korrekt beskrivning av avrinningen från gröna tak med hjälp av en hydrologisk modell, även om de har potential att användas vid dimensioneringsberäkningar av dagvattensystem. För att de ska vara ett tillförlitligt verktyg för att beräkna avrinningen från gröna tak behövs en vidare utveckling av programvarorna med syfte att förbättra och förenkla modelleringsprocessen för områden med gröna tak.

Den stundtals stora variationen i parametrarna vid bestämning av avrinningskoefficienter indikerade att det kan vara svårt att på ett tillförlitligt sätt beskriva avrinningen från gröna tak med enbart denna typ av metod. För att säkert fastställa detta skulle det vara önskvärt att fler analyser genomfördes för regn med liknande återkomsttider som de som studerats i detta arbete. Även modelleringen av MAX IV-laboratoriet i Lund visar på behovet av fortsatta analyser, där avrinningen från gröna tak med annan storlek och lutning vore av intresse för att kunna anpassa modellerna. Det vore särskilt intressant med analyser från tak belägna i de nordligare delarna av Sverige, då det skulle ge en möjlighet att anpassa modellerna också till ett kallare klimat.

7. REFERENSER

Alfredo, K., Montalto, F. & Goldstein, A. (2010). "Observed and modelled performances of prototype Green Roof test plots subjected to simulated low- and high-intensity precipitations in a laboratory experiment", *Journal of hydrologic engineering*, vol. 15 (6), ss. 444-457.

ASCE. (2005). *The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation*, Reston: Environmental and Water Resource Institute of the American Society of Civil Engineers.

Bengtsson, L., Grahn, L. & Olsson, J. (2005). "Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden", *Nordic Hydrology*, vol.36 (3), ss. 259-268.

Berndtsson, J.C. (2010). "Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review", *Ecological Engineering*, vol. 36 (4), ss. 351-360.

Bond, D.J. & Thompson, G.W.H. (2012). *Flow modelling in green roof systems*, Christchurch: University of Canterbury.

Braskerud, B.C. (2014). *Grønne tak og styrtregn – Effekten av ekstensive tak med sedumvegetasjon for redusert avrenning etter nedbør og snøsmelting i Oslo*, Rapport nr 65/2014, Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat.

Burszta-Adamiak, E. & Mrowiec, M. (2013). "Modelling of green roofs' hydrologic performance using EPA's SWMM", *Water Science & Technology*, vol. 68 (1), ss. 36-42.

Carter, T.L. & Rasmussen, T.C. (2006). "Hydrologic behavior of vegetated roofs", *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 42 (5), ss. 1261-1274.

De Cuyper, K., Dinne, K. & Van De Vel, L. (2004). *Rainwater Discharge from Green Roofs*, Rotterdam: CIB W062 30th International Symposium on Water Supply and Drainage for Buildings.

Deutsch, B., Whitlow, H., Sullivan, M., Savineau, A. & Busiek, B. (2007). *The Green Build-out Model: Quantifying the Stormwater Management Benefits of Trees and Green Roofs in Washington, DC*, Washington, DC: Casey Trees & LimnoTech.

DMI. (2014). *Klimanormaler*, Danmarks Meteorologiske Institut.
<http://www.dmi.dk/vejir/arkiver/normaler-og-ekstremer/klimanormaler-dk/> [2014-10-05].

Dunnett, N. & Kingsbury, N. (2004). *Planting Green Roofs and Living Walls*. London: Timber Press.

Enoksen, L.M. (2009). *Green Roof Award – En bok om Gröna Tak*, Malmö: Serviceförvaltningen Malmö Stad.

EPA. (2013). *Green Roofs*. United States Environmental Protection Agency.
<http://www.epa.gov/heatiland/mitigation/greenroofs.htm> [2014-08-17].

EPA. (2014a). *Storm Water Management Model (SWMM)*, United States Environmental Protection Agency. <http://www2.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm> [2014-09-28].

- EPA. (2014b). *List of SWMM 5 updates and bug fixes*, United States Environmental Protection Agency. http://www2.epa.gov/sites/production/files/2014-06/epaswmm5_updates.txt [2014-09-28].
- FLL. (2002). *Guideline for the Planning, Execution and Upkeep of Green-Roof Sites*, Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau.
- Getter, K.L., Rowe, D.B. & Andresen, J.A. (2007). "Quantifying the effect of slope on extensive roof stormwater retention", *Ecological Engineering*, vol. 31 (4), ss. 225-231.
- Getter, K.L., Rowe, D.B., Robertson, G.P., Cregg, B.M. & Andresen, J.A. (2009). "Carbon Sequestration Potential of Extensive Green Roofs", *Environmental Science & Technology*, vol. 43 (19), ss. 7564-7570.
- Greenroof. (2014). *Gröna tak*. Scandinavian Green Roof Institute, <http://greenroof.se/about-green-roofs/> [2014-08-18].
- Granlund, B. & Andréasson, M. (1997). *Analys av avloppssystem med datormodeller – Tillämpningsexempel med MOUSE-systemet*, VA-Forsk Rapport 1997:9, Stockholm: VAV AB.
- Granlund, B. & Nilsson, D. (2000). *Mätningar i avloppsnät samt principer för verifiering av avloppsmodeller*, VA-Forsk Rapport 2000:7, Stockholm: VAV AB.
- Gustafsson, L-G. (1993). *Simulering av hydrologin inom urbana områden. Metodikmanual – MouseNAM*, VA-Forsk Rapport 1993:04, Stockholm: VAV AB.
- Holgersson, B., Hedlund, T., Ahlroth, S, Frost, C., Rosenqvist, P. & Thörn, P. (2007). *Sverige inför klimatförändringarna – hot och möjligheter*, SOU 2007:60, Stockholm: Miljödepartementet.
- McCuen, R.H., Johnson, P.A. & Ragan, R.M. (1996), *Highway Hydrology*, Rapport FHWA-SA-96-067, Washington, DC: Federal Highway Administration.
- Mentens, J., Raes, D. & Hermy, M. (2006). "Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?", *Landscape and Urban Planning*, vol. 77 (3), ss. 217-226.
- Mike by DHI. (2014a). *Mike Urban - Collection system*, DHI.
- Mike by DHI. (2014b). *MOUSE - Pipe Flow Reference Manual*, DHI.
- Mike by DHI. (2014c). *MOUSE – Rainfall Dependent Inflow and Infiltration Reference Manual*, DHI.
- Mike by DHI. (2014d). *MOUSE – Runoff Reference Manual*, DHI.

- Pedersen, J.S., Junker, B., Jørgensen, L. & Klausen, N.E. (2012). *Forsøgsrapport Demonstrationsanlæg for Grønne tage – vandtillbageholdelse og plantevalg*, Taastrup: AgroTech.
- Pedersen, J.S., Klausen, N.E., Jørgensen, L. & Junker, B. (n.d.) *Tillægsrapport. Demonstrationsanlæg for Grønne tage – vandtillbageholdelse og plantevalg*, Taastrup: AgroTech.
- Roehr, D. & Kong, Y. (2010). "Stormwater Runoff Reduction Achieved by Green Roofs: Comparing SWMM Method to TR-55 Method", i: Scott, S. & Lichten, K. (red), *Low Impact Development 2010: Redefining Water in the City*. Reston: ASCE.
- Rossman, L.A. (2010). *Storm Water Management Model – User's Manual Version 5.0*, Rapport EPA/600/R-05/040, Cincinnati: United States Environmental Protection Agency.
- Scholz-Barth, K. (2001). "Green on top", *Urban Land*, juni 2001, ss. 82-87, 96-97.
- Simmons, M.T., Gardiner, B., Windhager, S. & Tinsley, J. (2008). "Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate", *Urban Ecosystems*, vol. 11 (verkar inte finnas något nummer), ss. 339-348.
- SMHI. (2013). *Snöns densitet, vatteninnehåll och tyngd*, Norrköping: Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, <http://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/vikten-pa-sno-1.10378> [2014-08-18].
- Stovin, V. (2010). "The potential of green roofs to manage Urban Stormwater", *Water and Environment Journal*, vol. 24 (3), ss. 192-199.
- Svenskt Vatten. (2004). *Dimensionering av allmänna avloppsledningar*, Publikation P90, Stockholm: Svenskt Vatten AB.
- Svenskt Vatten. (2007). *Klimatförändringarnas inverkan på allmänna avloppssystem. Underlagsrapport till Klimat- och sårbarhetsutredningen*, Meddelande M134, Stockholm: Svenskt Vatten AB.
- Svenskt Vatten. (2011a). *Hållbar dag- och dränvattenhantering. Råd vid planering och utformning*, Publikation P105, Stockholm: Svenskt Vatten AB.
- Svenskt Vatten. (2011b). *Nederbördsdata vid dimensionering och analys av avloppssystem*, Publikation P104, Stockholm: Svenskt Vatten AB.
- Tolderlund, L. (2010). *Design Guidelines and Maintenance Manual for Green Roofs in the Semi-Arid and Arid West*, Denver: University of Colorado.
- VanWoert, N.D., Rowe, D.B., Andresen, J.A., Rugh, C.L., Fernandez, R.T. & Xiao, L. (2005). "Green Roof Stormwater Retention: Effects of Roof Surface, Slope, and Media Depth", *Journal of Environmental Quality*, vol. 34 (3), ss. 1036-1044.
- Veg Tech (2013). *Takvegetation – Sedum-ört-grästak*, Vislanda: Veg Tech AB.

Veg Tech (2014). *Vegetationsteknik – Grönare byggande för framtidens städer*, Vislanda: Veg Tech AB.

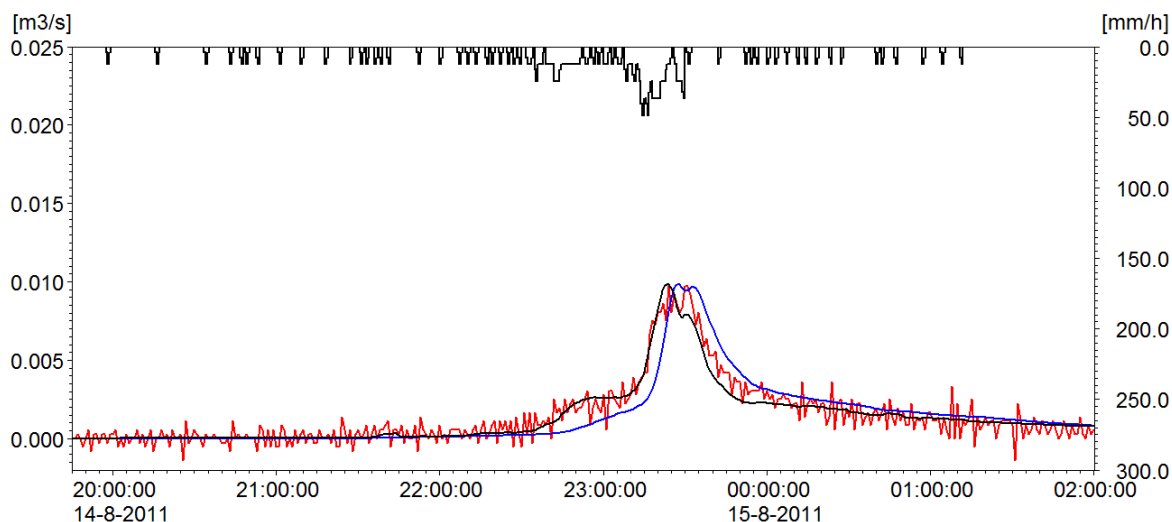
Villarreal, E.L. (2007). "Runoff detention effect of a *sedum* green-roof", *Nordic Hydrology*, vol. 38 (1), ss. 99-105.

Villarreal, E.L. & Bengtsson, L. (2005). "Response of a *Sedum* green-roof to individual rain events", *Ecological Engineering*, vol. 25 (1), ss. 1-7.

BILAGA A – MODELLERINGSRESULTAT FÖR 7 CM TAKTJOCKLEK

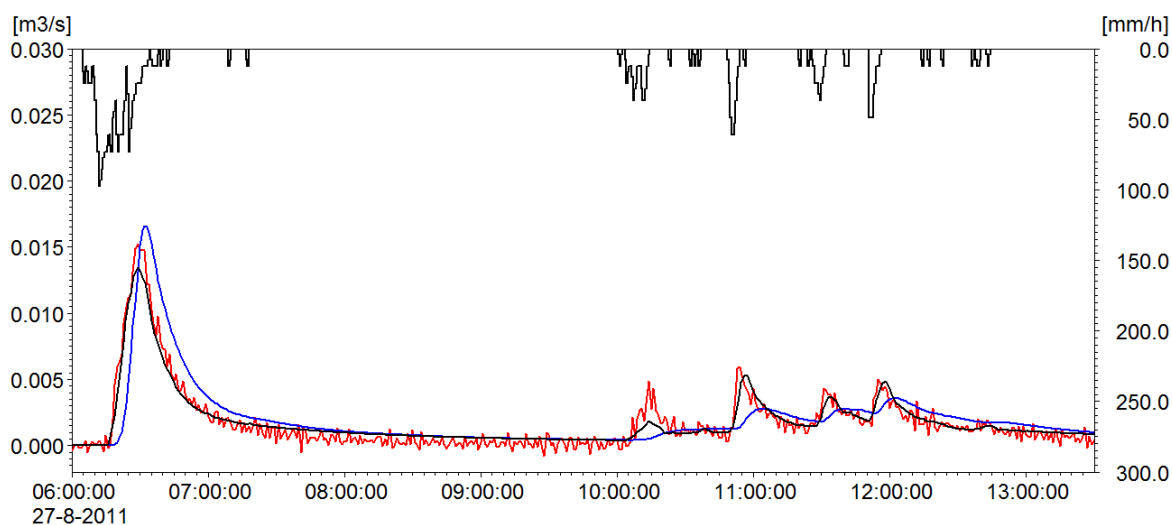
A1 KALIBRERINGSPERIOD

I Figur A1 illustreras en nederbördshändelse där SWMM-modellen ger en förskjuten avrinning medan Mike Urban-modellen ger en god överensstämmelse med kalibreringsdata. Båda modellerna ger också ett nära korrekt maximalt flöde.



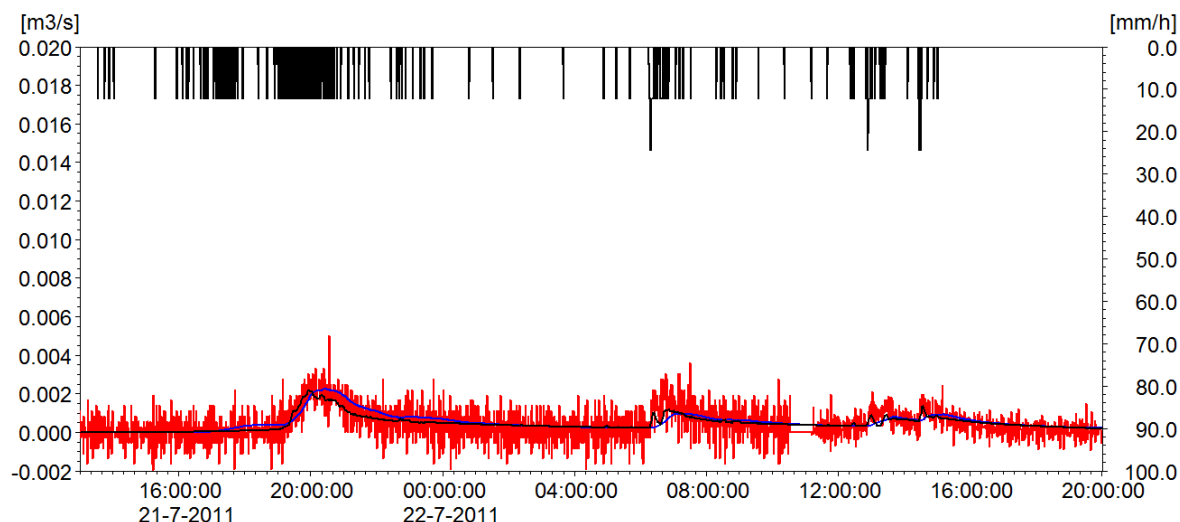
Figur A1. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 14/8 2011. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.

Figur A2 visar en nederbördshändelse där båda modellerna överensstämmer förhållandevis väl med kalibreringsdata under den inledande avrinningsepisoden. SWMM-modellen underskattar dock de efterföljande mindre flödestopparna grovt och ger genomgående en förskjuten avrinning.



Figur A2. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 27/8 2011. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.

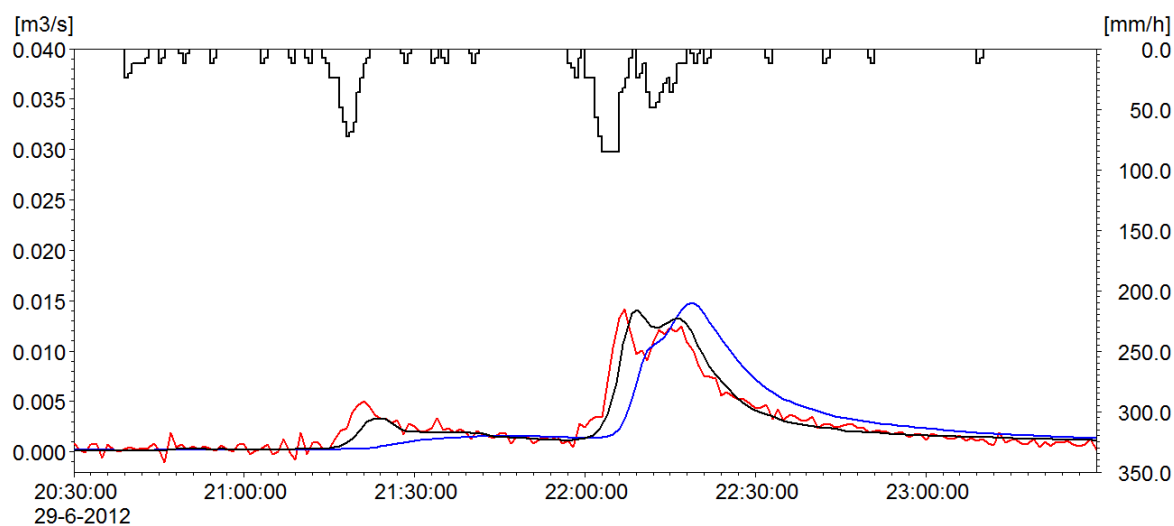
Figur A3 illustrerar en långvarig men lågintensiv nederbördshändelse där båda modellerna gav en avrinning som stämmer relativt väl överens med kalibreringsdata.



Figur A3. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 21/7 2011. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.

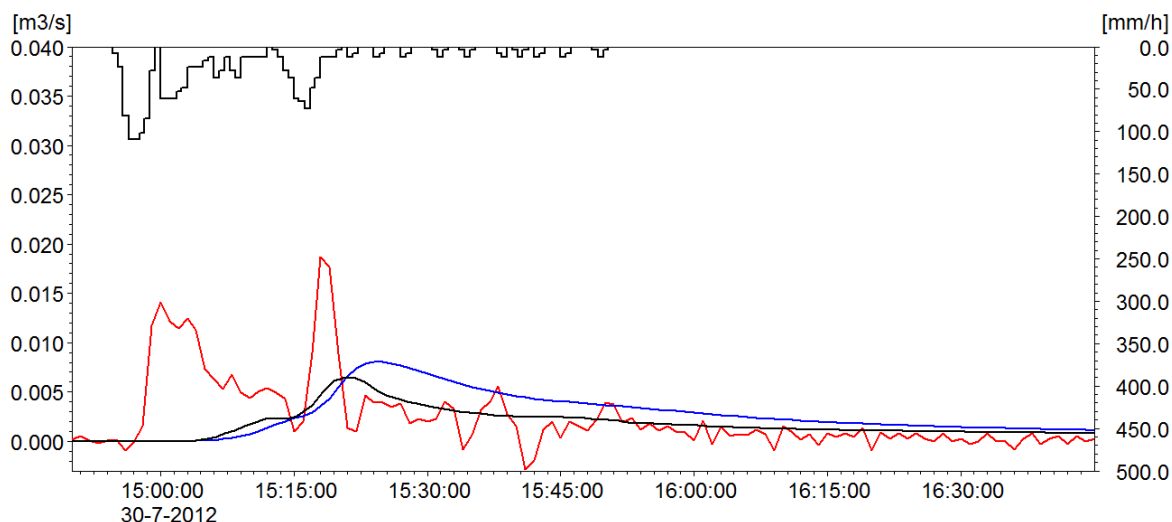
A2 VALIDERINGSPERIOD

I Figur A4 illustreras en nederbördshändelse där SWMM-modellen återigen gav en förskjutning i avrinningsförloppet. Den missade också den inledande flödestoppen som kan ses i valideringsdata. Mike Urban-modellen gav en relativt god överensstämmelse för hela avrinningsförloppet.



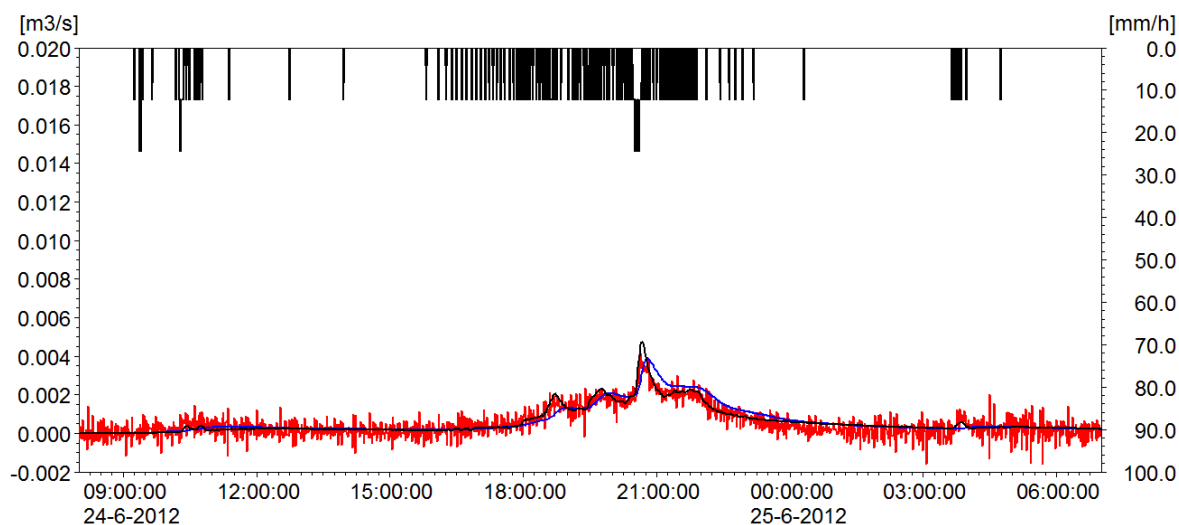
Figur A4. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 29/6 2012. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.

Figur A5 visar en nederbördshändelse där båda modellerna, i likhet med modellerna för 4 cm tjocklek, ger en avrinning som inte stämmer överens med valideringsdata.



Figur A5. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 30/7 2012. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.

I Figur A6 illustreras en nederbördshändelse där båda modellerna följde valideringsdata relativt väl. Mike Urban-modellen gav dock en viss överskattning av det högsta flödet.

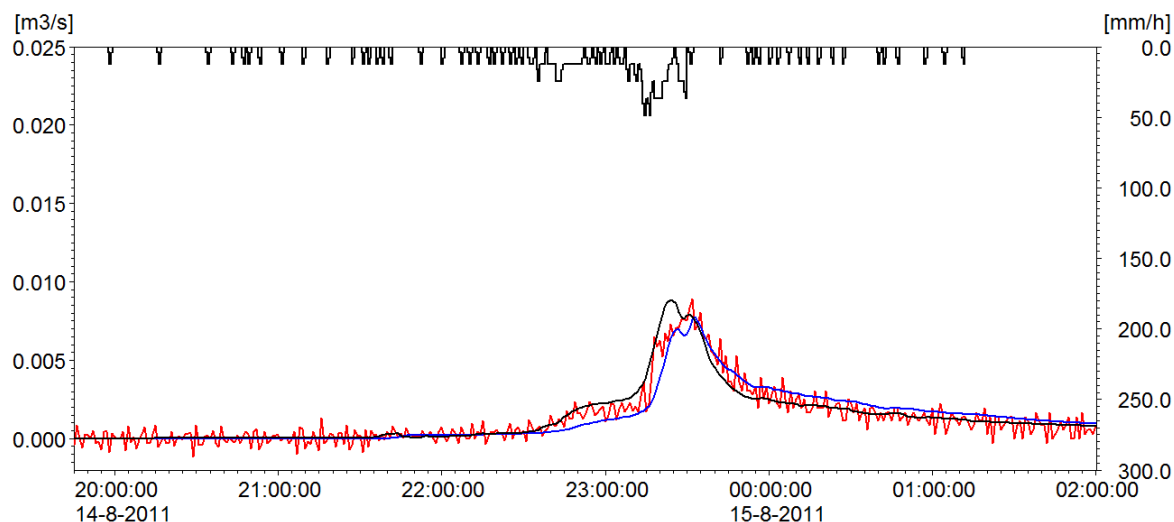


Figur A6. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 24/6 2012. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.

BILAGA B – MODELLERINGSRESULTAT FÖR 11 CM TAKTJOCKLEK

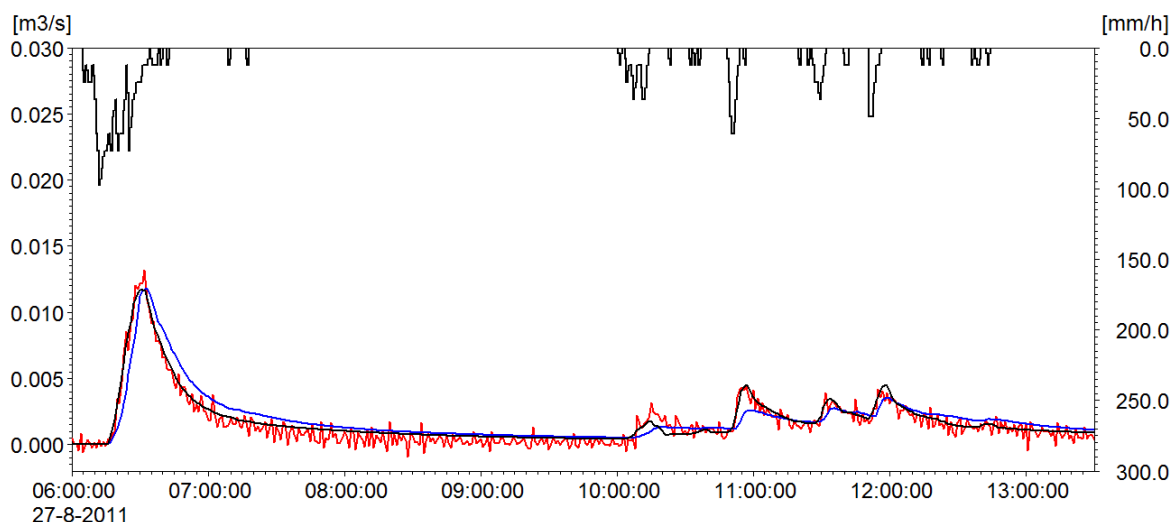
B1 KALIBRERINGSPERIOD

I Figur B1 visas en nederbördshändelse där båda modellerna gav en relativt god överensstämmelse med kalibreringsdata. SWMM-modellen gav dock en viss underskattning av flödet, medan Mike Urban-modellen i sin tur ger en viss överskattning av detsamma.



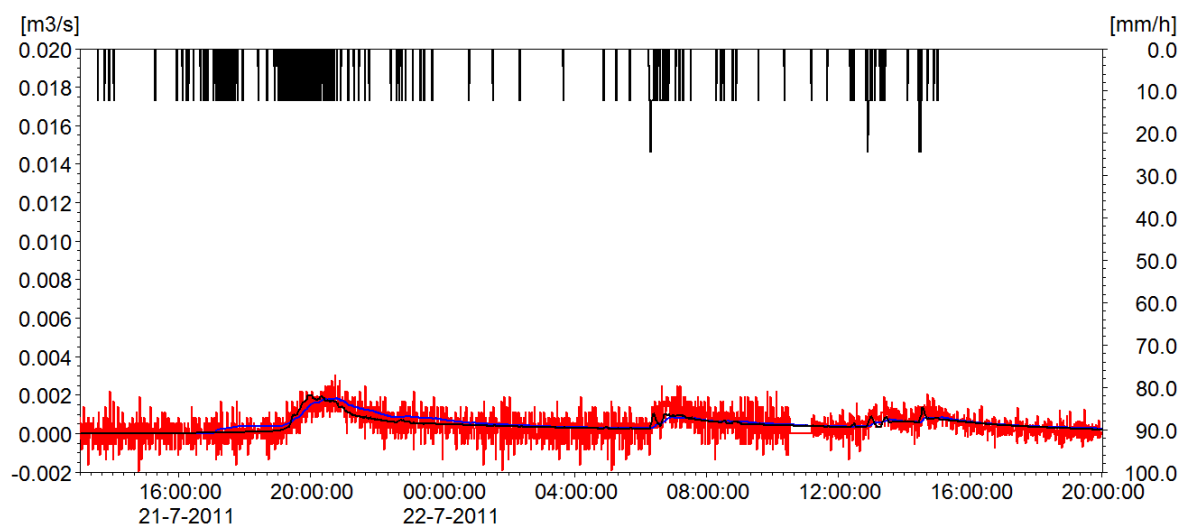
Figur B1. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 14-15/8 2011. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.

Figur B2 illustrerar en nederbördshändelse där båda modellerna gav en relativt god överensstämmelse med kalibreringsdata under den inledande flödesepisoden. SWMM-modellen gav dock även i detta fall en viss förskjutning i avrinningen, och underskattade dessutom de två efterföljande mindre topparna. Den i Mike Urban genererade avrinningen stämde i huvudsak väl överens med kalibreringsdata, men underskattade flödet något vid den första av de mindre flödestopparna.



Figur B2. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 27/8 2011. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.

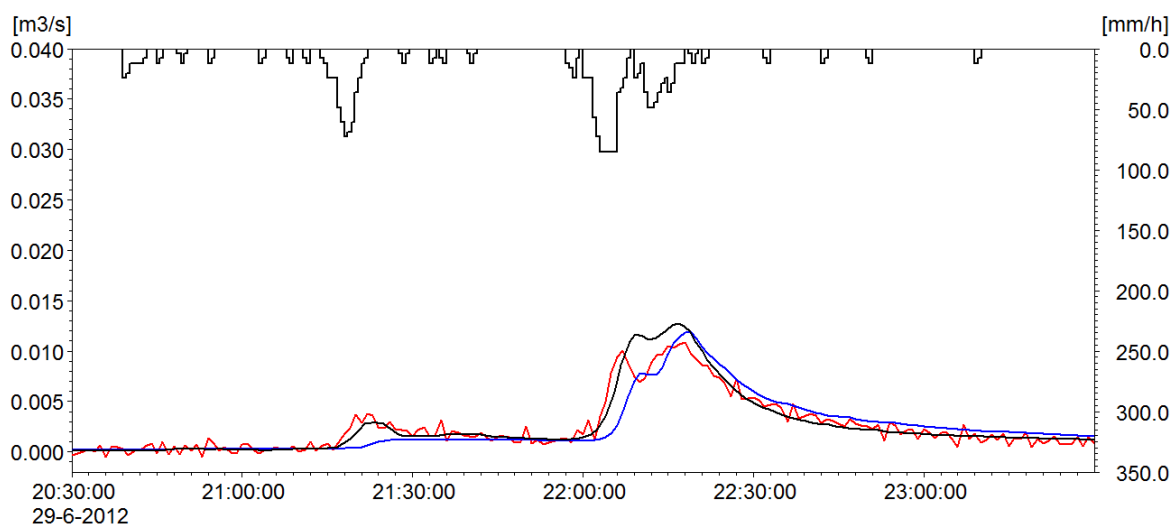
Figur B3 visar en långvarig men lågintensiv nederbördshändelse där båda modellerna genererade en avrinning som stämde väl överens kalibreringsdata. Avrinningsförloppet inleds dock något tidigt i SWMM-modellen.



Figur B3. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 21/7 2011. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.

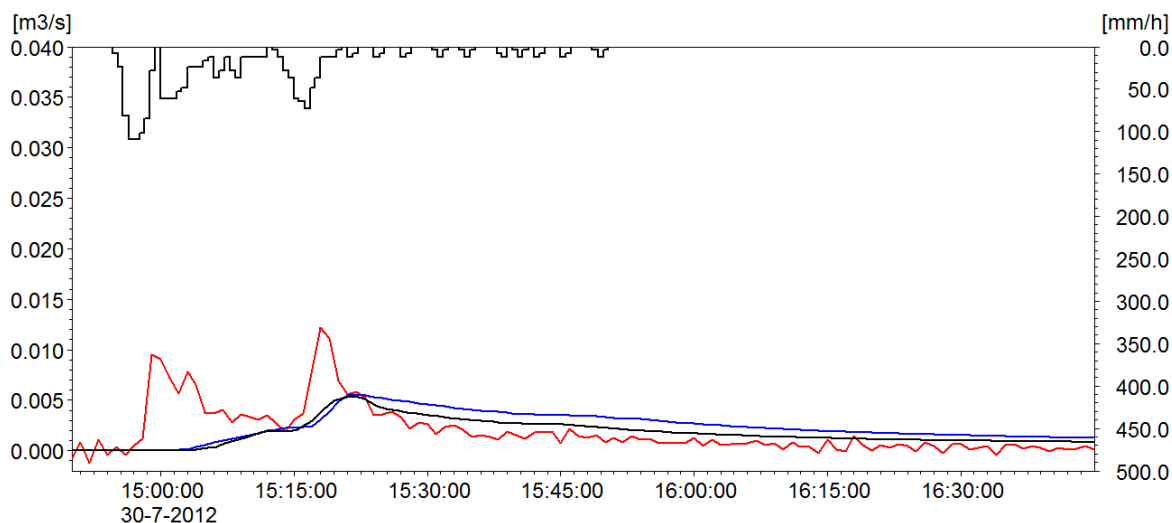
B2 VALIDERINGSPERIOD

Figur B4 illustrerar en nederbördshändelse där SWMM-modellen återigen gav en förskjutning i avrinningsförloppet. Den missade också den inledande flödestoppen som kan ses i valideringsdata. Mike Urban-modellen överskattade avrinningen vid den större flödestoppen.



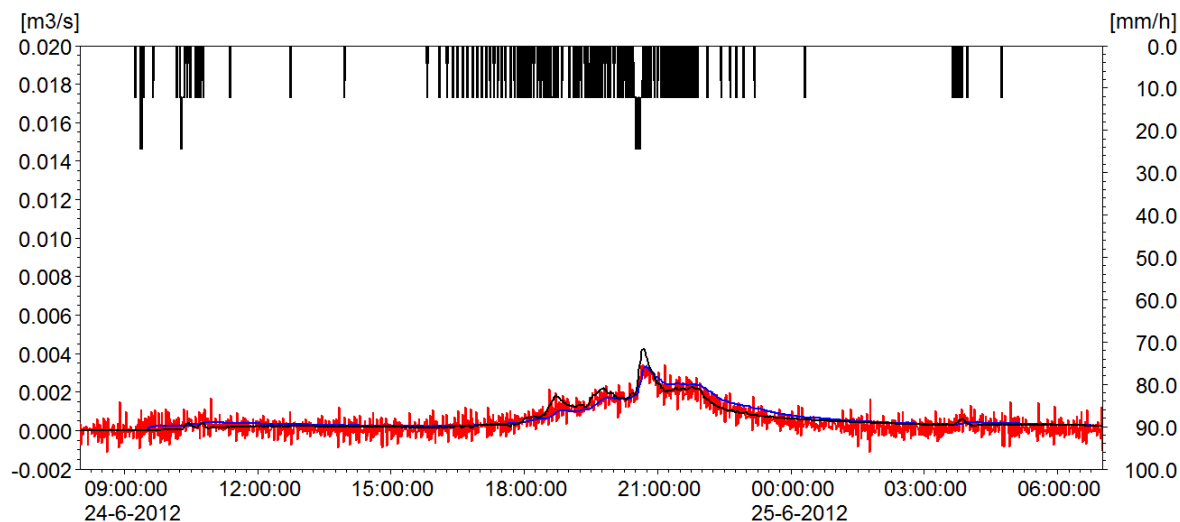
Figur B4. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 29/6 2012. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.

Figur B5 visar en nederbördshändelse där båda modellerna, i likhet med modellerna för 4 cm och 7 cm tjocklek, ger en avrinning som inte stämmer överens med valideringsdata.



Figur B5. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 30/7 2012. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.

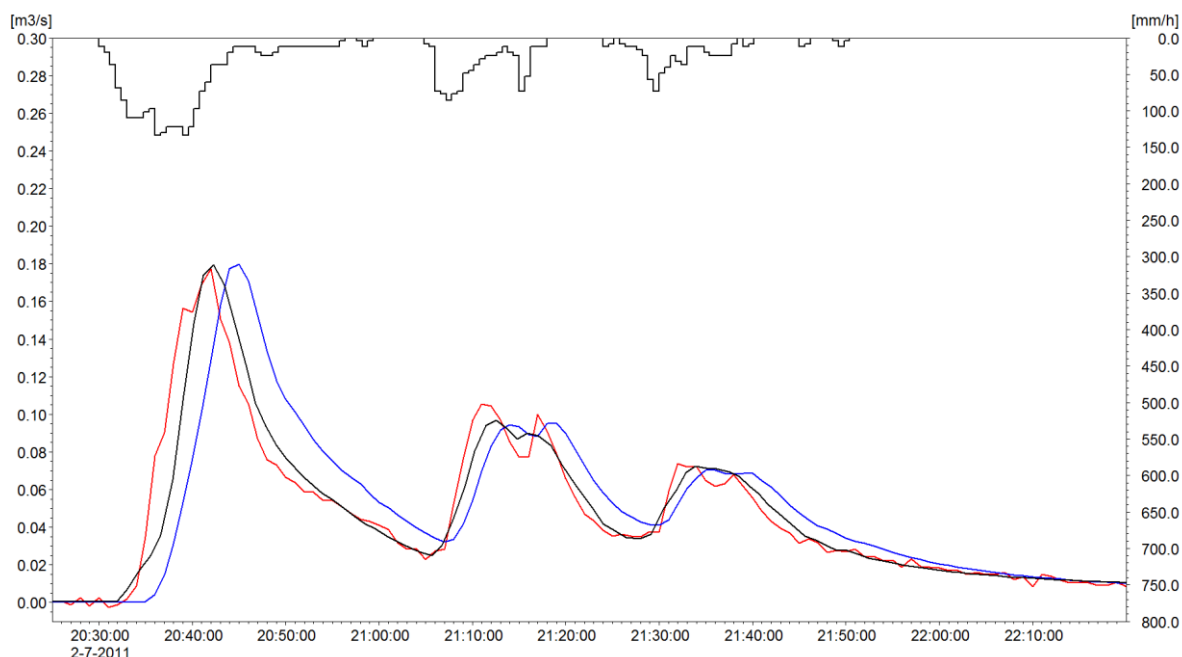
Figur B6 visar en nederbördshändelse där båda modellerna, i likhet med modellerna för 7 cm tjocklek, följde valideringsdata relativt väl. Mike Urban-modellen gav dock en viss överskattning av det högsta flödet.



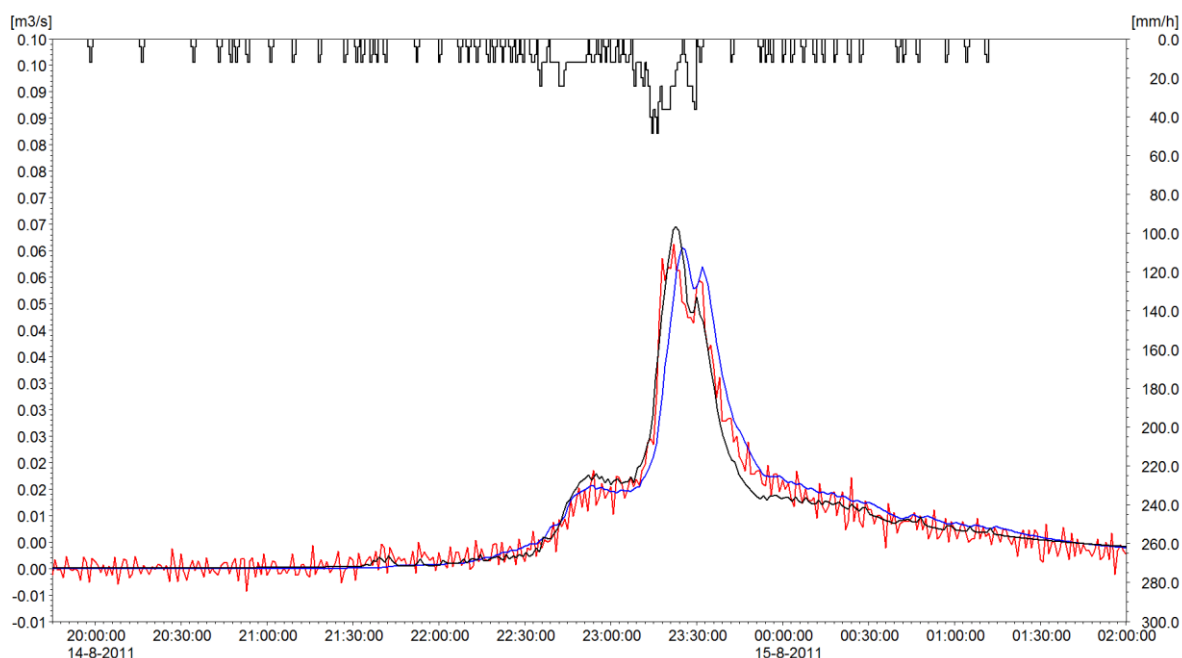
Figur B6. Modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 24/6 2012. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.

BILAGA C – SAMMANLAGD AVRINNING FRÅN TESTTAKEN

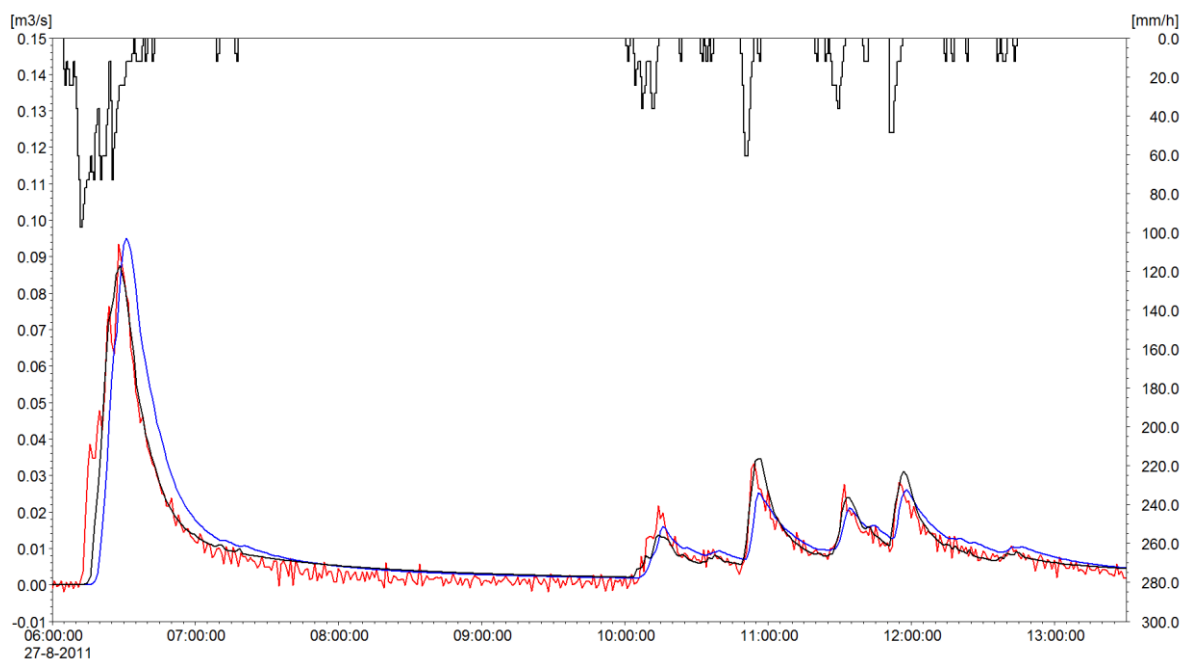
Nedan presenteras modellresultat för de nederbördshändelser som undersökts i kapitel 4.2.6, med en modell där samtliga testtak kopplats till samma utloppsnod.



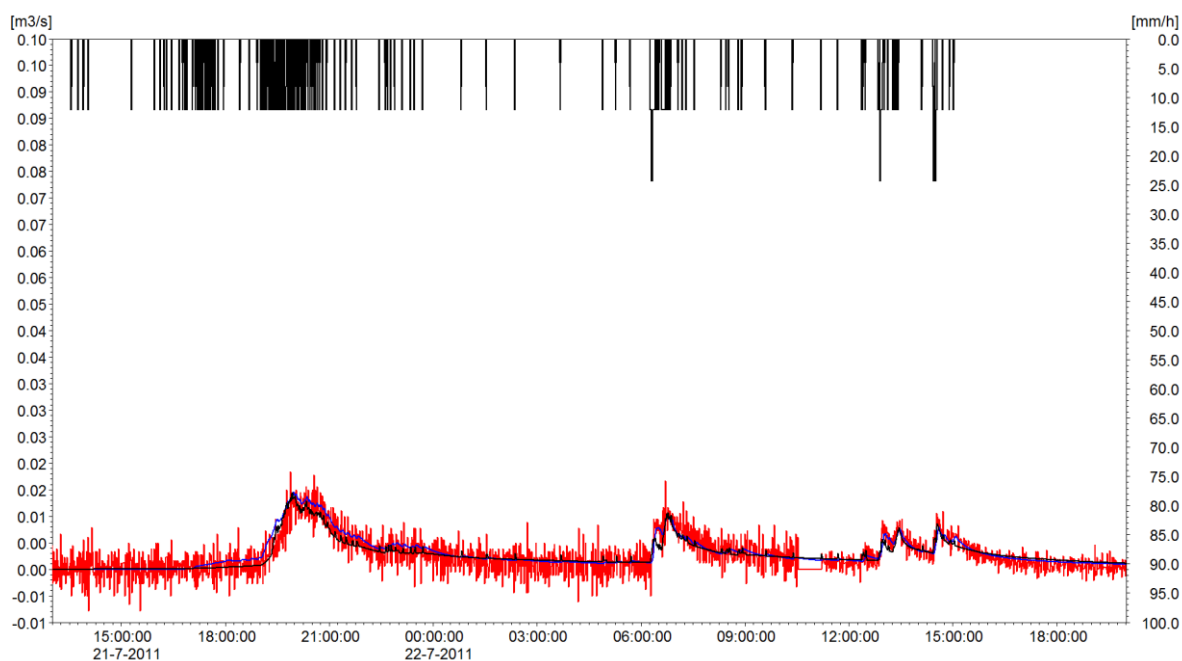
Figur C1. Total modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 2/7 2011. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.



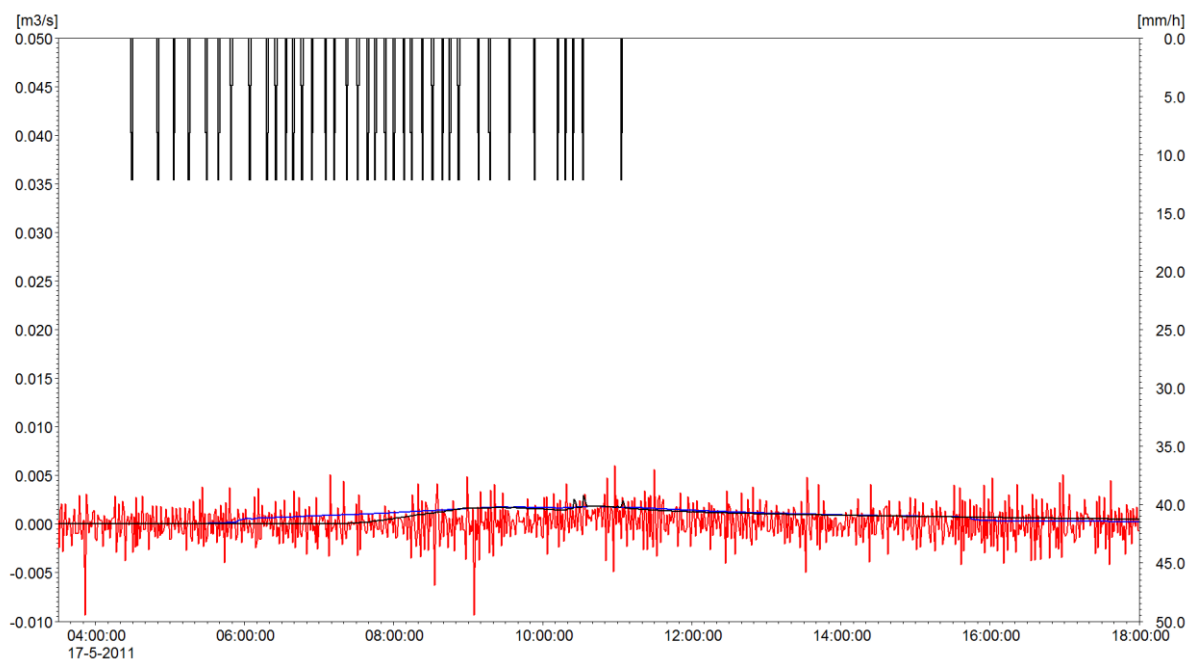
Figur C2. Total modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 14/8 2011. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.



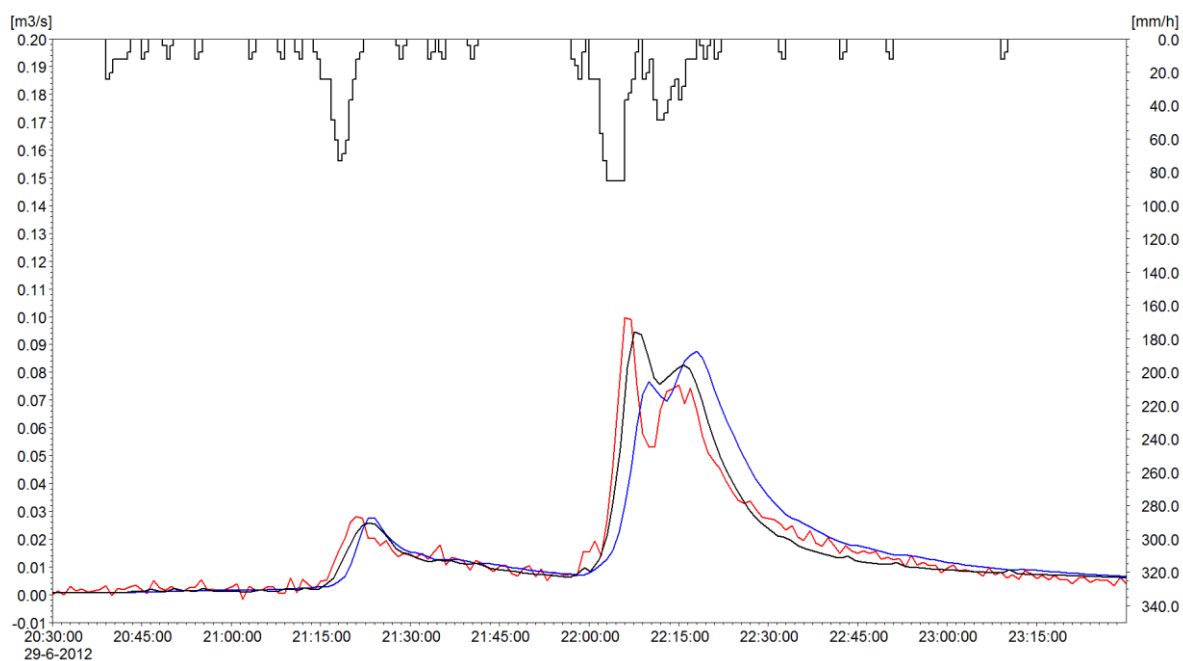
Figur C3. Total modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 27/8 2011. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.



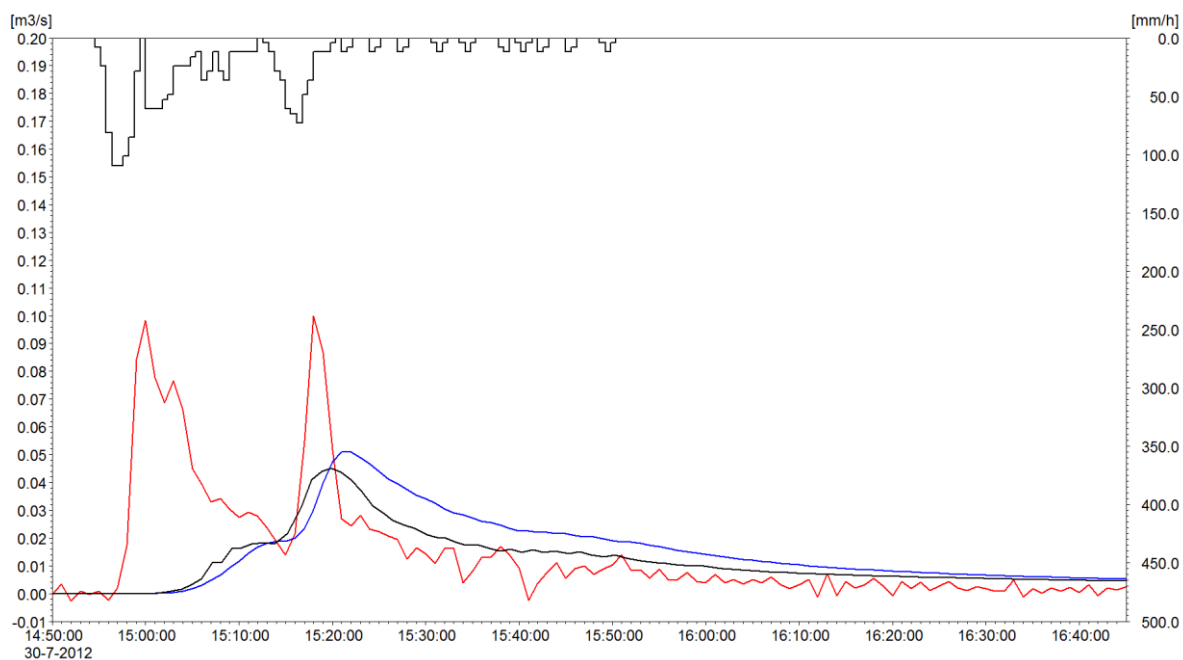
Figur C4. Total modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 22/7 2011. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.



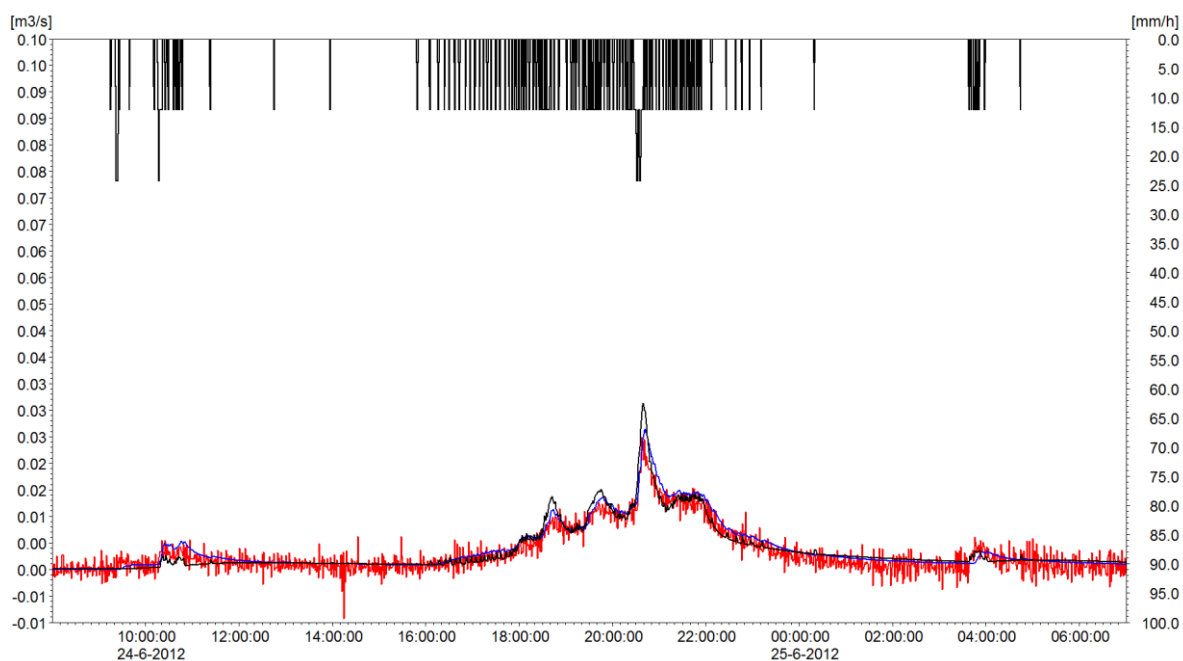
Figur C5. Total modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 17/5 2011. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.



Figur C6. Total modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 29/6 2012. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.



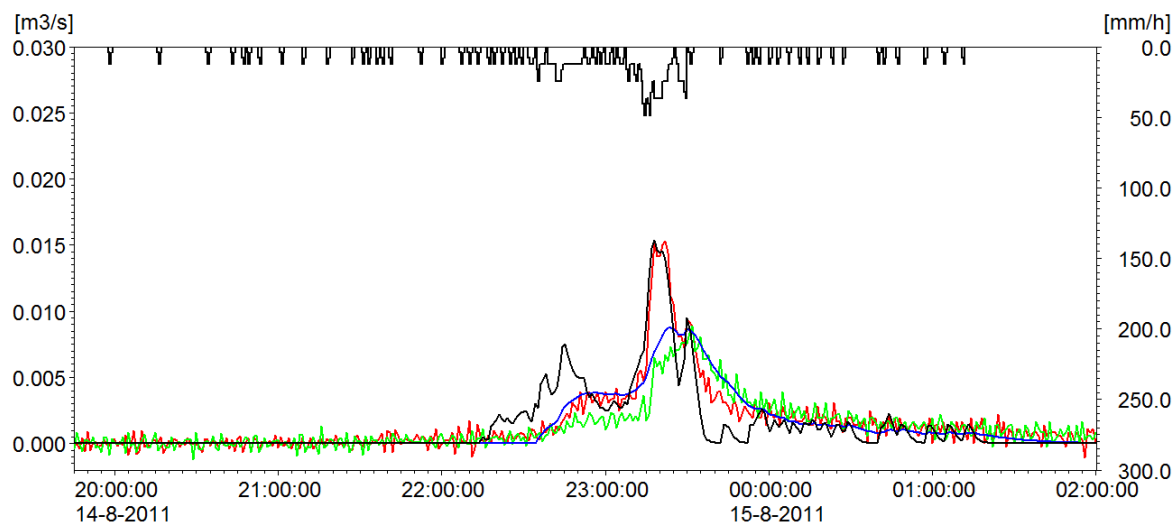
Figur C7. Total modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 30/7 2012. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.



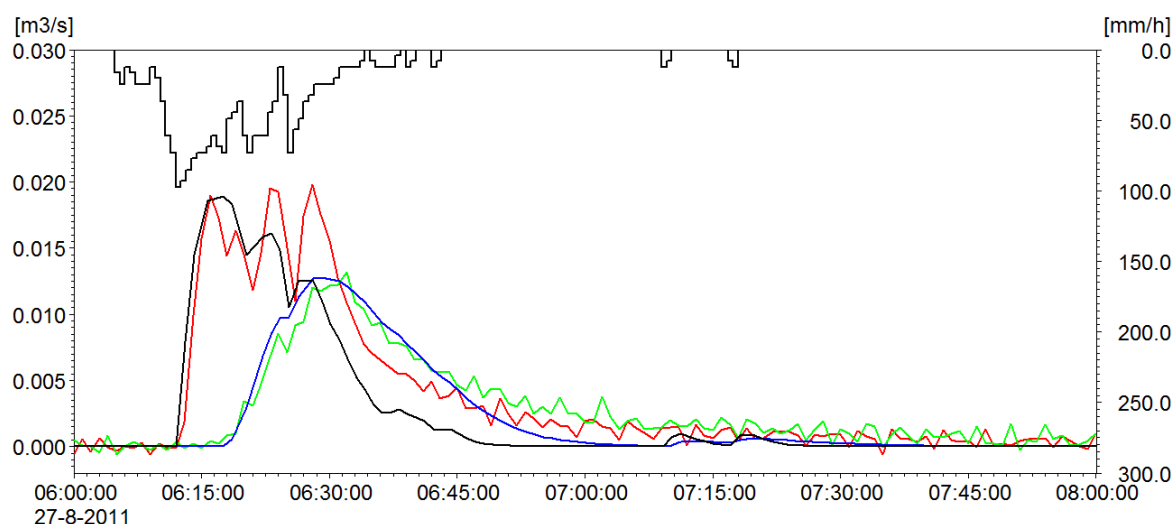
Figur C8. Total modellerad och observerad avrinning vid en nederbördshändelse den 24/6 2012. Den röda linjen visar uppmätt avrinning och den svarta respektive blå linjen visar modellerad avrinning i Mike Urban respektive SWMM. Den svarta linjen i diagrammets topp representerar nederbörden.

BILAGA D – AVRINNINGSKOEFFICIENTER FÖR TID-AREAMETODEN

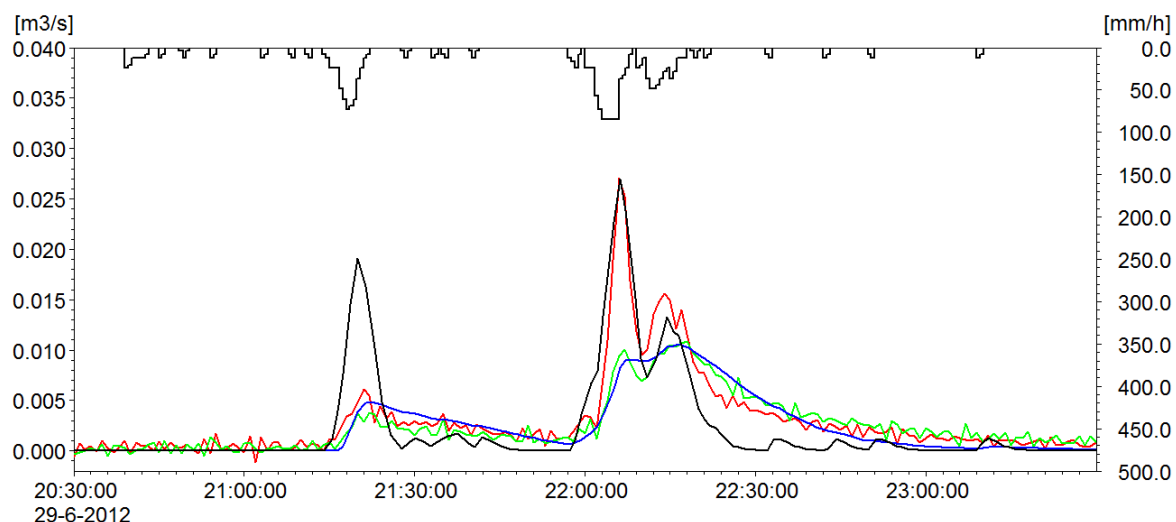
Nedan presenteras modellresultat för de nederbördshändelser som undersökts i kapitel 4.3, där en förenklad modellering utförts med tid-areametoden.



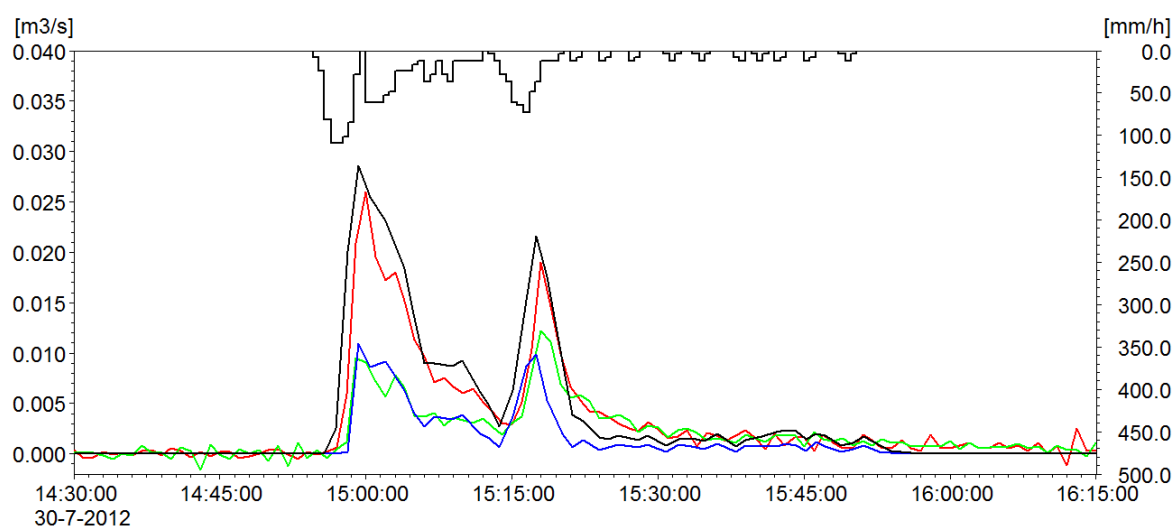
Figur D1. Avrinning beräknad med tid-areametoden för nederbördshändelsen den 14 augusti 2011. Den röda respektive svarta linjen visar observerad respektive modellerad avrinning för 4 cm moss-sedumtak. Den gröna respektive blå linjen visar observerad respektive modellerad avrinning för 11 cm sedum-ört-grästak. Nederbörden representeras av den svarta linjen i diagrammets topp.



Figur D2. Avrinning beräknad med tid-areametoden för nederbördshändelsen den 27 augusti 2011. Den röda respektive svarta linjen visar observerad respektive modellerad avrinning för 4 cm moss-sedumtak. Den gröna respektive blå linjen visar observerad respektive modellerad avrinning för 11 cm sedum-ört-grästak. Nederbörden representeras av den svarta linjen i diagrammets topp.



Figur D3. Avrinning beräknad med tid-areametoden för nederbördshändelsen den 29 juni 2012. Den röda respektive svarta linjen visar observerad respektive modellerad avrinning för 4 cm moss-sedumtak. Den gröna respektive blå linjen visar observerad respektive modellerad avrinning för 11 cm sedum-ört-grästak. Nederbörden representeras av den svarta linjen i diagrammets topp.



Figur D4. Avrinning beräknad med tid-areametoden för nederbördshändelsen den 30 juli 2011. Den röda respektive svarta linjen visar observerad respektive modellerad avrinning för 4 cm moss-sedumtak. Den gröna respektive blå linjen visar observerad respektive modellerad avrinning för 11 cm sedum-ört-grästak. Nederbörden representeras av den svarta linjen i diagrammets topp.