



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 24034

Examensarbete 30 hp

Juni 2024

Regnbelastningsanalys för effektiv dimensionering av dagvattenmagasin

Jonas Flensburg



Abstract

Designing stormwater systems and reservoirs correctly is important to prevent floods, pollution emissions, and unnecessary costs. This work has investigated different types of rainfall based on their impact on stormwater reservoirs, aiming to recommend which rainfall data should be used for designing reservoirs.

The work was conducted using the MIKE+ modelling tool, where models of stormwater systems were run with various rainfall data. Five models were used, including three existing models from Gustavsberg, Lund, and Malmö. The compared design rains were CDS rains and constant-intensity rains with a return period of ten years and varying durations. The models were also run with historical rainfall series from eight locations in Sweden. The focus was on the water levels of the reservoirs, flooding events, and critical durations.

The CDS rain with a duration of six hours gave the highest water levels in the reservoirs. The number of floods exceeded expectations, and rains that caused flooding in different reservoirs had different durations. Critical rainfall durations were identified for each reservoir, which represented the durations leading to the highest water levels in the reservoirs. A suggested key indicator was developed for each reservoir in an attempt to explain the variations in critical durations. The suggested key indicator was based on the reservoirs' reduced area and outflow. A certain correlation between the reservoir's critical durations and a suggested key indicator was observed and described by a trend curve, where higher values of the key indicator were associated with higher critical durations. The recommended design rain was the CDS rain with a duration of six hours if the critical duration for the reservoir was shorter than six hours. The trend curve presented in the study can be used to estimate the critical rainfall duration for a reservoir during the dimensioning process. Knowledge of the critical duration can then simplify the selection of the duration for the design storm, and it can also enhance the validation step in designing stormwater reservoirs.

Keywords: Critical rainfall duration, MIKE+, Stormwater modelling, Stormwater reservoirs

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten

Uppsala universitet, Utgivningsort Uppsala

Handledare: Hans Hammarlund Ämnesgranskare: Ekaterina Sokolova

Examinator: Antonio Segalini

REFERAT

Regnbelastningsanalys för effektiv dimensionering av dagvattenmagasin

Jonas Flensburg

Korrekt dimensionering av dagvattensystem och magasin är avgörande för att förhindra översvämningar, föroreningsutsläpp och onödiga kostnader. I detta arbete har olika typer av regn undersökts utifrån deras påverkan på dagvattenmagasin, med syfte att kunna rekommendera vilken regndata som bör användas vid dimensionering av dessa anläggningar.

Arbetet har genomförts med modelleringsverktyget MIKE+ där modeller av dagvattensystem har belastats med olika regndata. Fem modeller har använts, varav tre var befintliga modeller från Gustavsberg, Lund och Malmö. Typregnen som jämfördes var CDS-regn och blockregn med en återkomsttid på tio år och varierande varaktigheter. Modellerna belastades även med historiska regnserier från åtta mätstationer i Sverige. Fokus låg på magasinens vattennivåer, överbelastningar och kritiska regnvaraktigheter.

Resultaten visade att CDS-regn med sex timmars varaktighet gav de högsta vattennivåerna i magasinerna. Antalet överbelastningar översteg förväntningarna, och regn som översvämde olika magasin hade olika varaktigheter. Kritiska regnvaraktigheter identifierades för varje magasin vilket motsvarade den varaktighet som bidrog till högst vattennivåer i magasinerna. I arbetet togs även ett föreslaget nyckeltal fram för varje magasin i ett försök till att förklara variationerna i kritiska varaktigheter. Nyckeltalet baserades på magasinens reducerade area och strypflöde. En viss korrelation mellan magasinens kritiska varaktigheter och det föreslagna nyckeltalet konstaterades och beskrevs med en trendkurva. Förhållandet visade att höga nyckeltal för magasin gav högre kritiska varaktigheter. Det typregn som tillslut rekommenderades var CDS-regn med sex timmars varaktighet, under förutsättning att den kritiska varaktigheten för magasinerna är kortare än sex timmar. Med hjälp av trendkurvan som presenterades i arbetet kan den kritiska regnvaraktighet uppskattas för ett magasin som ska dimensioneras. Vetskap om den kritiska varaktigheten kan därefter underlätta valet av varaktighet för det typregn som är dimensionerande och det kan även underlätta valideringsteget vid dimensionering av dagvattenmagasin.

Nyckelord: Dagvattenmagasin, Dagvattenmodellering, Kritisk varaktighet, MIKE+

Institutionen för Geovetenskaper, Luft– vatten– och landskapslära, Uppsala universitet,
Geocentrum, Villavägen 16, 752 36 Uppsala, Sweden

FÖRORD

Genom det här examensarbetet avslutar jag mina studier inom civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet. Arbetet omfattar 30 högskolepoäng och har genomförts vid DHI Stockholm under handledning av Hans Hammarlund. Ekaterina Sokolova har varit ämnesgranskare och Antonio Segalini har varit examinator, båda arbetar vid Institutionen för geovetenskaper vid Uppsala universitet.

Jag vill rikta min tacksamhet till Hans Hammarlund för hans vägledning och stöd under arbetets gång, samt tacka alla medarbetare på DHI för den tid jag fått spendera där. Ett särskilt tack går också till Ekaterina Sokolova för värdefulla kommentarer och synpunkter. Slutligen vill jag tacka Värmdö kommun och VA SYD för deras bidrag med ledningsnätsmodeller till projektet.

Copyright © Jonas Flensburg, Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala universitet.

UPTEC W 24 034, ISSN 1401-5765

Digitalt publicerad i DiVA, 2024, genom institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet.

(<http://www.diva-portal.org/>)

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Regnbelastningsanalys för effektiv dimensionering av dagvattenmagasin

I stadsmiljöer består stora områden av hårdgjorda ytor som hustak och parkeringsplatser, och regnvatten som faller på dessa ytor kallas för dagvatten. Flöden med dagvatten måste hanteras för att förhindra översvämningar och utsläpp av föroreningar. En metod som kan tillämpas är att avleda dagvatten till magasin som fylls på om mer vatten rinner in än vad som rinner ut. Det här är ett exempel på ett tillvägagångssätt som används för att få stora vattenmängder att stanna upp vilket minskar risken för översvämningar nedanför magasinet.

Storleken på dagvattenmagasin kan bestämmas med hjälp av modelleringsverktyget MIKE+. I programmet skapas en förenklad bild av ett verkligt dagvattensystem med ledningsrör, brunnar, dammar, vägar och så vidare. Ett magasin kan då skapas i MIKE+ innan det byggs i verkligheten. Storleken på magasinet kan bestämmas genom att utsätta dagvattenmodellen för regn och därefter anpassa inställningarna upprepade gånger tills magasinets kapacitet är tillräcklig. Det finns olika typer av regn som kan användas och syftet med det här arbetet är att rekommendera vilket så kallat typregn som bör användas vid en sådan dimensionering.

Två typregn jämfördes och de kan ses som konstruerade regn. Det ena var ett blockregn där det föll lika mycket regn under hela regnets längd och det andra var ett CDS-regn där det regnade extremt mycket under en kort period och lite under resterande tid. Längden eller varaktigheterna på dessa två regn kunde variera. Hur mycket regn som kom under dessa regn bestämdes med hjälp av begreppet återkomsttid som beskriver ett tidsintervall mellan två ovanliga händelser. Ett regn med återkomsttiden tio år förväntas komma i genomsnitt en gång under tio år. Dagvattenmagasinen i modellerna var anpassade för att klara flödet från regn med återkomsttiden tio år och den återkomsttiden gällde för alla typregn. Modellerna utsattes även för historiska regn i syfte att se hur välanpassade de var för verkligheten.

Fem olika modeller användes och de hade totalt elva magasin. Tre dagvattenmodeller representerade områden i Gustavsberg, Lund och Malmö. Det som studerades i modellerna var magasinens högsta vattennivåer, antalet översvämningar och magasinens *kritiska regnvaraktigheter*. Kritiska regnvaraktigheter identifierades för varje magasin, vilket motsvarade den regnvaraktighet som bidrog till högst vattennivåer i magasinerna. Kritiska varaktigheter presenterades för att kunna se skillnader i hur olika magasin påverkades av olika regn. I arbetet togs även ett föreslaget nyckeltal fram för varje magasin i ett försök till att förklara variationerna i kritiska varaktigheter. Det föreslagna nyckeltalet baserades på den area som bidrog med dagvattenflöde till magasinet, andelen av regnvatten som bildade dagvatten samt maxkapaciteten i utflödet.

Resultaten visade att det typregn som gav högst vattennivå i samtliga magasin var ett CDS-regn med sex timmars varaktighet, det visade sig att antalet översvämningar var fler än förväntat och översvämningar inträffade vid olika regnvaraktigheter i olika magasin. De regn som översvämmade magasinerna undersöktes och en kritisk varaktighet presenterades för varje

magasin. Det fanns ett visst samband mellan magasinens kritiska varaktighet och det föreslagna nyckeltalet. Ett högt nyckeltal för ett magasin skulle enligt sambandet ge en hög kritisk varaktighet. Sambandet beskrevs med en trendkurva. Av de utvärderade typregnen var det CDS-regnet med sex timmars varaktighet som lyftes fram som det bästa alternativet vid dimensionering av dagvattenmagasinen, under förutsättning att den kritiska varaktigheten för magasinen är kortare än sex timmar. Med hjälp av trendkurvan som presenterades i arbetet kan den kritisk regnvaraktighet uppskattas för ett magasin som ska dimensioneras. Vetskap om den kritiska varaktigheten kan därefter underlätta valet av varaktighet för det typregn som ska användas och det kan även underlätta ett av de avslutande stegen vid dimensioneringen när magasinens kapacitet ska kontrolleras.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1 INLEDNING.....	3
2 MATERIAL OCH METODER	6
2.1 MODELLERINGSPROGRAMMET MIKE+	6
2.2 MODELLUPPBYGGNAD	6
2.3 BASMODELLEN	8
2.4 ANPASSADE MODELLER.....	9
2.4.1 Gustavsberg	10
2.4.2 Lund.....	12
2.4.3 Malmö.....	14
2.5 NEDERBÖRDSDATA	16
2.5.1 Blockregn.....	16
2.5.2 CDS-regn	17
2.5.3 Historiska regn från SMHI	18
2.5.4 Historiska regn från Lund och Malmö	19
2.6 ANALYS.....	20
2.6.1 Skillnad i vattennivå	20
2.6.2 Överbelastningar.....	20
2.6.3 Kritisk varaktighet	20
2.6.4 Samband mellan kritisk varaktighet och nyckeltal.....	22
3 RESULTAT	23
3.1 SKILLNAD I VATTENNIVÅ.....	23
3.2 ÖVERBELASTNINGAR	24
3.2.1 Sammanställning	24
3.2.2 Analys av regnhändelser.....	25
3.3 KRITISK VARAKTIGHET	27
3.4 SAMBAND MELLAN KRITISK VARAKTIGHET OCH NYCKELTAL	28
3.5 KOMPLETTERANDE RESULTAT OM KRITISK VARAKTIGHET	30
4 DISKUSSION.....	31
5 SLUTSATS.....	35
6 REFERENSER	36
APPENDIX A – LEDNINGSNÄT I PROFIL MED TRYCKLINJER.....	39
APPENDIX B – PROGRAMMERINGSKOD DATAHANTERING	46

APPENDIX C – ÅTERKOMSTTID FÖR REGN VID DEN KRITISKA VARAKTIGHETEN.....	52
APPENDIX D – SAMMANSTÄLLNING AV ANTALET ÖVERBELASTNINGAR.....	53
APPENDIX E – ANALYS AV REGNHÄNDELSER.....	54
APPENDIX F – SAMBAND MELLAN KRITISK VARAKTIGHET OCH NYCKELTAL	57
APPENDIX G – POÄNGSYSTEM FÖR KRITISK VARAKTIGHET	60

1 INLEDNING

I en allt mer urbaniserad värld är effektiv dagvattenhantering avgörande för att säkerställa samhällets hållbarhet och motståndskraft mot extremväder. Rätt dimensionering av dagvattenanläggningar och magasin är viktigt för att minska utsläpp av föroreningar, för att undvika onödiga kostnader och markanspråk, samt för att förhindra översvämningar.

I stadsmiljöer består områden till stor del av hårdgjorda ytor som tak, vägar och parkeringsplatser. Regn- och smältvatten i dessa områden rinner av ytorna snarare än att infiltrera i marken och benämns då som dagvatten. I urbana miljöer är det viktigt att skapa avrinningsvägar för dagvattenflöden för att undvika översvämningar vid exempelvis skyfall. Det finns dessutom en risk för att dagvatten innehåller ämnen som kan förorena recipienter och därför kan det behövas rening av dagvattnet (Aryal et al. 2010). Fördröjning av vattenmassor hindrar utsläpp av föroreningar till recipienter samt minskar flödesbelastningen på dagvattensystem (Svenskt Vatten 2016). Det här kan göras med fördröjningsmagasin där utloppet har en begränsad kapacitet vilket gör att vattenmassor stannar upp vid höga flöden (Larm & Blecken 2019). Fördröjningsanläggningar kan exempelvis utgöras av betongmagasin under jord eller torra dammar ovan jord som kan ha andra användningsområden vid torrväder, som lekplatser (Larm & Blecken 2019). Dagvatten fördröjs även genom så kallad trög avledning, vilket innebär att hanteringen sker lokalt. Förutsättningarna för infiltration eller lokal fördröjning är då goda (Svenskt Vatten 2016). Det är vanligt att kommuner ställer krav på att områden med nybyggnationer ska ha lokalt omhändertagande av dagvatten (Viklander et al. 2019).

Ledningar, dammar och utjämningsmagasin som är anpassade för att ta hand om dagvattenflöden dimensioneras utifrån olika regnvaraktigheter (Svenskt Vatten 2016; Watt & Marsalek 2013). Om vattenmassor ska avledas snabbt är korta och intensiva regnperioder av störst intresse, varaktigheten på ett sådant regn är från tio minuter till två timmar. Magasiner är däremot ett trögt förlopp och då beaktas regn med lägre intensitet och en längre varaktighet, då dessa ger högre volym än korta intensiva regn (Svenskt Vatten 2016; Watt & Marsalek 2013). Den varaktighet som bör användas vid dimensionering av flödesutjämning är den som ger maximala fördröjningsvolymen. Magasinsvolym bör därför beräknas för olika varaktigheter (Larm & Blecken 2019).

Storleken på olika regn kan beskrivas med begreppet återkomsttid som utgår från sannolikheten att en viss regnhändelse ska ske inom ett visst tidsspänn (Volpi et al. 2015; Svenskt Vatten 2016). Ett regn med en lång återkomsttid har exempelvis låg sannolikhet att inträffa. För att kunna bestämma återkomsttiden för ett visst regn undersöks historiska regnserier. Mätserier bör enligt Svenskt Vatten (2016) vara tio gånger längre än den valda återkomsttiden, då kan händelsen förväntas inträffa en gång i genomsnitt under varje återkomsttid. Vid jämförelse av olika regn är det viktigt att ha olika parametrar i åtanke, som regnvaraktighet, regnintensitet, nederbördsvolym, och återkomsttid. Regn med samma nederbördsvolym har exempelvis betydligt högre återkomsttid om varaktigheten är kort. Ett regn med volymen 30 mm som faller under 10 min klassas som ett 100-årsregn. Om samma volym skulle falla under 20 min skulle

det istället motsvara ett 50-årsregn. Det finns risk för att nederbörden förändras i framtiden till följd av klimatförändringar, dimensionerande regn kan därför multipliceras med en klimatkoefficient för att minska risken för underdimensionering av dagvattensystem (Svenskt Vatten 2016).

Dagvattensystem är för komplexa för att kunna kartläggas med mätinstrument och därför krävs andra metoder för att förstå hydrologiska system (Beven 2012). Verktyg som kan tillämpas är hydrologiska modelleringsverktyg där dagvattensystem kan dimensioneras, analyseras och simuleras med nederbörd och flöden. Modeller kan användas för att studera förändringar i systemet och är därför väldigt användbart för att testa olika teorier och framtidsscenario (Beven 2012). Valet av modelleringsprogram beror på vilken typ av problem användaren vill analysera men några exempel som används för urban dagvattenmodellering internationellt är MIKE+, HEC-HMS och SWMM (Rangari et al. 2015).

För att beräkna dagvattenavrinning med datormodeller måste regnintensitet över en viss tid finnas tillgänglig som indata (Rossman 2010; Svenskt Vatten 2011). Nederbördsdata kan antingen vara historiska regnserier eller typregn. Typregn har utvecklats för att med beräkningar kunna dimensionera eller analysera dagvatten- och avloppssystemens olika delar som ledningar och magasin. Typregn är oftast sammankopplade med en återkomsttid som kan hämtas från intensitets-varaktighetskurvor som ger medelintensitet för olika varaktigheter (Svenskt Vatten 2011). De två typregn som har använts och studerats i detta arbete var *blockregn* och *CDS-regn* (Chicago Design Storm).

Typregn och varaktighet är viktiga indata i avrinningsmodeller, och valet av dessa bör kunna motiveras väl eftersom de har stor påverkan på resultaten. Konceptet *kritisk varaktighet* är ett verktyg som kan underlätta beslutsprocessen vid val av typregn och varaktighet (Krvavica & Rubinić 2020). Kritisk varaktighet nämns främst i internationell litteratur och kallas då "critical storm duration" eller "critical rainfall duration". Konceptet kritisk varaktighet beskrivs som den varaktighet som skapar den största påfrestningen på ett ledningssystem, baserat på en specifik regnhändelse med en viss återkomsttid. Den kritiska varaktigheten tas fram genom att jämföra olika varaktigheter för den regnhändelse som undersöks och beräkna den maximala flödeshastigheten och avrinningsvolymen för dessa (CH2M HILL 2011). Den varaktighet som ger högst flödeshastighet klassas som den kritiska varaktigheten (Meynink & Cordery 1976). Enligt studier från Bezak et al. (2018) och Krvavica & Rubinić (2020) är det fördelaktigt att studera historisk regndata och tidigare översvämningar för att ta fram och verifiera den kritiska varaktigheten. Med hjälp av den kritiska varaktigheten kan valet av typregn och varaktighet underlättas vilket i sin tur möjliggör en mer detaljerad analys av bland annat översvämningens risker (Krvavica & Rubinić 2020). Konceptet kan vara ett bra verktyg för att kunna simulera effekter som förändrad markanvändning innebär för avrinningsprocesser (Kang et al. 2013).

Syftet med det här arbetet har varit att undersöka om något typregn kan anses vara bättre att använda vid dimensionering av dagvattenmagasin. Rätt val av typregn vid dimensionering ökar förutsättningarna för en effektiv dagvattenhantering som i sin tur minskar risken för

översvämningar. Det övergripande målet med arbetet har därmed varit att fastställa vilket typregn som bör användas vid dimensionering av dagvattenmagasin.

Frågeställningar:

1. *Vad är skillnaden mellan högsta vattennivån i dagvattenmagasin som dimensionerats med ett CDS-regn med sex timmars varaktighet jämfört med när de belastas med:*
 - a. *CDS-regn med varaktigheten två, tre och fyra timmar*
 - b. *Blockregn med varaktigheten två, tre, fyra och sex timmar*
2. *Hur ofta överbelastas modellerade dagvattenmagasin när de belastas med historiska regn?*
3. *Vad är magasinens kritiska regnvaraktigheter, baserat på:*
 - a. *Blockregn*
 - b. *Historisk regndata*
4. *Finns det samband mellan den kritiska regnvaraktigheten och parametrarna:*
 - a. *Avrinningsområdets area*
 - b. *Avrinningskoefficient*
 - c. *Kapaciteten i dagvattenmagasinens utflöde*
5. *Vilket CDS- eller blockregn bör användas vid dimensionering av dagvattenmagasin?*

Arbetet har avgränsats till att enbart omfatta de dagvattenmodeller och den nederbördsdata som använts. Magasinen som har undersökts har haft syftet att fördröja dagvattenflöden, därför har endast volymen studerats, utan hänsyn till design eller rening. Metoden i arbetet har varit densamma, oavsett om magasinerna var seriekopplade eller inte. Modellberäkningarna inkluderade inte ackumulering av snö eller snösmältning.

2 MATERIAL OCH METODER

I arbetet dimensionerades dagvattenmagasin i en *basmodell* och i tre *anpassade modeller*. Basmodellen byggdes från grunden utan anknytning till något befintligt dagvattensystem eller geografiskt område medan de tre anpassade modellerna var befintliga dagvattenmodeller som modifierades, dessa kom från Gustavsberg, Lund och Malmö. Det praktiska syftet med magasinerna var att skapa förutsättningar för ökad bebyggelse och avrinning utan att flödet av dagvatten nedströms skulle påverkas. Maximala flödet skulle inte vara större än det som rådde innan hårdgjorda ytor anlades på området. Kapaciteten på ledningsnäten motsvarade de krav som ställs för slutna ledningar i centrum- och affärsområden, vilket var en återkomsttid på tio år (Svenskt Vatten 2016). Dimensionerna anpassades med ett CDS-regn som hade sex timmars varaktighet, detta benämns som *referensregnet*. När modellerna belastades med olika regndata var det de maximala vattennivåerna i magasinerna som studerades.

Vilken återkomsttid ett historiskt regn bedöms ha beror på vilken varaktighet som studeras. I arbetet har återkomsttider för olika varaktigheter jämförts för att se om en del magasin kan vara mer känsliga för regn med vissa varaktigheter, så kallade *kritiska varaktigheter*. Dessa varaktigheter har därefter jämförts med avrinningsområdets area och avrinningskoefficient samt kapaciteten i magasinets utflöde för att undersöka om det fanns samband.

2.1 MODELLERINGSPROGRAMMET MIKE+

Beräkningar med hydrauliska modeller kan tillämpas för flera användningsområden, bland annat för kartläggning av översvänningsrisker, analys av ökade flöden eller dimensionering av ledningssystem (Blomquist et al. 2016; Nodine et al. 2024). I arbetet har MIKE+ använts och det är ett anpassningsbart program där distributionsnät och uppsamlingssystem för avloppsvatten och dagvatten kan modelleras (DHI 2024a). I MIKE+ kan ett ledningssystems påverkan av nederbörd visualiseras genom att sammankoppla ledningssystem med ytavrinningsmodellen *Time-Area*. I *Time-Area*-metoden styrs mängden avrinning av initial förlust, storleken på tillrinningsområdet och av en kontinuerlig hydrologisk förlust (DHI 2024b). För att långsamma flöden skulle inkluderas kunde den hydrologiska modellen *Time-Area + RDI* väljas (DHI 2024a). *Rainfall dependent infiltration* (RDI) är en parameter som beskriver långsamma flöden från exempelvis naturmark eller snösmältning (von Scherling et al. 2020a).

2.2 MODELLUPPBYGGNAD

I detta avsnitt beskrivs hur modellerna i programmet MIKE+ byggdes upp. Stegen för både basmodellen, som utvecklades från grunden, och de två anpassade modellerna från Gustavsberg och Malmö presenteras. Den tredje anpassade modellen från Lund var annorlunda och den beskrivs i Avsnitt 2.4.2. Innan uppbyggnaden inleddes behövde lämpliga platser väljas. I basmodellen kunde ledningar och magasin skapas på godtycklig plats. För de anpassade modellerna identifierades först områden med låg avrinning och obefintliga ledningsnät, som parkområden eller fält. Modelluppbyggnaden och dimensioneringen av ledningar och magasin

utgick till stor del från Svenskt Vatten Utvecklings rapport av Blomquist et al. (2016) där olika steg för en hydraulisk modelluppbyggnad presenteras.

Det första som lades till i modellerna var knytpunkter och brunnar som kallades för noder i programmet. Nodernas diameter var en meter men kunde i undantagsfall ändras till två meter i de anpassade modellerna om det begränsade flödet, vilket inte bedömdes påverka resultaten (Blomquist et al. 2016). Noder placerades tätt intill varandra på några platser och där var syftet att skapa en strypning av flödet som skulle ge en fördröjning. Mellan noderna skapades ledningar. En nod i varje delavrinningsområde avledde vatten till ledningssystemet. Nodernas djup från markytan var två meter från markytan. För de anpassade modellerna kunde djupet justeras för att ledningarnas lutning skulle vara tillräcklig för avledning av dagvatten. För att undvika energiförluster i noderna till följd av turbulens och friktionsförluster valdes beräkningsmetoden *Weighted Inlet Energy* som rekommenderas för vanliga brunnar (Blomquist et al. 2016).

Ledningarnas dimensioner togs fram med hjälp av Dahlströms formel och Colebrooks diagram. Dahlströms formel som presenteras i Ekvation 1 användes för att ta fram regnintensitet och den är rekommenderad för svenska förhållanden om inte lokal etablerad regnstatistik finns (Dahlström 2010). I ekvationen motsvarar R_{ij} intensiteten i l/s/ha, τ_i är återkomsttid i månader och Δt_j är varaktighet i minuter (Dahlström 2010). Ledningssystemet anpassades för att kunna klara regn med en återkomsttid på tio år och med en varaktighet på tio minuter vilket gav en regnintensitet på 228 l/s/ha. Varaktigheten tio minuter valdes för att det är viktigt att använda korta och intensiva regn vid dimensionering av ledningar eftersom dessa genererar de högsta flödena (Svenskt Vatten 2016).

$$R_{ij} \approx 190 \cdot \tau_i^{1/3} \cdot \frac{\ln(\Delta t_j)}{\Delta t_j^{0.98}} + 2 \quad (1)$$

Flödet erhöles genom att multiplicera regnintensiteten med avrinningsområdets area och avrinningskoefficienten 0,3, vilken är lämplig att använda för områden med villor (Svenskt Vatten 2004). Ett verktyg i Excel som byggde på principerna från Colebrooks diagram kunde sedan användas för att hitta en passande ledningsdimension för flöden. I Colebrooks diagram tas hänsyn till flöde, ledningars lutning, råhetstal och hastighet (Svenskt Vatten 2004). Råhetstalet motsvarar hur ojämn ledningens insida är och värdet som valdes var 0,2 mm vilket rekommenderas för plaströr av PE eller PVC (Svenskt Vatten 2004). Alla dimensioner som användes för ledningar var standarddimensioner: 225, 300, 400, 500, 600, 800 eller 1000 mm. Dimensionerna kunde justeras efter att modellen hade belastats med regndata. Djupet på alla noder justerades så att lutningen på samtliga ledningar blev minst 10 ‰. Valet av lutning baserades på Trafikverkets krav på bortledning av dagvatten från vägytor (Trafikverket 2005). Krav på minimilutningen för dagvattenledningar varierar beroende på dess diameter, den högsta minimilutningen var 7 ‰ och 10 ‰ innebar därför en säkerhetsmarginal. Om det finns problem med sättningar bör lutningen på vägtrummor inte understiga 10 ‰ (Trafikverket 2005). En lutning på 10 ‰ eller högre ansågs som lämpligt för att avleda dagvatten och för att

förhindra sättningar. Skillnaden i höjd mellan markytan och nodernas bottennivåer var oftast två meter men en del justeringar var nödvändiga i de anpassade modellerna för att ledningarnas lutning skulle vara tillräcklig. Ledningarnas lutningar finns presenterade i figurer som visar deras profil, se Figur A1–13 i Appendix A.

I nästa steg krävdes indata i modellen i form av ett typregn. Ett CDS-regn med sex timmars varaktighet och återkomsttiden tio år valdes som dimensionerande regn och detta benämns som *referensregnet*. Sex timmars varaktighet är vad som är vanligast vid skyfallskartering enligt Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (2017). Arnell (1991) rekommenderar istället fyra timmars varaktighet vid dimensionering. Sex timmar valdes för att fler varaktigheter av blockregn, som resulterade i de högsta vattennivåerna, skulle kunna inkluderas i den totala varaktigheten för CDS-regnet. Dagvattenmodellerna anpassades inte för framtida klimatförändringar eftersom de belastades med historiska nederbördsdata.

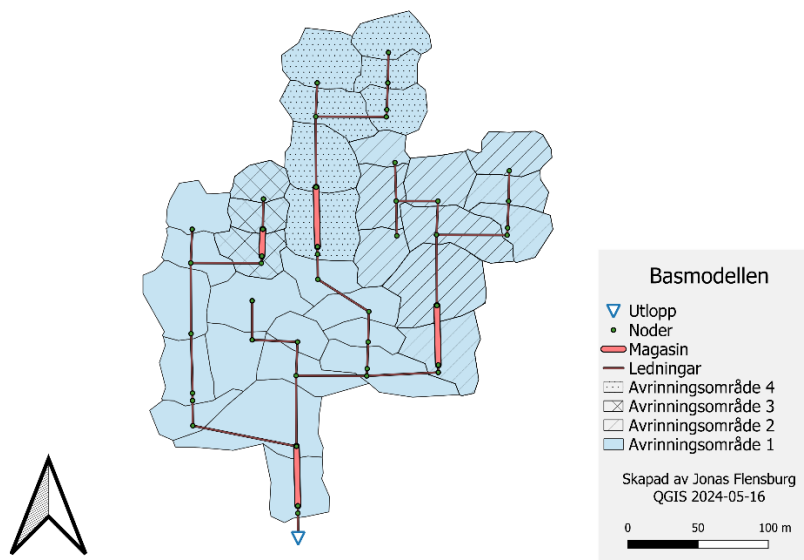
När ledningarnas dimensioner hade ställts in skapades strypningsledningarna och magasin för att dagvatten skulle kunna fördröjas vid höga flöden. För att ta fram strypningarnas begränsningar belastades modellerna med referensregnet. Strypningarnas begränsningar berodde på vilken initial avrinningskoefficient som området hade innan hårdgjorda ytor anlades i modellen. Maximala flödet i strypningsledningen ställdes in som dess maxkapacitet. Därefter anlades hårdgjorda ytor genom att öka avrinningskoefficienten. När avrinningen ökade behövde mer vatten passera genom ledningarna då modellen belastades med referensregnet. Magasin placerades ovanför strypningsledningarna för att kunna fördröja detta vatten och behålla ett lågt utflöde. Magasinen var slutna och utgjordes av ledningar med rektangulär form där höjd och bredd kunde justeras. När strypningen hade skapats ökades avrinningskoefficienten och modellen belastades återigen med referensregnet. Avrinningen ökade då betydligt och magasinets dimensioner anpassades så att volymen var tillräcklig för att fördröja vattnet som inte direkt kunde passera strypningen. När dimensionerna på ledningar och magasin var anpassade för att klara belastningen från referensregnet var modellen klar och kunde då testas med andra regnserier.

Den hydrologiska modellen som valdes i programmet var *Time-Area + RDI*. Reduktionsfaktor är en parameter som anger förluster som orsakas av exempelvis avdunstning eller markgenomträngning (DHI 2024b). Reduktionsfaktorn som användes i modellerna ändrades från 0,9 till 1,0 vilket innebar noll förluster. I övrigt användes programmets default-parametrar.

2.3 BASMODELLEN

I arbetet har modeller över dagvattensystem tagits fram i programmet MIKE+. I första hand har en basmodell byggts upp från grunden utan anknytning till något befintligt dagvattensystem eller geografiskt område. Syftet med den grundläggande basmodellen var att kunna göra snabba simuleringar och på så vis kunna samla mer resultat. Det som skiljde basmodellen från de anpassade modellerna var främst att inga anpassningar behövde göras till verkligheten, som höjdkurvor, vägar, ledningar och avrinningsområden. I övrigt var de olika modellerna principiellt lika.

För basmodellen var lutningen för samtliga ledningar och magasin 10 ‰, djupet för alla noder var två meter, koncentrationstiden var sju minuter i alla simuleringar och reduktionsfaktorn var 1. Modellens totala avrinningsområde var 5,6 hektar och utgjordes av 35 mindre områden. Initiala avrinningskoefficienten var 0,05 i basmodellen och den ändrades till 0,3 efter att strypflödet hade lagts till i modellen. Basmodellen studerades i två olika fall. I första fallet som benämns *basmodell B* hade ledningsnätet endast ett magasin som kallas B1. I *basmodell C* hade ledningsnätet fyra magasin som delvis var seriekopplade, dessa var C1–4. Magasin B1 och C1 var placerade på samma plats, längst ner i avrinningsområde 1, medan magasin C2 låg längst ner i avrinningsområde 2, och så vidare. Basmodellen presenteras i Figur 1.



Figur 1. Illustration av basmodellen. I *basmodell B* används endast magasinet närmast utloppet som är anslutet till avrinningsområde 1. I *basmodell C* används alla fyra magasin.

Eftersom det fanns flödesutjämning uppströms i systemet i *basmodell C* var dimensionerna för magasin C1 mindre än motsvarande magasin B1 i *basmodell B*. Detaljer om magasinerna och deras avrinningsområden presenteras i Tabell 1. Magasinets strypflöde motsvarar maxkapaciteten i utloppet.

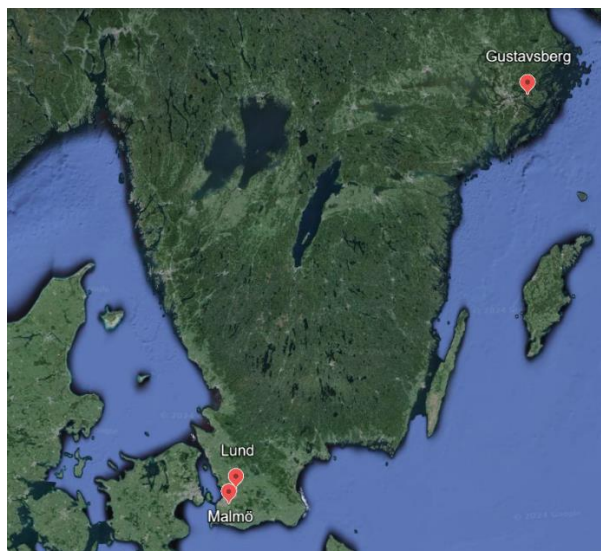
Tabell 1. Sammanställning av information om magasinerna och dess avrinningsområden för basmodellen.

Magasin	Avrinningsområde area [ha]	Avrinningskoeff. ϕ	Volym [m ³]	Strypflöde [m ³ /s]
B1	5,6	0,3	253	0,049
C1	5,6	0,3	106	0,049
C2	1,7	0,3	68,1	0,016
C3	0,3	0,3	10,7	0,004
C4	1,2	0,3	49,1	0,012

2.4 ANPASSADE MODELLER

Efter att basmodellen hade studerats övergick arbetet till att studera delområden av färdigbyggda modeller över befintliga dagvattensystem från Gustavsberg, Lund och Malmö

(Figur 2). Dessa kallades för *anpassade modeller* och de tillhandahölls av Värmdö kommun och VA-organisationen VA SYD.



Figur 2. Karta över södra Sverige där platserna för de anpassade modellerna har markerats (Google Earth).

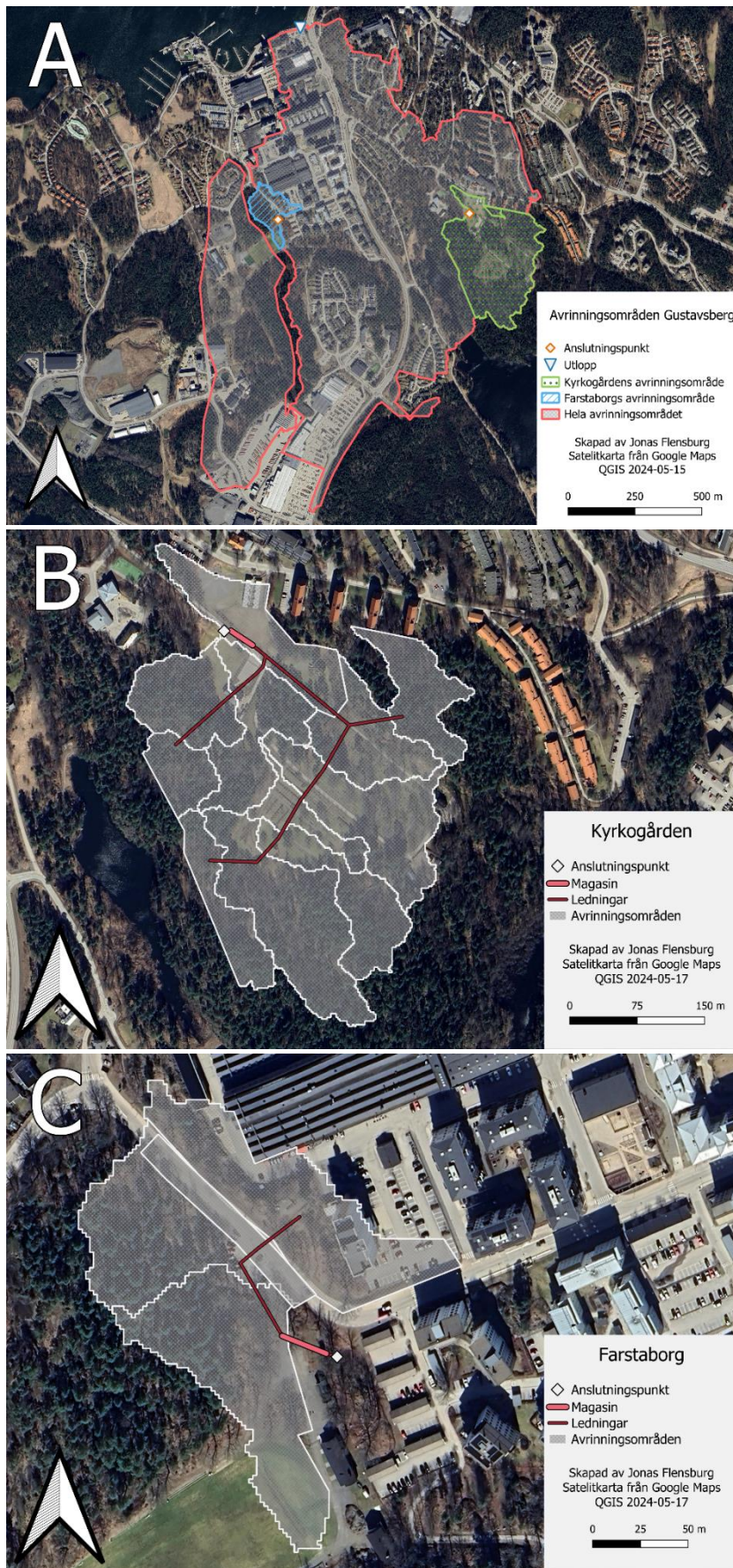
Varje modell hade två magasin som studerades och detaljer om dessa och deras avrinningsområden presenteras i Tabell 2, de beskrivs ytterligare i Avsnitt 2.3.1–2.3.3.

Tabell 2. Sammanställning av information om magasinerna och dess avrinningsområden för de anpassade modellerna.

Modell	Magasin	Avrinningsområde area [ha]	Avrinningskoeff. ϕ	Volym [m ³]	Strypflöde [m ³ /s]
Gustavsberg	Kyrkogården	11,4	0,30	6570	158,1
	Farstaborg	2,1	0,34	1070	13,4
Lund	Pölen	12,1	0,51	822	23,5
	Sjön	42,0	0,51	11 300	267,5
Malmö	Observatoriet	6,8	0,30	659	230,2
	Oxievång	26,2	0,30	2070	17,9

2.4.1 Gustavsberg

Två nya ledningsnät byggdes upp i en befintlig modell över ett dagvattensystem i Gustavsberg i Värmdö kommun (Figur 3A). Det ena ledningsnätet som byggdes var beläget vid Gustavsbergs kyrkogård och i arbetet benämns detta ledningsnät som Kyrkogården (Figur 3B). Ett annat ledningsnät skapades i ett område vid Farstaborgs idrottsplats som benämns som Farstaborg (Figur 3C). De nya ledningsnäten skapades i områden som var obebyggda med låg avrinning och som saknade befintligt ledningsnät. Det stora dagvattensystemets utlopp låg vid Gustavsbergs hamn och totala avrinningsområdet var 139 hektar stort. De nya ledningssystemen anslöts till det befintliga dagvattensystemet.



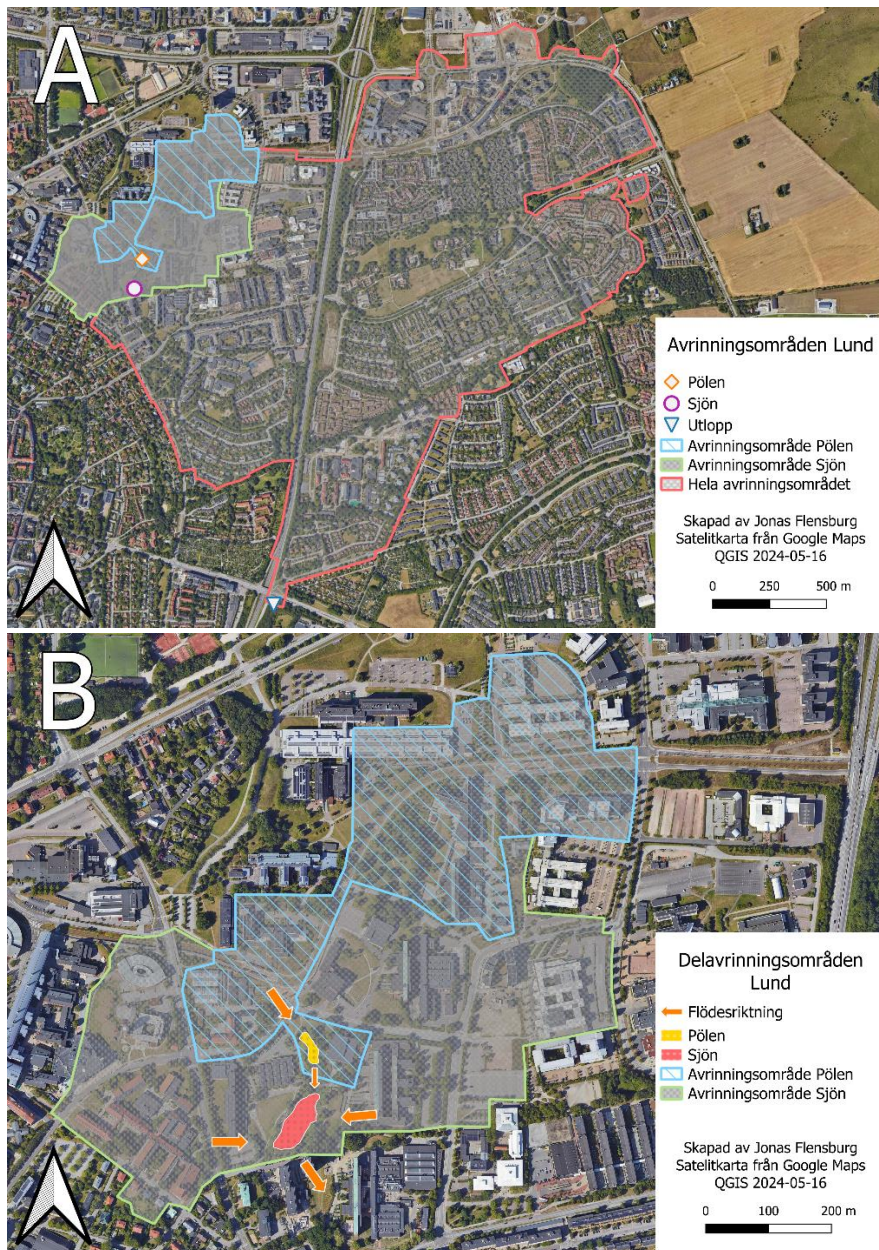
Figur 3. (A) Avrinningsområde för hela Gustavsbergsmodellen. (B) Delavrinningsområde och ledningar för Kyrkogården. (C) Delavrinningsområde och ledningar för Farstaborg.

Avrinningen från området Kyrkogården innan anläggning av hårdgjorda ytor var väldigt låg till följd av en koncentrationstid på fyra dygn. Det ledde till att strypningens flöde blev väldigt låg och magasinet kunde inte tömmas. Denna initiala koncentrationstid justerades för att avrinning skulle kunna simuleras i modellen. För att ta fram koncentrationstiden för varje avrinningsområde mättes en så rak sträcka som möjligt från den nod som avledde vatten från området till den punkt som låg längst bort. Sträckan dividerades med en generell vattenhastighet för mark på 0,1 m/s för att få en rinntid (Svenskt Vatten 2004). En korrektionsfaktor på 1,5 användes eftersom vattnet i verkligheten inte rinner den raka sträckan som mättes upp. I modellen var reduktionsfaktorn inställd till 0,5. När avrinningskoefficienten ändrades för att efterlikna anläggning av hårdgjorda ytor ändrades koncentrationstiden och reduktionsfaktorn till 7 min respektive 1.

Vid anslutningspunkten till det befintliga ledningssystemet för Kyrkogården kunde inte vatten rinna undan och vattennivån låg högre än ledningarnas överkant. Anledningen var att en del ledningar nedströms hade motlut och systemet fick då ett bakfall så att vatten låg kvar i ledningarna. Modellen över Gustavsberg modifierades och djupet på noder justerades för att ledningarnas lutning skulle göra det möjligt för vattnet att rinna mot utloppet.

2.4.2 Lund

I modellen över Lund undersöktes vattennivåer i befintliga öppna dagvattendammar medan det skapades nya ledningsnät med slutna magasin i övriga modeller. I modellen studerades två dammar, Pölen och Sjön, som var belägna vid Lunds universitet. Dessa var delvis seriekopplade då Pölen låg i Sjöns avrinningsområde (Figur 4). I Lundmodellen bestod dammarnas avrinningsområden av en stor del hårdgjorda ytor och avrinningskoefficienten motsvarade ett tätbebyggt område med flerfamiljshus eller radhus (Tabell 2). I övriga modeller var avrinningen lägre och motsvarade ett område med fristående villor (Svenskt Vatten 2004). Totala avrinningsområdet för hela ledningssystemet var 338,1 hektar, se Figur 4A. I Figur 4B visas dammarna Pölen och Sjön, samt riktningen för vattenflödet in och ut.



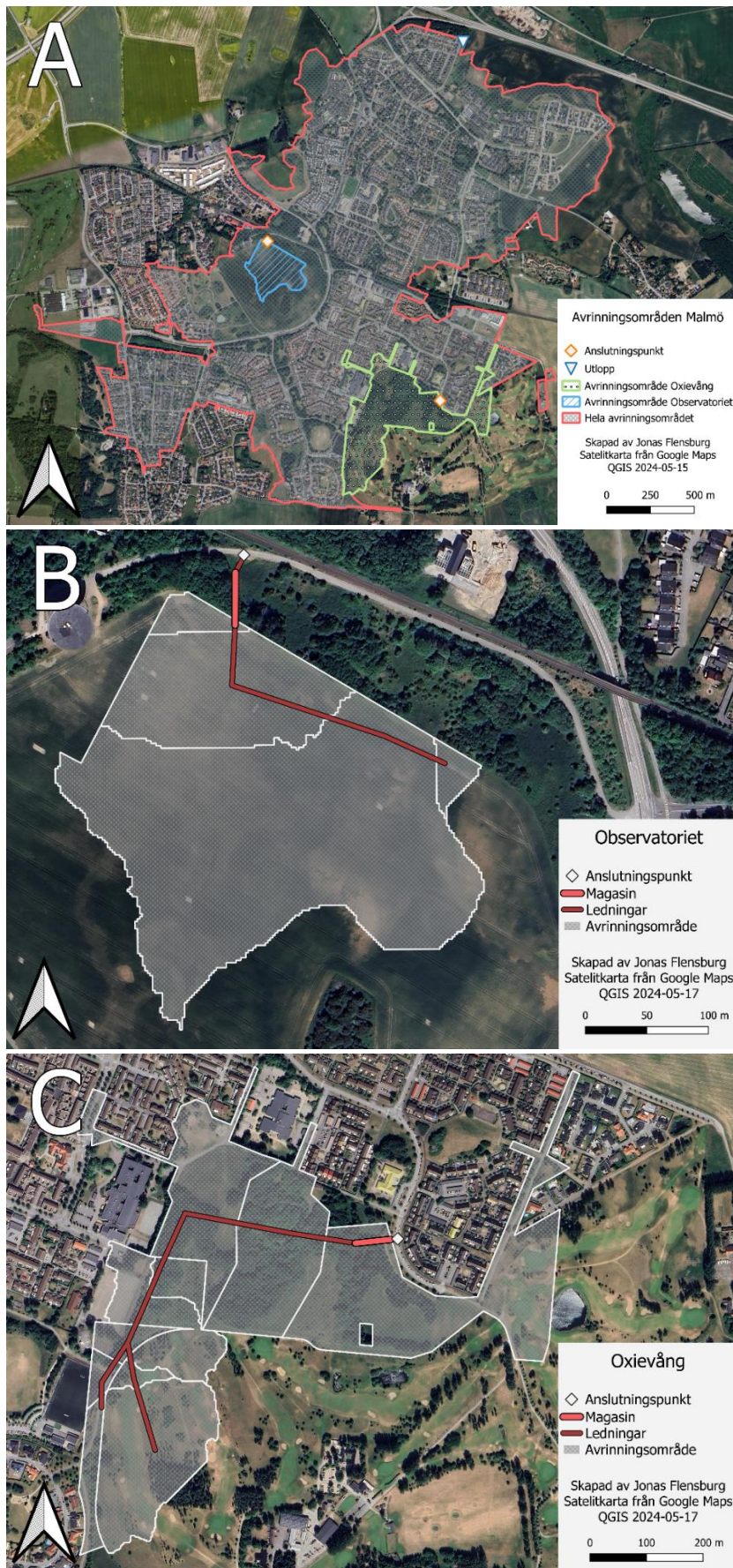
Figur 4. (A) Avrinningsområde för hela Lundmodellen. (B) Delavrinningsområden, in- och utlopp för dagvattendammarna Pölen och Sjön. Ledningsnät visas inte på grund av sekretess.

Uppbyggnaden av modellen i Lund skiljde sig från basmodellen och de övriga anpassade modellerna. Dammarna var öppna och bestod inte av rektangulära ledningar utan av noder med inställningen *basin*. En lägsta vattennivå ställdes in för de öppna dammarna i modellen. Utflödet från dammen Pölen kunde justeras med ett valv och öppningen justerades om flödet skulle begränsas. Något som var unikt för dammen Pölen var att den hade flera utlopp. Ett konstant flöde kunde rinna genom en ledning vid namn *rännan*. Det fanns dessutom ett överfall som ledde vatten till ett erosionskänsligt dike vid höga flöden. Det tredje utloppet var en bottenledning som kunde öppnas om erosionsrisken i diket blev för stor. Maxflödet i dammen Pölen var det sammanlagda flödet från dessa tre utlopp då modellen belastades med referensregnet.

För att resultat från Lund-modellen skulle kunna vara jämförbara med de från övriga modeller behövde dammarnas kapacitet anpassas utifrån referensregnet. För att referensregnet skulle fylla upp dammarna behövde modellen modifieras, det gjordes bland annat genom att inaktivera vissa ledningar för att öka inflödet och genom att sänka nodens marknivå så att dammens djup minskade.

2.4.3 Malmö

I en modell över Malmö skapades två nya ledningsnät med varsitt magasin. Två platser valdes ut där inga befintliga ledningsnät fanns och där avrinningen var låg. Den ena platsen var på ett fält och där låg det nya ledningsnätets anslutningspunkt till det befintliga ledningsnätet vid Observatorievägen, därför kallas detta ledningsnät och magasin för Observatoriet (Figur 5B). Den andra platsen som valdes var i en park och på en anslutande golfbana och anslutningspunkten låg då längs Oxievångsvägen, därmed benämndes detta ledningsnät och magasin som Oxievång (Figur 5C). Hela ledningsnätet täckte ett avrinningsområde som var 403,9 hektar (Figur 5A).



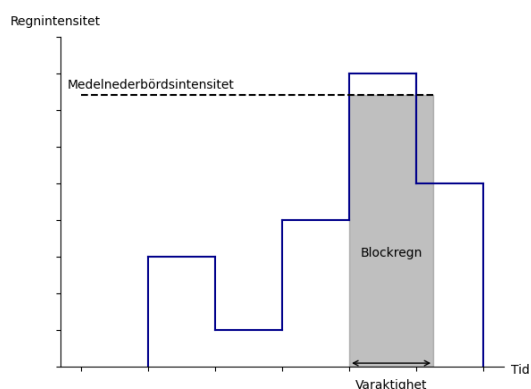
Figur 5. (A) Avrinningsområde för hela Malmömodellen. (B) Delavrinningsområde och ledningar för Observatoriet. (C) Delavrinningsområde och ledningar för Oxievång.

2.5 NEDERBÖRDSDATA

I arbetet har modellerade dagvattensystem belastats med olika CDS-regn, blockregn och uppmätta regnserier från åtta olika orter. Varaktigheter för de CDS- och blockregn som användes varierade men återkomsttiden var alltid tio år. De olika regnen bidrog till varierande vattennivåer i modellernas magasin och dessa har jämförts mellan de olika simuleringarna. Utgångspunkten i jämförelsen har varit den maxnivå som ett CDS-regn med sex timmars varaktighet skapade i modellernas magasin, även benämnt som *referensregnet*. Systemets ledningar och magasin anpassades för att klara denna regnbelastning. När ledningsnätet hade rätt dimensioner belastades modellen med annan regndata och därefter kunde vattennivåer i magasinen utvärderas. Basmodellen hade kort beräkningstid, cirka en timme per historisk regnserie, och därför kunde den belastas med data från åtta mätstationer. De anpassade modellerna hade däremot längre beräkningstider, cirka 24 timmar, när de belastades med historisk regndata. De anpassade modellerna belastades enbart med en mätserie var som kom från närområdet och dessa simuleringar delades upp för att undvika för stora resultatfiler. Resultatfilerna innehöll magasinens vattennivåer för varje minut av den period som simulerades. Den dator som användes för simuleringarna hade en sexkärnig processor, vilket möjliggjorde parallellisering under körningar i MIKE+.

2.5.1 Blockregn

Blockregn är ett typregn som utgår från medelintensiteten hos flera uppmätta regn under en specifik varaktighet. Om blockregn med två timmars varaktighet är av intresse hämtas medelintensiteten från de två timmar av regnen som hade högst intensitet, konceptet visualiseras i Figur 6. Ett blockregn har en konstant nederbördsintensitet över hela den varaktighet som väljs. Intensiteten tas fram från intensitets-varaktighetskurvor (Svenskt Vatten 2011).



Figur 6. Konceptet med blockregn där blockregnets intensitet är ett maximalt medelvärde för en varaktighet.

Blockregnen som användes i arbetet hade återkomsttiden tio år men varaktigheten varierade. För att blockregn med olika varaktigheter skulle ha samma återkomsttid behövde regnintensiteten vara högre för korta tidsserier, de aktuella intensiteterna presenteras i Tabell 3. För blockregn är regnintensiteten konstant under regnets varaktighet. Beräkningstiden var kortare än 30 sekunder när de olika modellerna belastades med blockregn.

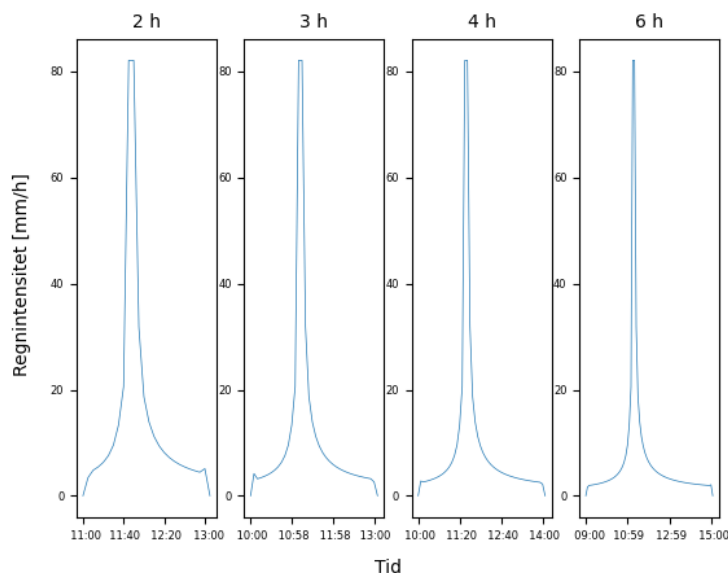
Tabell 3. Konstanta regnintensiteter för blockregn med återkomsttiden tio år och varierande varaktigheter.

Varaktighet [h]	Intensitet [mm/h]
2	15,5
3	11,5
4	9,3
6	6,9

2.5.2 CDS-regn

Ett annat vanligt typregn som används är så kallade Chicago Design Storms som oftast benämns som CDS (Svenskt Vatten 2011). Intensiteten hos ett CDS-regn varierar under dess varaktighet till skillnad från blockregnet som har en konstant intensitet. CDS-regnet är uppbyggt av flera blockregn med varierande intensitet. Den timme som är mest intensiv i CDS-regnet har samma medelintensitet som ett blockregn med en timmes varaktighet hade haft för samma återkomsttid, samma princip gäller för alla tidsintervall i regnet. Det gör att ett CDS-regn innehåller alla blockregn med en lägre varaktighet, förutsatt att återkomsttiden är densamma. På så sätt kan flera varaktigheter simuleras med enbart ett CDS-regn. CDS-regn har en tydlig topp där en stor del av regnets volym faller (Figur 7). CDS-regn är praktiska att använda vid dimensionering av utjämningsmagasin då valet av varaktighet inte är av lika stor vikt. Den dimensionerande varaktigheten som är magasinets värsta scenario kommer vara inkluderad i resultatet eftersom regnet innehåller alla blockregnsvaraktigheter om de är kortare än CDS-regnets totala varaktighet (Svenskt Vatten 2011).

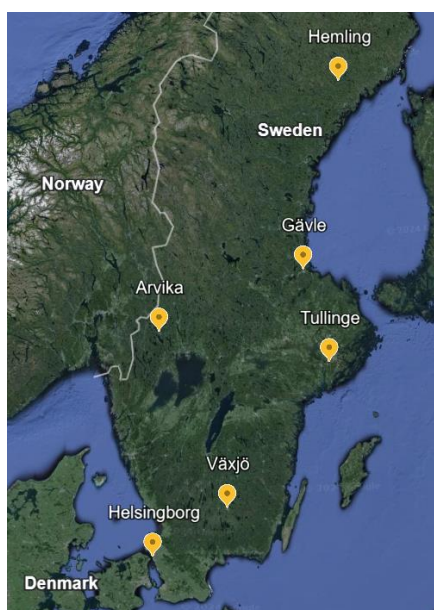
Referensregnet som var ett CDS-regn med sex timmars varaktighet användes för att dimensionera ledningarna och magasinerna i varje modell. Övriga CDS-regn som användes hade varaktigheterna två, tre eller fyra timmar och nederbördsintensiteten varierade, se Figur 7. Samtliga CDS-regn hade återkomsttiden tio år. Dagvattensystemen hade alltså en kapacitet för att klara belastningen av ett tioårsregn med sex timmars varaktighet. Maximala vattennivåer i modellernas magasin noterades för det dimensionerande referensregnet. Dessa värden användes som utgångspunkt för jämförelsen då resultaten analyserades. När de olika modellerna belastades med CDS-regn var beräkningstiden i MIKE+ kortare än 30 sekunder.



Figur 7. Regnintensitet för CDS-regn med återkomsttiden tio år och varierande varaktigheter.

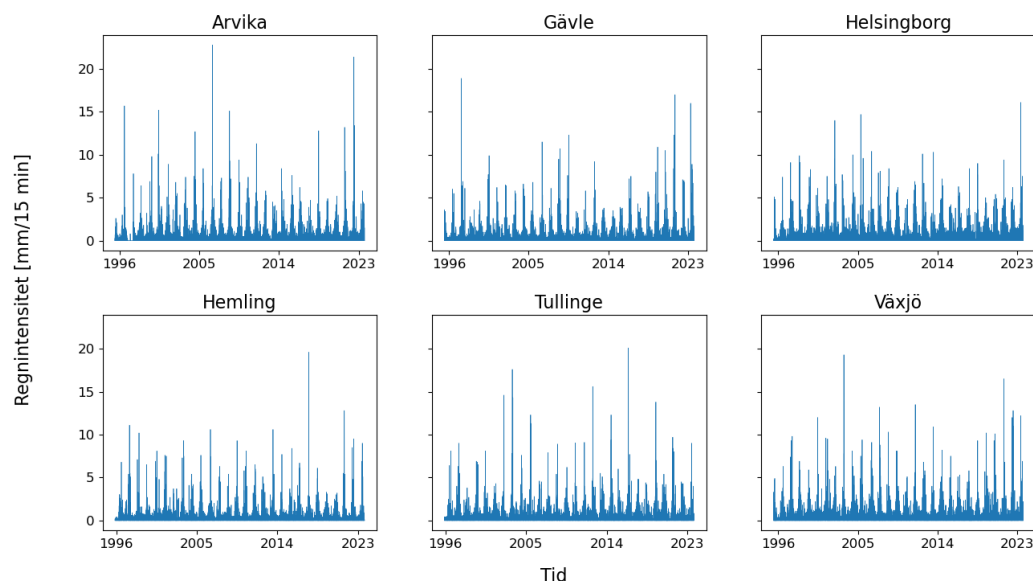
2.5.3 Historiska regn från SMHI

I arbetet har uppmätt nederbördsdata hämtats från sex av SMHI:s mätstationer i Sverige (Figur 8). Platserna valdes för att få en representation från olika delar av landet, inklusive inlandet och kustområdena samt olika väderstreck. Tullinges mätstation valdes för att den låg närmast modellområdet i Gustavsberg. Kraven för att mätstationerna skulle väljas var att de sedan 1995 skulle ha uppmätt nederbörd var 15:e minut. Mätningarna har utförts med hjälp av vägande mätare (SMHI 2024). Nederbördsdata hämtades från SMHI:s hemsida (<https://www.smhi.se/data>).



Figur 8. Karta där gula markeringar representerar de orter som SMHI:s regndata har hämtats från (Google Earth).

Uppmätt data användes för att kunna se hur nederbörd från den senaste 30-årsperioden påverkade magasinen i modellerna. Historiska regnserier har alltså inte presenterats som den regndata som bör användas vid dimensionering av dagvattenmagasin. Variationen i nederbörd är stor mellan olika år och olika orter, se Figur 9.



Figur 9. Regnintensitetsdata från SMHI, samlad från olika mätstationer under perioden 1995 till 2023.

Beräkningstiden i modellerna berodde på deras komplexitet. För basmodellen tog det ungefär en timme om en simulering kördes med en av dessa 28-åriga regnserier. För Gustavsbergsmodellen som belastades med data från Tullinge var beräkningstiden cirka 22 timmar totalt.

2.5.4 Historiska regn från Lund och Malmö

Uppmätt nederbördsdata som användes i modellerna över Lund och Malmö kom inte från SMHI utan tillhandahölls av VA-organisationen VA SYD. Mätserien från Lund var 23 år medan mätserien från Malmö var 45 år. Nederbördsdata från Lund kom från mätstationen Norra Verket TS. Regndata från Malmö var sammansatta regnserier. Från januari 1979 till april 1980 samlades data in av SMHI. Därefter användes data från mätstationen Augustenborg i centrala Malmö samt från mätstationen vid Turbinens pumpstation på grund av driftstörningar vid Augustenborg. Mätningar i Lund och Malmö utfördes med vippmätare där tider registrerades när en specifik volym av nederbörd hade fallit i en hink vilket skiljde sig från regnserier från SMHI där nederbörd istället mättes var femtonde minut under hela mätserien (Svenskt Vatten 2011). Trots att denna data var insamlad med en annan mätteknik hanterades den på samma sätt i modellerna. Den specifika volymen för hinken var inledningsvis 0,5 mm i Lund men ändrades till 0,2 mm under 2012. För Malmö utfördes en mätning per dag av SMHI från år 1979, i april 1980 började nederbörd mätas på samma sätt som i Lund med en specifik volym på 0,1 mm, 1981 ändrades volymen till 0,5 mm och den ändrades en sista gång till 0,2 mm 1993. Den sista nederbördsdata som hämtades var från 2023 för både Lund och Malmö.

Basmodellen belastades med regndata från Lund och Malmö och beräkningstiden var då cirka en timme. När Lundmodellen belastades med regndata från Lund var beräkningstiden ungefär 20 timmar och för Malmömodellen var tiden cirka 24 timmar när den belastades med regnserien från Malmö.

2.6 ANALYS

2.6.1 Skillnad i vattennivå

För varje modell kördes flera simuleringar med CDS- och blockregn med varierande varaktigheter. Det som har jämförts mellan dessa är maximala vattennivåer i magasinen med utgångspunkt från referensregnets vattennivå. I programmet hämtades värden för vattennivåer varje minut. Vattennivåer hämtades från MIKE+ och sammanställdes därefter i tabeller.

2.6.2 Överbelastningar

Samtliga modeller belastades med uppmätta regnserier från mätstationer runt om i Sverige. Det fanns en förväntan om att i genomsnitt tre regn skulle överbelasta magasinen under en period på 30 år. Förväntningen grundade sig i antagandet att det i genomsnitt kommer att falla tre regn med återkomsttiden tio år eller högre under en 30-årsperiod. Skillnader i längden på regnserierna påverkade antalet överbelastningar. För att möjliggöra jämförelser dividerades antalet överbelastningar i ett magasin med antalet år i regnserien. Resultatet multiplicerades sedan med längden på den tidsperiod som var av intresse. I arbetet utfördes jämförelser av magasinens överbelastningar över en 30-årsperiod. Magasinen bedömdes som överbelastade om vattennivån från det dimensionerande referensregnet överstegs.

Vattennivåer hämtades varje minut under tidsperioder på 23–45 år vilket resulterade i väldigt stora resultatfiler. För att göra filerna mindre rensades de från tillfällen då vattennivån var opåverkad och kvar fanns då endast specifika regnhändelser. En regnhändelse var ett uppmätt regn som bidrog till en förhöjd nivå i något magasin. Tidsspannet för en regnhändelse inleddes när vattennivån i ett magasin var tre centimeter högre än lägsta nivån och avslutades när nivån hade återgått. För varje regnhändelse sparades den högsta vattennivån som påträffades i magasinet. Resultatfilerna modifierades med hjälp av programmet Python. Programmet användes även för att visualisera antalet överbelastningar samt för att ta fram skillnader i vattennivå vid specifika regnhändelser (Appendix B)

2.6.3 Kritisk varaktighet

Magasin med olika egenskaper påverkas inte lika mycket av samma regnhändelser. Det undersöktes om magasinen i modellerna hade en större risk för att bli överbelastade av regn med speciella varaktigheter. Målet var att ta fram en *kritisk varaktighet* för varje magasin. Syftet med denna del av arbetet var att ta reda på hur olika regnvaraktigheter kan påverka magasinen, vilket bedömdes som nödvändigt för att kunna rekommendera vilka regn som bör användas vid dimensionering av dagvattenmagasin.

Kritiska varaktigheten togs fram med blockregn och med historisk regndata. Modellen belastades med blockregn som hade återkomsttiden 10 år, varaktigheter och intensitet presenteras i Tabell 4. Kritiska varaktigheten för blockregn utgjordes av den varaktighet som gav högst vattennivå i magasinet.

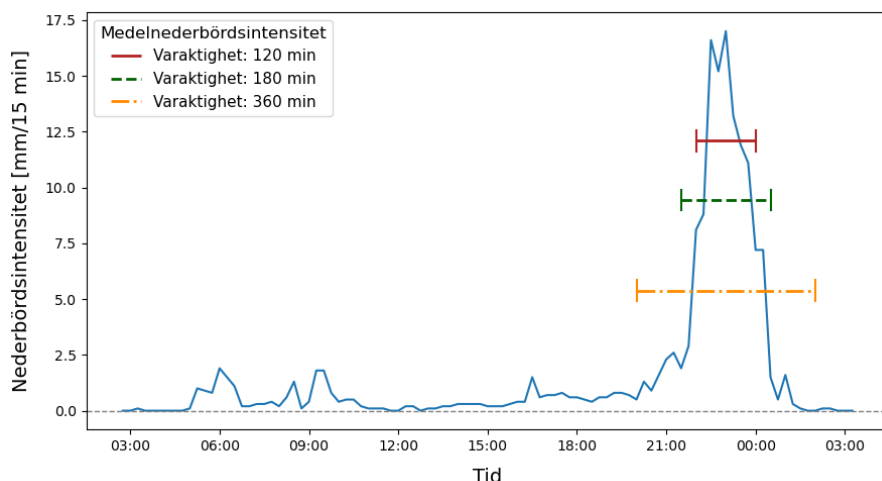
Tabell 4. Varaktigheter och intensitet för de blockregn som användes för att ta fram kritisk varaktighet.

Varaktighet [min]	Intensitet [mm/h]
10	82,1
20	54,4
30	41,7
40	34,2
60	25,7
90	19,2
120	15,5
180	11,5
240	9,3
360	6,9
480	5,6
720	4,2
960	3,5
1440	2,7

Kritisk varaktighet togs även fram med historisk regndata för att jämföra hur verkliga regn överensstämde med resultatet som baserades på blockregn. Metoden för att ta fram kritisk varaktighet, som beskrivs av Meynink och Cordery (1976), skiljer sig från den metod som används i detta arbete. I Meynink och Corderys metod avgör högsta flödeshastighet den kritiska varaktigheten, medan den i detta arbete bestäms utifrån maximala återkomsttider för de regn som överbelastar modellernas magasin.

Undersökningen genomfördes på följande sätt. Varje regn i en historisk mätserie studerades utifrån varaktigheterna 15, 60, 120, 180, 360, 720 och 1440 min. Om ett regn studerades utifrån varaktigheten 120 min valdes den period av regnet som var mest intensiv. Nederbördsintensiteten under dessa två timmar omvandlades till ett medelvärde, se exempel i

Figur 10. Denna varaktighet och medelnederbördsintensitet användes därefter för att ta fram återkomsttid i ett program som byggde på Dahlströms formel (Ekvation 1).



Figur 10. Nederbördsintensitet för ett verkligt regn i Gävle 17–18 augusti 2021, samt maximala medelnederbördsintensiteter för olika varaktigheter.

Samtliga regn från varje mätserie jämfördes och poängsattes i Microsoft Excel, där datum, tid och återkomsttid för varje regn kunde avläsas. För varje av de sju varaktigheterna i varje mätserie sorterades regn utifrån återkomsttid i Excel. Poängen tilldelades baserat på återkomsttiden, det regn med högst återkomsttid tilldelades en poäng, det näst största regnet två poäng, och så vidare. När dagvattenmodellen belastades med regnserien registrerades vilka regn som ledde till överbelastning i magasinen. Det var enbart poängen från dessa regn som var avgörande för bedömningen. Den totala poängen som ett magasin tilldelades, omvandlades till ett medelvärde för att en jämförelse skulle vara möjlig mellan magasin som hade olika antal översvämningar. Den varaktighet som resulterade i lägst medelpoäng för magasinet klassades som den kritiska varaktigheten. Vid den kritiska varaktigheten var alltså återkomsttiden för de regn som överbelastade magasinet i genomsnitt som störst i förhållande till övriga regn. I Appendix G presenteras ett exempel på hur poängen tilldelades. Basmodellen belastades med alla åtta uppmätta regnserier och kritiska varaktigheten var då ett medelvärde. De anpassade modellerna belastades bara med en historisk regnserie.

2.6.4 Samband mellan kritisk varaktighet och nyckeltal

Dagvattenmagasinens egenskaper som avrinningsområdets area, avrinningskoefficient och kapaciteten i magasinets utflöde har jämförts med kritisk varaktighet för att kunna besvara den fjärde frågeställningen om potentiella samband. Jämförelsen har genomförts med hjälp av ett föreslaget nyckeltal där alla dessa parametrar vägdes in (Ekvation 2). Reducerad area motsvarar den del av avrinningsområdet som bidrar till avrinningen och erhålls genom att multiplicera avrinningskoefficienten med den totala arean (von Scherling et al. 2020b). Förhållandet tar inte hänsyn till magasinens volym eller utformning.

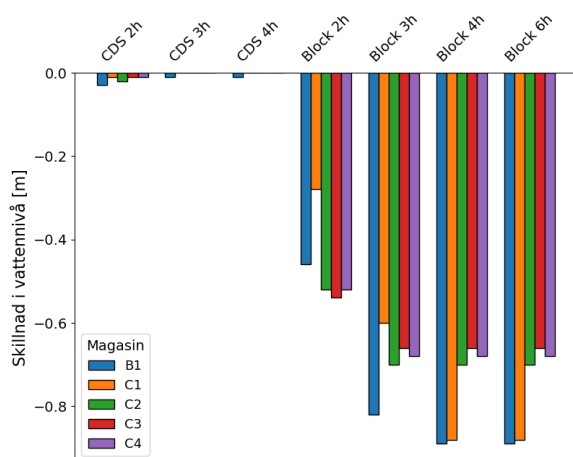
$$\frac{\text{Reducerad area [ha]}}{\text{Maxflöde utlopp} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]} = \text{Nykeltal} \left[\frac{\text{s} \cdot \text{ha}}{\text{m}^3}\right] \quad (2)$$

3 RESULTAT

3.1 SKILLNAD I VATTENNIVÅ

Modellerna belastades med CDS- och blockregn med varierande varaktigheter för att kunna undersöka hur vattennivåerna i magasinerna påverkades. Magasinen hade kapacitet för att klara av att fördröja volymen av referensregnet. I Figur 11 och Figur 12 presenteras skillnad i vattennivå i jämförelse med referensregnet i basmodellen respektive de anpassade modellerna. Alla typregn regn hade återkomsttiden tio år.

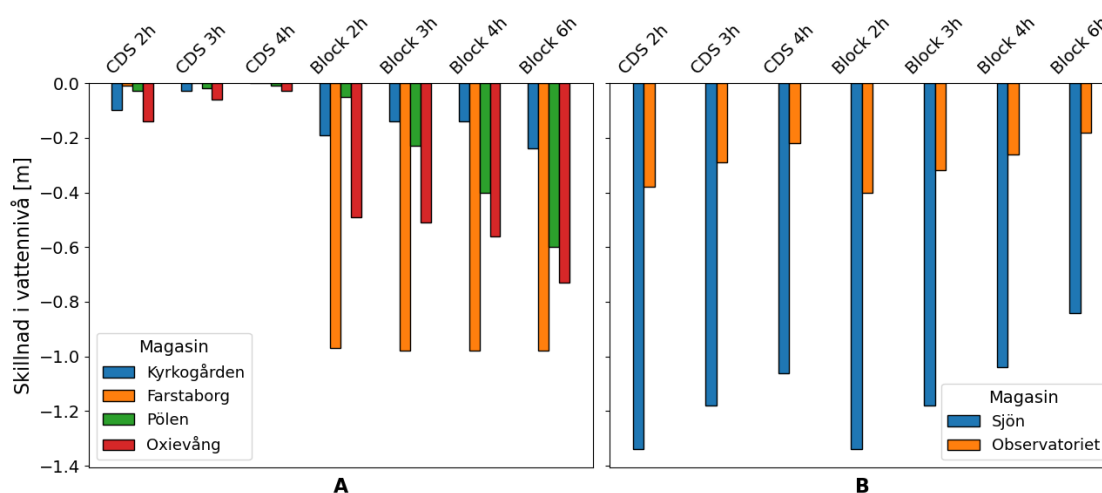
Basmodellen studerades i två fall, B och C. I basmodell B fanns enbart ett magasin (B1) medan basmodell C hade fyra magasin (C1–4) som var delvis seriekopplade (Figur 1). I Figur 11 visas att inget typregn bidrog till högre vattennivå än referensregnets nivå. Det visas även att alla CDS-regn gav en högre vattennivå än blockregnen (Figur 11). För CDS-regnen var det varaktigheterna tre, fyra och sex timmar som gav högst nivå och för blockregnen var det varaktigheten två timmar som gav högst vattennivå. Den blockregnsvaraktighet som orsakade högst nivå inkluderades därmed i referensregnets varaktighet. För basmodellen bedöms CDS-regn vara mer lämpliga att använda vid dimensionering av dagvattenmagasin jämfört med blockregn. Den rekommenderade varaktigheten för CDS-regn i basmodellen är sex timmar, eftersom inget annat regn resulterade i en högre vattennivå.



Figur 11. Skillnaden i vattennivå mellan CDS- och blockregn med varierande varaktigheter jämfört med referensregnet i basmodellens magasin. Negativt värde innebär en lägre nivå än referensregnet.

För de anpassade modellerna var det inget typregn som bidrog till högre vattennivåer än referensregnet (Figur 12). För alla magasin förutom Sjön och Observatoriet ansågs CDS-regn vara mer lämpligt än blockregn och varaktigheten sex timmar var det bästa alternativet för dimensionering av dessa magasin (Figur 12A). För magasinerna Sjön och Observatoriet bidrog blockregnet med varaktigheten sex timmar till högre nivåer än CDS-regnen med 2–4 timmars varaktighet (Figur 12B). Om blockregn med varaktigheten åtta timmar skulle ge en högre nivå än sex timmars varaktighet innebär det att ett CDS-regn med sex timmars varaktighet är olämpligt för dimensionering av dessa två magasin, eftersom det värsta blockregnsscenario

inte inkluderas i CDS-regnets varaktighet. Intervallet av varaktigheter var för litet för att kunna avgöra om den blockregnsvaraktighet som ger högst vattennivå är längre än sex timmar.

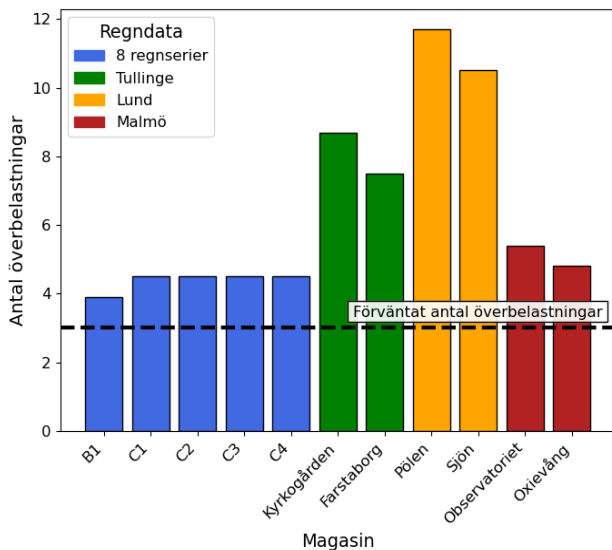


Figur 12. Skillnad i vattennivå mellan CDS- och blockregn med varierande varaktigheter jämfört med referensregnet i de anpassade modellerna. Negativt värde innebär en lägre nivå än referensregnet. (A) Resultat för magasinerna Kyrkogården, Farstaborg, Pölen och Oxievång. (B) Resultat för magasinerna Sjön och Observatoriet.

3.2 ÖVERBELASTNINGAR

3.2.1 Sammanställning

Vattennivåerna i dagvattenmodellernas magasin har stigit olika mycket beroende på vilka historiska regnserier de har belastats med. I Figur 13 presenteras en sammanställning av det genomsnittliga antalet överbelastningar som inträffat i magasinerna under en 30-årsperiod. Basmodellen belastades med alla åtta historiska regnserier medan de anpassade modellerna endast belastades med en regnserie var från en närliggande mätstation. Resultaten för basmodellens magasin B1 och C1–4 i Figur 13 är baserade på medelvärden från de åtta mätserierna. Längd på mätserier och antalet överbelastningar per mätserie presenteras mer detaljerat i Appendix D. Det förväntade antalet överbelastningar var tre under en 30-årsperiod men Figur 13 visar tydligt att förväntningen överskreds för samtliga magasin.



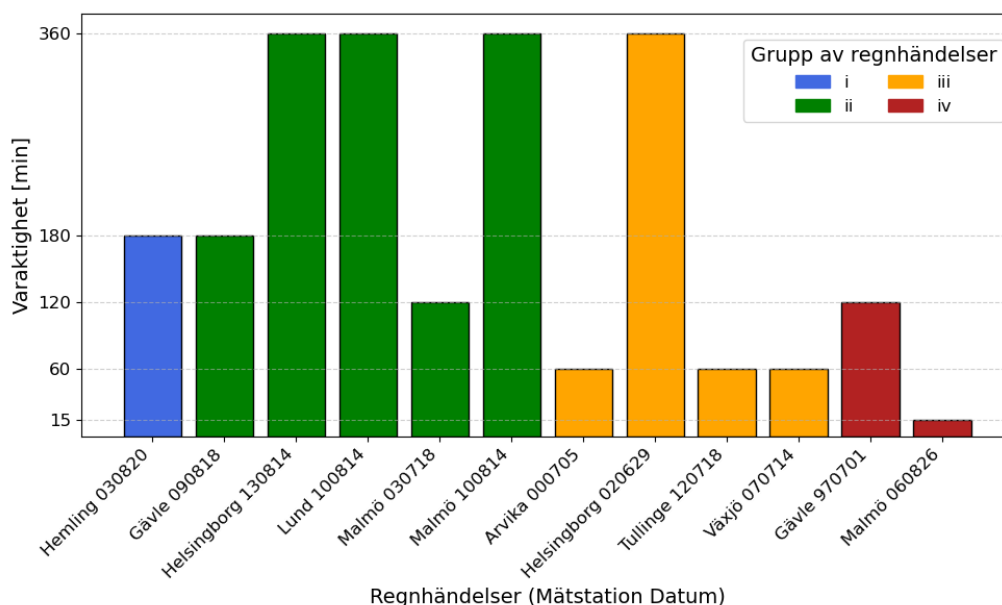
Figur 13. Genomsnittligt antal överbelastningar för en 30-årsperiod för samtliga magasin. Magasinen belastades med olika regndata. Det fanns en förväntan att tre regn skulle bidra till överbelastning under en 30-årsperiod.

Anledningen till att antalet överbelastningar i både basmodellen och de anpassade modellerna var högt var mest troligt för att regnserierna innehöll flera regn med högre återkomsttid än 10 år än vad som var förväntat. Kapaciteten hos magasinerna bedömdes som tillräcklig eftersom majoriteten av de regn som överbelastade magasinerna i regel hade en högre återkomsttid än tio år (Appendix C).

3.2.2 Analys av regnhändelser

Regnhändelser som orsakade överbelastning i magasinerna analyserades för att undersöka om variationer i regnens egenskaper kan förklara varför magasin kan påverkas olika av samma regn. Regnens återkomsttider undersöktes för specifika varaktigheter: 15, 60, 120, 180, 360, 720 eller 1440 minuter. Metoden påminde om det tillvägagångssätt som användes för att ta fram kritisk varaktighet (Avsnitt 2.6.3). Den varaktighet som gav den maximala återkomsttiden presenteras i stapeldiagram i Figur 14 och Figur 15 samt i tabeller i Appendix E.

I Figur 14 presenteras de regnhändelser som överbelastade något men inte alla magasin i basmodellen. Varje färg representerar den grupp av regnhändelser som överbelastade ett eller flera specifika magasin, färgerna är även numrerade som *i*, *ii*, *iii* och *iv*. I Tabell 5 förklaras vilka regnhändelser som överbelastade vilka magasin. Figur 14 visar att regnhändelserna med de kortaste varaktigheterna förekom i grupp *iii* och *iv*. Regnhändelserna i dessa grupper överbelastade de magasin som hade minst avrinningsområden och volym (Tabell 1). Dessa magasin bör kunna fyllas upp snabbt av korta regn vilket bekräftades av resultatet i Figur 14. Långa varaktigheter förekom med högst frekvens i grupp *ii* (Figur 14). Dessa regnhändelser överbelastade enbart magasin C1 som hade näst högst volym i basmodellen och som var delvis seriekopplat (Tabell 1). Detta kan förklaras av att ett seriekopplat magasin påverkas av regnhändelser under längre tid eftersom vatten fördröjs uppströms.

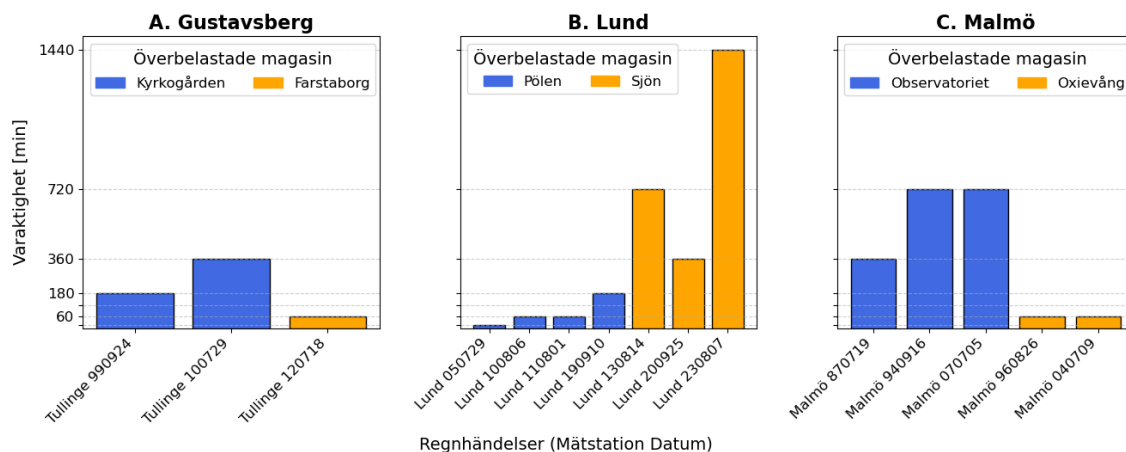


Figur 14. Varaktigheter som gav maximal återkomsttid för regnhändelser som bidrog till överbelastning av minst ett, men inte alla magasin i basmodellen. Förklaring av vilken grupp av regnhändelser som bidrog till överbelastning i vilket magasin presenteras i Tabell 5.

Tabell 5. Förklaring av vilka grupper av regnhändelser (Figur 14) som överbelastade vilka magasin i basmodellen. Regnhändelser i grupp ii överbelastade exempelvis bara magasin C1.

Magasin	i	ii	iii	iv
B1	x			
C1	x	x		
C2	x		x	
C3			x	x
C4	x		x	

I Figur 15 presenteras de varaktigheter som gav maximal återkomsttid för de regn som överbelastade ett magasin i de anpassade modellerna. Det fanns två magasin i varje modell och deras egenskaper som volym och strypflöde skiljde sig åt (Tabell 2). Figur 15 visar att det fanns tydliga skillnader mellan varaktigheterna för de olika magasinerna i samtliga tre modeller.



Figur 15. Varaktigheter som gav maximal återkomsttid för regnhändelser som bidrog till överbelastning av endast ett magasin i de anpassade modellerna. De olika figurerna representerar modellerna (A) Gustavsberg, (B) Lund och (C) Malmö.

När en dagvattenmodell belastades med ett verkligt regn kunde ett av magasinen överbelastas medan kapaciteten hos ett annat magasin var tillräcklig. Skillnaden i magasinens påverkan kan bero på regnens varaktigheter. Det var en tendens som kunde påvisas i alla modeller.

3.3 KRITISK VARAKTIGHET

Två magasin som belastades med samma historiska regnserie kunde bli överbelastade av olika regn. Varaktigheter för de regn som översvämmade magasinen jämfördes för att se om det kunde förklara varför magasinen påverkades på olika sätt. Varje magasin ansågs få en högre påfrestning och större risk för överbelastning om ett stort regn hade en specifik varaktighet, den benämns som *kritisk varaktighet*. För varje magasin presenterades två kritiska varaktigheter, en som baserades på blockregn och en som baserades på historisk regndata (Tabell 6). Den kritiska varaktigheten som baserades på historiska regn för basmodellen, var ett medelvärde av de åtta mätserier som användes. För basmodellen var kritiska varaktigheten högre när den baserades på uppmätta regnserier än när den togs fram med blockregn. För de anpassade modellerna fanns ingen tydlig skillnad.

Tabell 6. Kritisk varaktighet baserat på blockregn och historisk regndata för samtliga magasin.

Magasin	Kritisk varaktighet [min]	
	Blockregn	Historisk regndata
B1	40	62
C1	60	114
C2	40	75
C3	30	62
C4	40	75
Kyrkogården	210	180
Farstaborg	30	60
Pölen	60	60
Sjön	1440	720
Observatoriet	480	360
Oxievång	120	120

3.4 SAMBAND MELLAN KRITISK VARAKTIGHET OCH NYCKELTAL

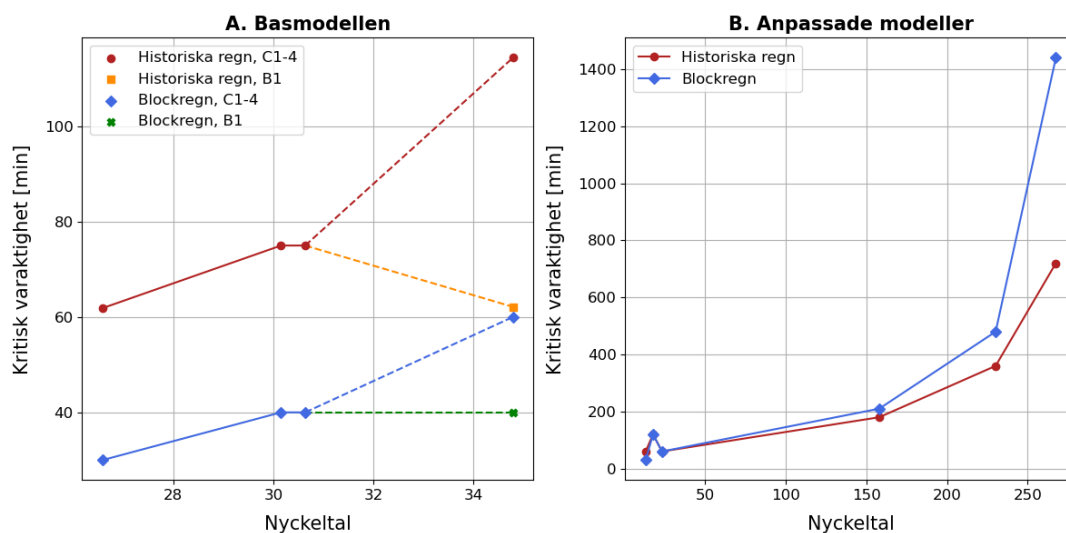
Det fanns inga tydliga samband mellan magasinens kritiska varaktigheter och avrinningsområdenas area, avrinningskoefficient eller strypflöde. Alla dessa parametrar vägdes istället in i ett föreslaget nyckeltal för varje magasin i ett försök till att förklara variationerna i kritiska varaktigheter (Ekvation 2). Nyckeltal för magasinerna presenteras i Tabell 7.

Tabell 7. Nyckeltal för samtliga magasin.

Magasin	Nyckeltal
B1	34,78
C1	34,78
C2	30,64
C3	26,6
C4	30,16
Kyrkogården	158,06
Farstaborg	13,36
Pölen	23,48
Sjön	267,48
Observatoriet	230,16
Oxievång	17,87

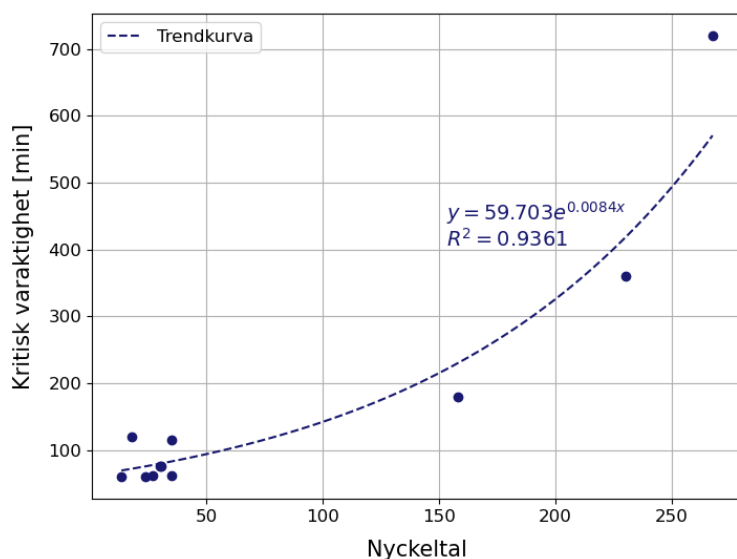
I Figur 16 visas förhållandet mellan kritisk varaktighet och det föreslagna nyckeltalet för magasinerna. Förhållandet mellan kritisk varaktighet och nyckeltal visar att ett magasin som har ett högt nyckeltal mest troligt har en hög kritisk varaktighet. Denna trend förekommer för både blockregnen och de uppmätta regnen för både basmodellen och de anpassade modellerna. Det fanns tydliga skillnader mellan kritiska varaktigheten för blockregn jämfört med uppmätta regn men de visar samma tendens,

I resultaten för basmodellen, som visas i Figur 16A, har heldragna linjer kopplats samman med två streckade linjer. Markeringarna med de streckade linjerna representerar två magasin med samma nyckeltal, magasin B1 och C1. Dessa är placerade på samma plats i modellen, men i basmodell C sker fördröjning av dagvatten uppströms, medan basmodell B endast har ett magasin (Figur 1). Anledningen till att C1 har högre kritisk varaktighet kan vara att dagvatten fortsätter flöda från magasinerna uppströms efter att regnet har upphört. Den kritiska varaktigheten för magasin B1, som baserades på historiska data, avviker från den stigande trenden som övriga magasin uppvisar (Figur 16A).



Figur 16. Förhållande mellan kritisk varaktighet och föreslaget nyckeltal för magasinerna i basmodellen. Varje markering motsvarar ett magasin. (A) Förhållande för basmodellen. I basmodellen fanns två magasin med samma nyckeltal. (B) Förhållande för de anpassade modellerna.

En trendkurva som beskriver förhållandet mellan kritisk varaktighet och det föreslagna nyckeltalet presenteras i Figur 17. Trenden baseras på de kritiska varaktigheter som togs fram med historisk regndata då dessa bedömdes återspegla verkligheten bättre än blockregnen. Alternativa trendkurvor presenteras i Appendix F, men samtliga hade lägre R^2 -värden.



Figur 17. Förhållande mellan kritisk varaktighet och föreslaget nyckeltal för samtliga magasin, tillsammans med en trendkurva, dess ekvation och R^2 -värde. Kritisk varaktighet baserades på historisk regndata.

Med hjälp av Ekvation 3 som beskriver trendkurvan kan kritiska regnvaraktigheter för magasin uppskattas innan ett magasin dimensioneras. Kritiska varaktigheten kan inte förutspås med säkerhet då dataunderlaget var begränsat. Trendkurvan baseras endast på data från tio magasin och antingen en eller åtta regnserier beroende på vilken modell som använts.

$$y = 59,703e^{0,0084x} \quad (3)$$

Kapaciteten i ledningsnätet efter anslutningspunkten i Oxievång i Malmömodellen var otillräcklig och vatten flödade dessutom baklänges i ledningen (Appendix A13). Ingen anpassning utfördes då antalet överbelastningar av magasinet var jämförbart med Observatoriet samt magasin från övriga anpassade modeller. I Figur 16B visas en punkt vid varaktigheten 120 minuter som bidrar med en avvikelse i trenden och den representeras av magasinet i Oxievång. Ledningsnätets begränsade kapacitet kan vara förklaringen till den avvikande trenden. En anpassning av ledningsnätet hade behövts för att kunna fastställa det. Magasinet Farstaborg i Gustavsbergssmodellen hade också otillräcklig kapacitet för att avleda vatten från referensregnet (Appendix A9). Detta magasin bidrog däremot inte till någon avvikande trend i Figur 17.

Ett regn som föll i Malmö 1980-06-18 överbelastade båda magasinen i Malmömodellen men inget magasin i basmodellen. De föreslagna nyckeltalen för basmodellens magasin var högre än Oxievång men lägre än Observatoriet. Det är en indikation på att nyckeltalet inte med säkerhet kan användas för att förutspå vilka regn som kommer att översvämma magasinen. Det kan dock bero på att ledningarna nedströms magasinet i Oxievång inte var tillräckliga för avledningen av dagvatten och att nyckeltalet för magasinet därmed var missvisande.

3.5 KOMPLETTERANDE RESULTAT OM KRITISK VARAKTIGHET

I basmodellen var det totalt mellan 24 och 29 regn med högre återkomsttid än tio år som inte överbelastade magasinen, av dem var det enbart 2–4 som påträffades vid den kritiska varaktigheten (Appendix C). Den högsta återkomsttiden för dessa 2–4 regn var 11,1 år (Appendix C). För basmodellen kunde det därmed konstateras att alla regn som hade större återkomsttid än 11,1 år vid den kritiska varaktigheten bidrog till överbelastning. Det indikerar att det är lättare att förutspå vilka regn som kommer att överbelasta magasinet om återkomsttider studeras vid den kritiska varaktigheten, vid andra varaktigheter är det mer oförutsägbart.

De regn med högre återkomsttid än tio år som inte bidrog till överbelastning hade oftast varaktigheter som skiljde sig från den kritiska varaktigheten. Ett av dessa regn hade en så hög återkomsttid som 60 år. Magasin B1 visade sig exempelvis ha tillräcklig kapacitet för att klara 15 regnhändelser från historisk regndata med en återkomsttid som var högre än 20 år. Varaktigheterna på dessa regn kunde variera mellan 15 och 1440 minuter. Det fanns samtidigt åtta regn som var mindre än 10-årsregn vid de undersökta varaktigheterna men som ändå bidrog till överbelastning. Dessa regn hade kunnat ha längre återkomsttid än tio år om de hade studerats vid andra varaktigheter.

4 DISKUSSION

I arbetet har blockregn och CDS-regn med olika varaktigheter undersökts utifrån deras påverkan på dagvattenmagasin, med syfte att kunna rekommendera vilken regndata som bör användas vid dimensionering. Magasinen har dessutom belastats med historisk regndata för att undersöka hur välanpassade de var för verkliga regn. För att kunna rekommendera rätt varaktighet har magasinens kritiska varaktigheter studerats. Ett föreslaget nyckeltal har presenterats i syfte att kunna förklara skillnader i kritisk varaktighet mellan olika magasin. Förhållandet mellan kritisk varaktighet och nyckeltal beskrevs med en trendkurva. Arbetet har genomförts med modelleringsverktyget MIKE+.

Arbetets främsta begränsning var den tidsmässiga aspekten, vilket resulterade i flera av de avgränsningar som gjordes. Trots detta fanns det delar av metoden som kunde ha varit annorlunda utan att det skulle ha krävt mycket extra tid. En brist i modellerna var att snösmältning inte var inkluderat, vilket kan ha stor betydelse för magasin med hård strypning (Blomquist et al. 2016). Genom att inkludera snösmältning i modellerna skulle det kunna ge en mer realistisk bild av avrinningen, vilket i sin tur skulle ha förbättrat noggrannheten i modellernas resultat. För två av de undersökta magasinerna, Sjön och Observatoriet, rekommenderades inget typregn då deras kritiska varaktigheter inte var inkluderade i det intervall av varaktigheter som undersöktes för typregnen. Genom att öka varaktighetsintervallet hade en mer omfattande analys kunnat genomföras som hade kunnat innefatta fler magasin. Det hade varit möjligt eftersom beräkningstiderna var kortare än 30 sekunder när modellerna belastades med typregn.

Magasinen i modellerna var anpassade för att klara volymen från referensregnet som var ett CDS-regn med sex timmars varaktighet och återkomsttiden 10 år. Dimensioneringen utvärderades genom att belasta modellerna med historiska nederbördsdata och därefter studera återkomsttider och varaktigheter för regn som påverkade magasinerna. Det förekom regnhändelser med längre återkomsttider än tio år som inte överbelastade magasinerna. Vid kritiska varaktigheten var återkomsttiden hos dessa dock aldrig högre än 11,1 år för basmodellen (Tabell C1). Av de historiska regn som överbelastade något magasin var det endast åtta regn som var mindre än 10-årsregn och den lägsta återkomsttiden för ett av dessa var 7,3 år. De regn som hade kort återkomsttid men som ändå bidrog till överbelastning kunde ha varit 10-årsregn vid en annan varaktighet än de som undersöktes. Avvikelse inträffade åt båda hållen och eftersom en viss felmarginal förväntades kunde dimensioneringen ändå bedömas som tillräcklig.

Undersökning av magasinens överbelastningar var en viktig förutsättning för att kunna ta fram kritisk varaktighet från uppmätta regnserier. Kritiska varaktigheten bedömdes vara mer tillförlitlig om flera regn i en mätserie bidrog till överbelastning eftersom varaktigheter som gav den maximala återkomsttiden kunde variera. Kritiska varaktigheten för de anpassade modellerna baserades endast på en uppmätt regnserie men alla magasin överbelastades minst sju gånger vilket gjorde att en trovärdig kritisk varaktighet ändå kunde fastställas. Kritiska varaktigheten för magasin i basmodellen var ett medelvärde utifrån de åtta mätserier som

användes. För nederbördsdata från Helsingborg var det vissa magasin som endast överbelastades av ett regn. Kritiska varaktigheten motsvarades då av den varaktighet som gav maximal återkomsttid för det enstaka regnet. Enstaka regn kunde på så sätt påverka den kritiska varaktigheten i stor utsträckning. Eftersom kritiska varaktigheterna för basmodellens magasin utgjordes av ett medelvärde kunde ett enstaka regn från Helsingborg då väga lika tungt som åtta regn från Lund. För att undvika det hade kritiska varaktigheten kunnat tagits fram genom att jämföra regnhändelser från olika mätstationer tillsammans istället för separat.

Modellerna belastades med historiska regn och antalet överbelastningar blev då högre än vad som var förväntat (Figur 13). Under en 30-årsperiod var förväntningen att tre regn skulle bidra till överbelastning. Dimensioneringen av magasinerna bedömdes trots det som tillräcklig då de regnhändelser som bidrog till överbelastning nästan uteslutande var större än 10-årsregn, vilket magasinerna var anpassade för att klara. Det förväntade antalet var ett antagande som hade kunnat anses som korrekt om regnserierna var tio gånger längre än återkomsttiden, alltså 100 år långa. Först då är det rimligt att säga att det i genomsnitt kommer ett 10-årsregn under en 10-årsperiod (Svenskt Vatten 2016). I det här fallet var mätserierna endast tre gånger längre, cirka 30 år. En potentiell förklaring till det stora antalet överbelastningar kan vara att de mätstationer som valdes hade ovanligt många 10-årsregn och att valet av dessa därmed var avgörande för resultatet. För att minska osäkerheterna skulle det vara värdefullt att i fortsatta studier utvärdera ett större antal regnserier och längre tidsperioder. Om resultat från studier med ett starkare datamaterial visar samma tendenser, skulle det i fortsatta studier vara intressant att undersöka alternativa förklaringar, som klimatförändringars påverkan. Förändrade klimatförhållanden kan påverka frekvensen och intensiteten av extrema regnhändelser (Naturvårdsverket 2024). Med mer detaljerade modelleringar kan förståelsen för hur regnhändelser påverkar flöden och magasin i specifika områden förbättras.

Regn med en varaktighet som motsvarade den kritiska varaktigheten för ett magasin bedömdes ge högst vattennivå i jämförelse med andra varaktigheter. Antagandet prövades aldrig i arbetet. Det hade kunnat göras genom att studera tidsserier för varje regnhändelse och undersöka vid vilken tidpunkt som magasinens maxkapacitet uppfylldes.

Magasinen Sjön i Lundmodellen och Observatoriet i Malmömodellen hade den längsta kritiska varaktigheten, och för dessa magasin kunde rekommenderade typregn inte presenteras. Anledningen till att inget typregn rekommenderades var för att intervallet av varaktigheter som undersöktes var för kort för att kunna fastställa vilket blockregn som bidrog med högst vattennivå i magasinerna (Figur 12B). Vilken blockregnsvaraktighet som gav den högsta vattennivån kunde istället visas med den kritiska varaktigheten, vilket var vid 1440 min (24 h) för Sjön och 480 min (8 h) för Observatoriet (Tabell 6). CDS-regn rekommenderas endast att användas vid dimensionering av ett magasin om dess varaktighet innefattar den blockregnsvaraktighet som ger magasinets värsta scenario. För att rekommendera ett CDS-regn vid dimensionering av magasinerna Sjön och Observatoriet skulle varaktigheten därmed behöva vara minst 24 respektive 8 timmar. Eftersom referensregnet som användes vid dimensionering av magasinerna var ett CDS-regn med sex timmars varaktighet kan Sjön och Observatoriet anses

vara underdimensionerade. Vetskap om den kritiska varaktigheten kan därmed underlätta valet av ett typregns varaktighet.

Om den kritiska varaktigheten för ett magasin är känt under dimensioneringsfasen kan det bidra till kortare beräkningstid i ett valideringssteg där magasinets kapacitet testas med historiska regn (Blomquist et al. 2016). I arbetet visade det sig att de regn som bidrog till överbelastning av magasinen hade en återkomsttid som var längre än tio år vid den kritiska varaktigheten, med åtta regn som undantag. Vid andra varaktigheter kunde dessa regn ha kortare återkomsttider. Om magasinet dimensionerats efter ett 10-årsregn kan alla historiska regn med återkomsttider som är högre än tio år vid den kritiska varaktigheten noteras. För att kontrollera kapaciteten kan modellen där magasinet ingår belastas med dessa specifika regnserier. Det ger då kortare beräkningstid jämfört med om en hel mätserie på exempelvis 30 år hade använts vilket i sin tur bidrar till mer effektiv dimensionering av dagvattenmagasin.

I studien av Kang et al. (2013) framhölls kritisk varaktighet som en användbar metod för att uppskatta översvämningsrisk, men det betonades också att fler studier behövs för att utveckla tillförlitliga dimensioneringsstandarder. I det här arbetet togs den kritiska varaktigheten fram med ett tillvägagångssätt som baserades på maximal återkomsttid, vilket skiljde sig från metoder som beskrivits i den studerade litteraturen där den istället baserades på maximalt flöde (CH2M HILL 2011; Kang et al. 2013; Meynink & Cordery 1976). Den kritiska varaktigheten kan då fastställas genom att analysera sambandet mellan regn och avrinning med hjälp av hydrologiska modeller och observerade data. I modellerna identifieras den tidsperiod som resulterar i den maximala toppavrinningen, vilket motsvarar den kritiska varaktigheten (Kang et al. 2013). En alternativ metod för att bestämma kritisk varaktighet är att sätta den lika med koncentrationstiden, vilket dock endast är relevant för områden med mycket låg eller obefintlig infiltration (Schmid 1997). Detta är ett viktigt antagande i den rationella metoden (Lyngfelt 1981). Bezak et al. (2018) och Krvavica & Rubinić (2020) framförde att historisk regndata och tidigare översvämningsstudier bör studeras för att ta fram och verifiera den kritiska varaktigheten, vilket har genomförts i den metod som tillämpades i det här arbetet. För ovan nämnda studier talar kritisk varaktigheten om när högsta flödet inträffar i ett ledningsnät medan det för magasin är mer relevant att veta vilka varaktigheter som ger största volymen, därför har det varit relevant att använda ett annat tillvägagångssätt i detta arbete. En metod som kan tillämpas för att uppskatta kritisk varaktighet är att tillämpa trendkurvan som presenteras i Figur 17. Den metoden skulle kunna bidra till högre effektivitet vid dimensionering av dagvattenmagasin eftersom beräkning med ekvationerna är enkla att tillämpa. Kritisk varaktighet är ett begrepp som inte har varit framträdande i den svenska litteraturen som granskats i detta arbete. Ökad medvetenhet om detta koncept skulle kunna leda till förbättrad dimensionering av både magasin och ledningsnät, då valet av dimensionerande varaktighet för typregn underlättas samt för att beräkningstiden vid validering kan förkortas.

För att bekräfta de observerade tendenserna mellan kritisk varaktighet och det föreslagna nyckeltalet skulle liknande men mer omfattande studier kunna genomföras, där fler magasin undersöks. Fortsatta studier skulle även kunna inkludera en djupare analys av hur olika hydrologiska parametrar, såsom magasinens volym och markanvändning i avrinningsområdet,

påverkar den kritiska varaktigheten. Det kan också vara värdefullt att undersöka fler magasin i seriekopplade system för att se hur det påverkar resultaten. Fortsatta studier inom området bör dessutom fokusera på att definiera och standardisera begreppet kritisk varaktighet. Detta skulle kunna utföras med en litteraturstudie där begreppet jämförs med internationella studier och definitioner. En ökad förståelse för kritisk varaktighet skulle kunna resultera i mer effektiv dimensionering och mer pålitliga dagvattensystem.

I en rapport av Skilberg (2020) sammanställdes rekommenderade varaktigheter för CDS-regn vid skyfallskartering, dessa varierade mellan tre och sex timmar. Rekommendationerna i Skilbergs rapport skilde sig från resultaten som konstaterades i detta arbete. För de magasin, typregn och varaktigheter som jämförts i arbetet kunde det fastställas att CDS-regnet med sex timmars varaktighet var det bästa alternativet, då det gav högst vattennivå i samtliga magasin. Regnet rekommenderas däremot inte för magasinerna Sjön och Observatoriet på grund av att deras kritiska varaktighet var högre än sex timmar. Skillnaden mellan olika varaktigheter för CDS-regn var liten så länge de innefattade den kritiska varaktigheten (Figur 11 & Figur 12). Det viktigaste vid val av varaktighet för CDS-regn är därmed att den kritiska varaktigheten inkluderas, om denna inte kan fastställas är det bättre att välja en längre varaktighet än en kortare. Fler varaktigheter skulle ha undersökts för att med säkerhet kunna rekommendera rätt typregn för alla magasin. CDS-regn med sex timmars varaktighet rekommenderas för dimensionering av dagvattenmagasin, förutsatt att magasinens kritiska varaktighet är högst sex timmar.

5 SLUTSATS

Programmet MIKE+ användes för att jämföra vattennivåer i dagvattenmagasin när modeller belastades med olika typregn. Regnen utgjordes av CDS- och blockregn med en återkomsttid på 10 år och varaktigheter på två, tre, fyra och sex timmar. Resultaten visade att CDS-regn med varaktigheten sex timmar bidrog till högst vattennivå i samtliga magasin. Av de undersökta typregnen är CDS-regnet med sex timmars varaktighet det mest lämpliga valet för dimensionering av dagvattenmagasin.

När dagvattenmodellerna belastades med uppmätta regnserier inträffade fler överbelastningar av magasinerna än förväntat. Det berodde på att regnserierna innehöll flera regn med en återkomsttid på över tio år än vad som förväntades.

Kritiska regnvaraktigheter identifierades för varje magasin vilket motsvarade den varaktighet som orsakade högst vattennivå i magasinerna. För varje magasin presenterades även ett föreslaget nyckeltal som inkluderade magasinets reducerade area och maxflödet i utloppet. Det fanns ett samband mellan den kritiska varaktigheten och nyckeltalet, ett högt nyckeltal indikerade en hög kritisk varaktighet. Förhållandet beskrevs med en trendkurva som kan användas för att uppskatta kritisk varaktighet vid dimensionering av magasin, men den bör användas med viss försiktighet på grund av begränsat dataunderlag.

Bland de typregn som utvärderades visade det sig att CDS-regnet med en varaktighet på sex timmar var det bästa alternativet för dimensionering av dagvattenmagasin med kapacitet att hantera 10-årsregn. Rekommendationen är att använda CDS-regn med sex timmars varaktighet som typregn, under förutsättning att den kritiska varaktigheten för magasinerna är kortare än sex timmar.

6 REFERENSER

- Arnell, V. (1991). Nederbördsdata vid dimensionering av avloppssystem. VAV, P65
- Aryal, R., Vigneswaran, S., Kandasamy, J. & Naidu, R. (2010). Urban stormwater quality and treatment. *Korean J. Chem. Eng.*, 27, 1343–1359. <https://doi.org/10.1007/s11814-010-0387-0>
- Beven, K. (2012). *Rainfall-runoff modelling: The Primer*. 2nd ed. Wiley-Blackwell.
- Bezák, N., Šraj, M., Rusjan, S. & Mikoš, M. (2018). Impact of the Rainfall Duration and Temporal Rainfall Distribution Defined Using the Huff Curves on the Hydraulic Flood Modelling Results. *Geosciences*, 8, 69. <https://doi.org/10.3390/geosciences8020069>
- Blomquist, D., Hammarlund, H., Härle, P. & Karlsson, S. (2016). *Riktlinjer för modellering av spillvattenförande system och dagvattensystem*. (2016-15). Svenskt Vatten Utveckling.
- CH2M HILL (2011). *Critical Storm Duration Analysis*. Evansville, USA.
- Dahlström, B. (2010). *Regnintensitet – en molnfysikalisk betraktelse*. (2010-05). Svenskt Vatten AB.
- DHI (2024a). *MIKE+ Model manager User guide*
- DHI (2024b). *MIKE 1D Reference Manual*
- Kang, M.S., Goo, J.H., Song, I., Chun, J.A., Her, Y.G., Hwang, S.W. & Park, S.W. (2013). Estimating design floods based on the critical storm duration for small watersheds. *Journal of Hydro-environment Research*, Volume 7, Issue 3, 1570-6443. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2013.01.003>
- Krvavica, N. & Rubinić, J. (2020). Evaluation of Design Storms and Critical Rainfall Durations for Flood Prediction in Partially Urbanized Catchments. *Water*, 12, 2044. <https://doi.org/10.3390/w12072044>
- Larm, T. & Blecken, G. (2019). *Utformning och dimensionering av anläggningar för rening och flödesutjämning av dagvatten*. (2019-20). Svenskt Vatten AB.
- Lyngfelt, S. (1981). *Dimensionering av dagvattensystem - Rationella metoden*. Geohydrologiska forskningsgruppen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, Meddelande nr 56.
- Meynink, W.J.C. & Cordery, I. (1976). Critical duration of rainfall for flood estimation. *Water Resources Research*, 12 (6), 1209–1214. <https://doi.org/10.1029/WR012i006p01209>

MSB (2023). *Metod för skyfallskartering av tätorter*. (MSB2257, ISBN: 978-91-7927-433-7)

Naturvårdsverket (2024). *Klimatförändringarnas effekter i Sverige*.

<https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatforandringar/klimatet-i-framtiden/effekter-i-sverige/> [2024-03-06]

Nodine, T.G., Conley, G., Riihimäki, C.A., Holland, C. & Beck, N.G. (2024). Modeling the impact of future rainfall changes on the effectiveness of urban stormwater control measures. *Scientific reports*, 14:4082. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53611-1>

Rangari, V.A., Patel, A.K. & Umamahesh, N. V. (2015). Review of urban stormwater models. *Environ. Model. Softw.*, 16: 37

Rossman, L.A. (2010). *Storm water management model user's manual, version 5.0*. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.

von Scherling, M., Hammarlund, H., Blomquist, D. & Siegwang, L. (2020a). *Dokumentation vid modellering av avloppsledningsnät*. (2020-15). Svenskt Vatten AB.

von Scherling, M., Svensson, G. & Sörelius, H. (2020b). *Simulerade effekter av trög avvattning*. (2020-1). Svenskt Vatten AB.

Schmid, B.H. (1997). Critical rainfall duration for overland flow from an infiltrating plane surface. *Journal of Hydrology*, Volume 193, Issues 1–4. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03152-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03152-6)

Skilberg, L. (2020). *Utredning kring val av varaktighet vid skyfallskarteringar*. (UPTEC W 20003). Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten och landskapslära, Uppsala universitet.

SMHI (2024). *Hur mäts nederbörd?*

<https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/regn/hur-mats-nederbord-1.637> [2024-06-13]

Svenskt Vatten (2004). *Dimensionering av allmänna avloppsledningar*. (P90). Svenskt Vatten AB.

Svenskt Vatten (2011). *Nederbördsdata vid dimensionering och analys av avloppssystem*. (P104). Svenskt Vatten AB.

Svenskt Vatten (2016). *Avledning av dag-, drän- och spillvatten*. (P110 - Del 1). Svenskt Vatten AB.

Trafikverket (2005). *Avvattning och dränering*. (2005:112). Trafikverket.

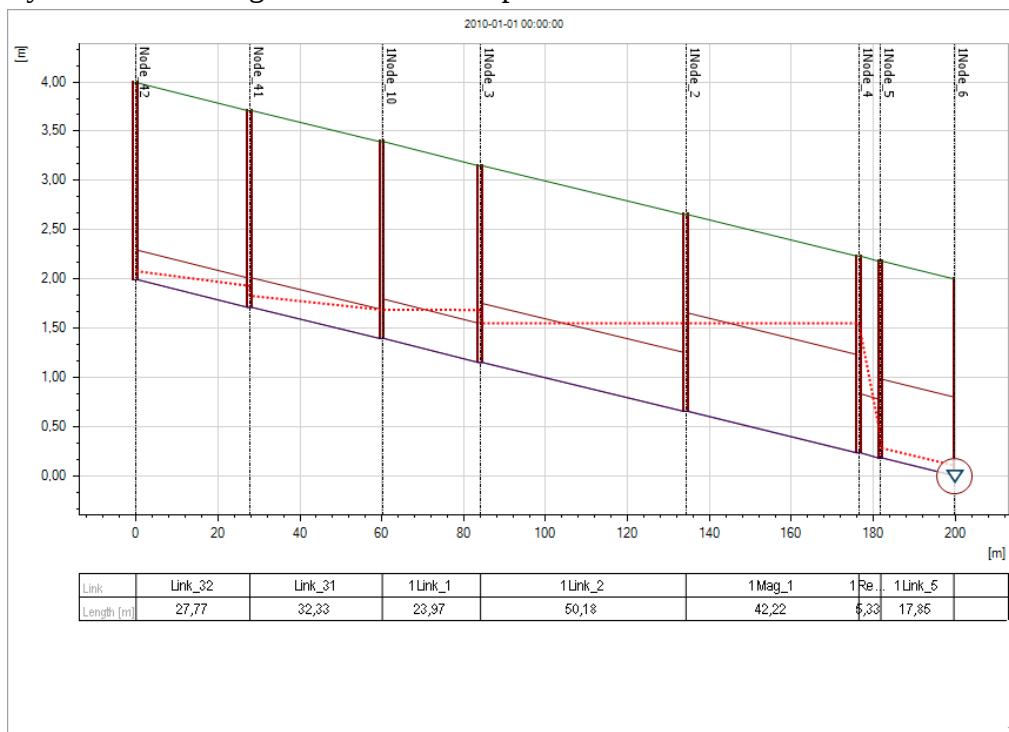
Viklander, M., Österlund, H., Müller, A., Marsalek, J. & Borris, M. (2019).

Kunskapssammanställning Dagvattenkvalitet. (2019-02). Svenskt Vatten AB.

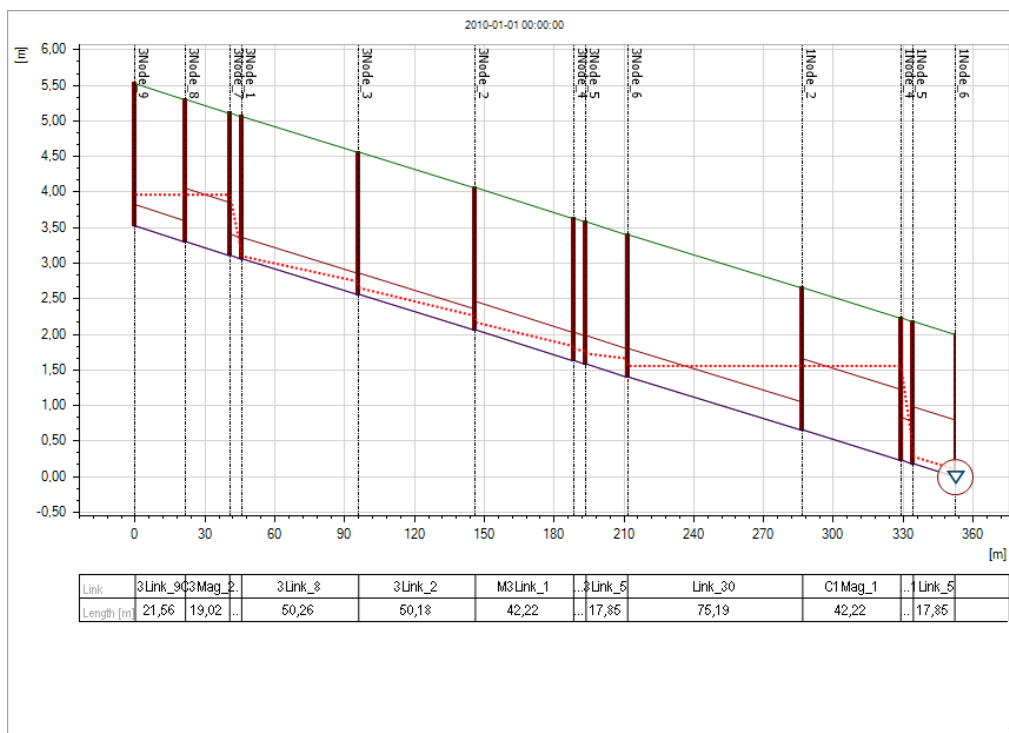
- Volpi, E., Fiori, A., Grimaldi, S., Lombardo, F. & Koutsoyiannis, D. (2015). One hundred years of return period: Strengths and limitations. *Water Resour. Res.*, 51, 8570–8585. <https://doi.org/doi:10.1002/2015WR017820>
- Watt, E. & Marsalek, J. (2013). Critical review of the evolution of the design storm event concept. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(2): 105-113. <https://doi.org/10.1139/cjce-2011-0594>

APPENDIX A – LEDNINGSNÄT I PROFIL MED TRYCKLINJER

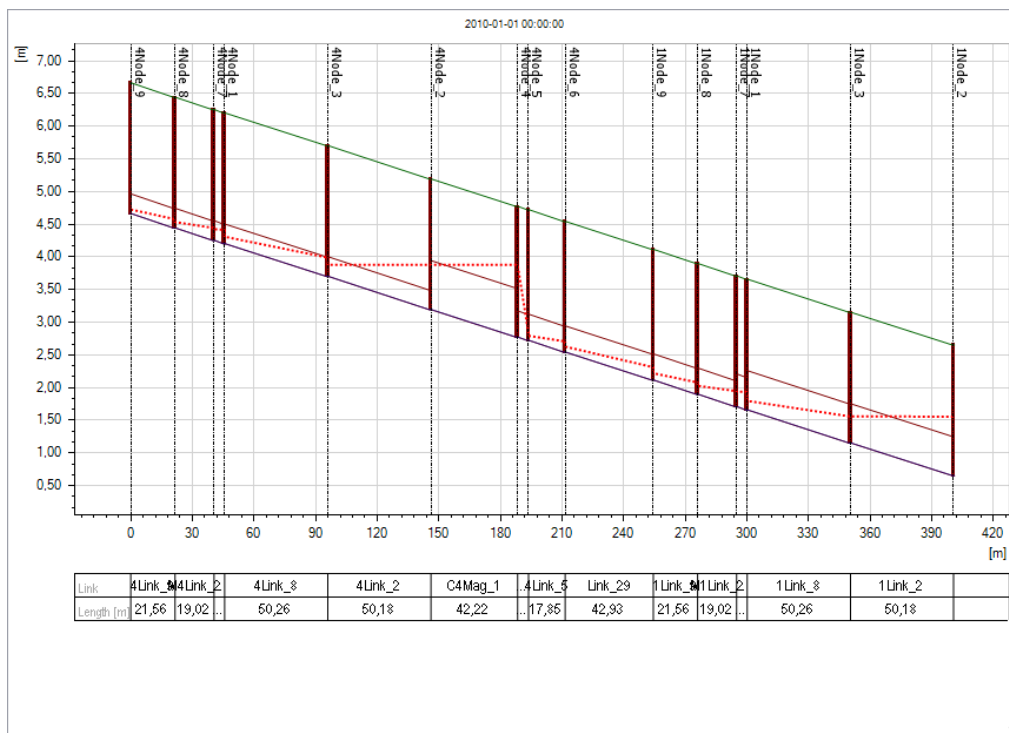
I detta avsnitt presenteras ledningsnätets utformning i profil samt den trycklinje som referensregnet bidrar med i varje ledningsnät. De gröna linjerna motsvarar marknivå, de nedersta linjerna med en blå nyans är nodernas och ledningarnas bottennivåer, de brun/röda strecken mellan markytan visar ledningarnas höjd. Röd streckad linje motsvarar högsta trycknivån i ledningsnätet som även representerar vattennivå i noderna.



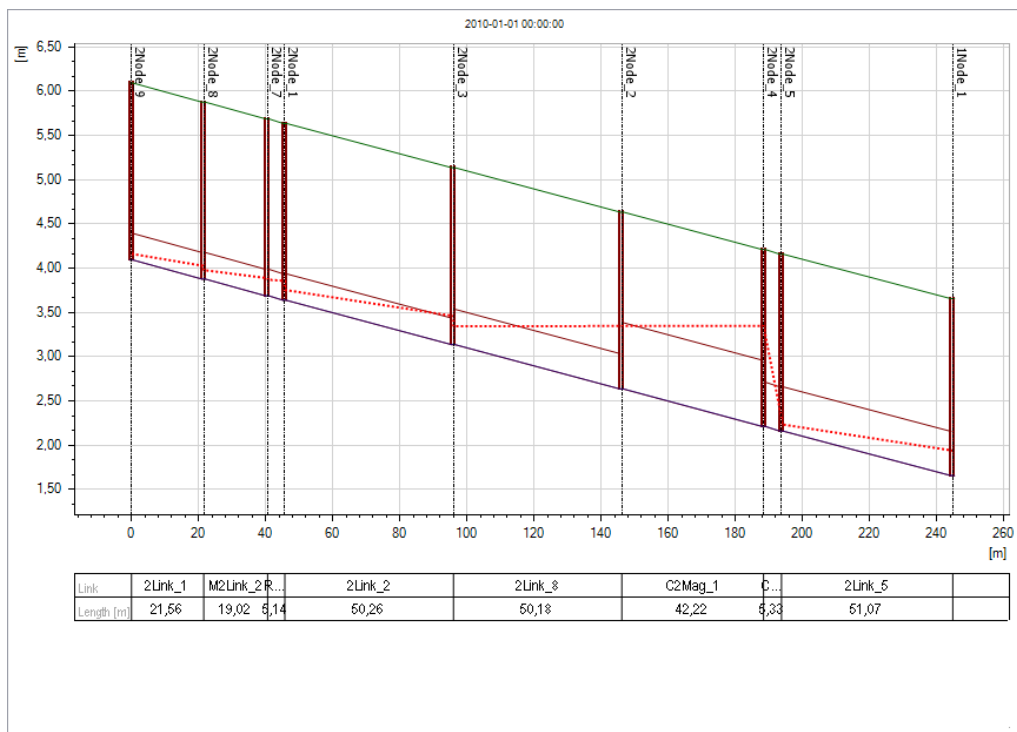
Figur A1. Magasinet och delar av ledningsnätet i profil för basmodell B med trycklinje för referensregn.



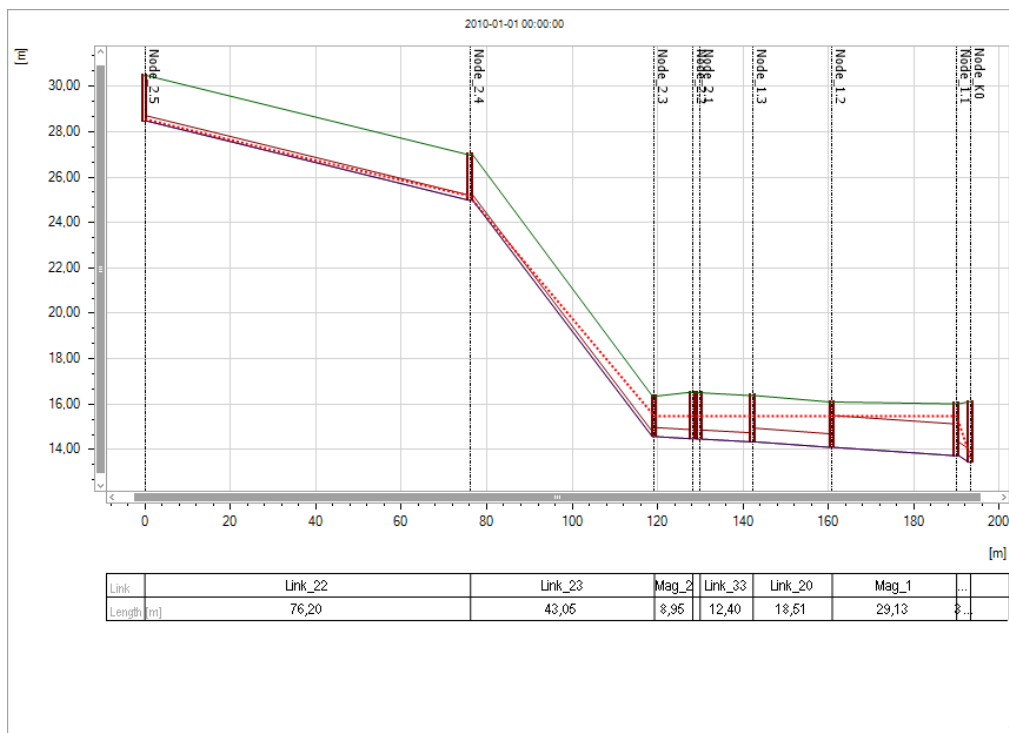
Figur A2. Magasin C3, C1 och delar av ledningsnätet i profil för basmodell C med trycklinje för referensregn.



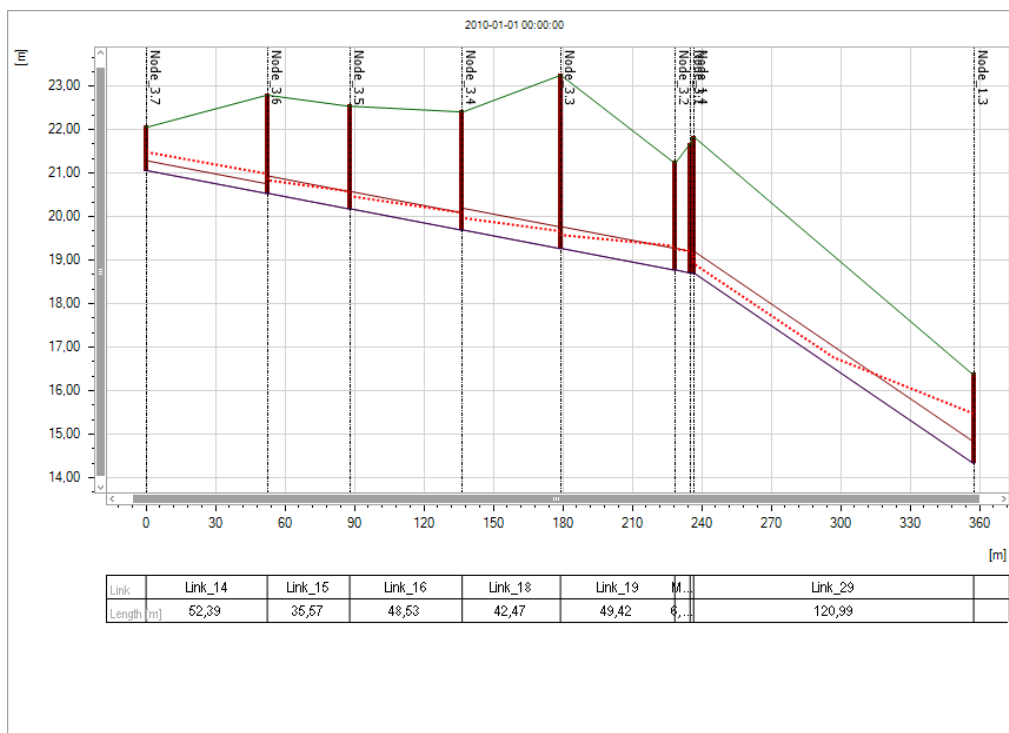
Figur A3. Magasin C4 och delar av ledningsnätet i profil för basmodell C med trycklinje för referensregn.



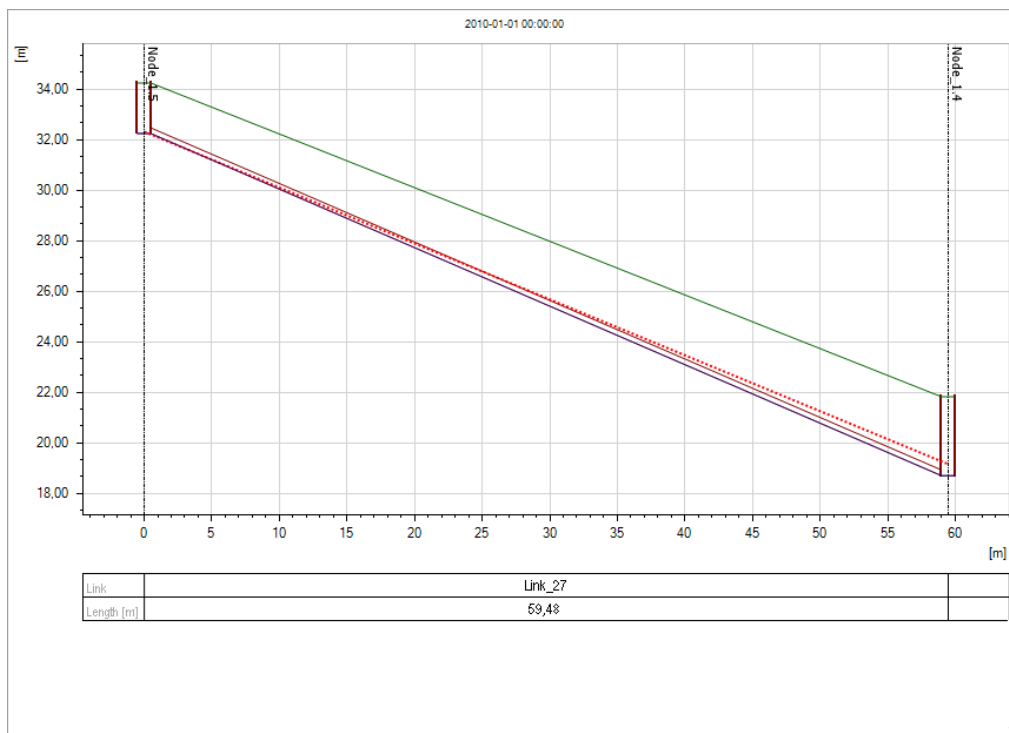
Figur A4. Magasin C2 och delar av ledningsnätet för basmodell C med trycklinje för referensregn.



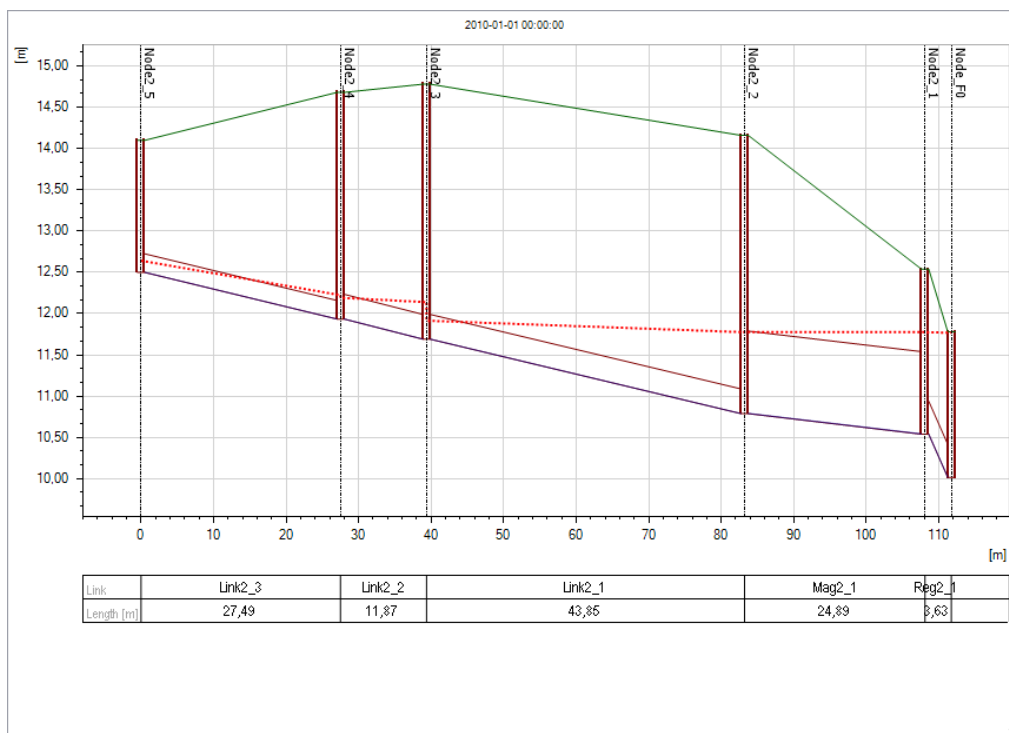
Figur A5. Magasin och delar av ledningsnätet i profil med trycklinje för referensregn för Kyrkogården i Gustavsbergsmoellen.



Figur A6. Delar av ledningsnätet i profil med trycklinje för referensregn för Kyrkogården i Gustavsbergsmoellen.



Figur A7. En del av ledningsnätet i profil med trycklinje för referensregn för Kyrkogården i Gustavsbergsmodellen.

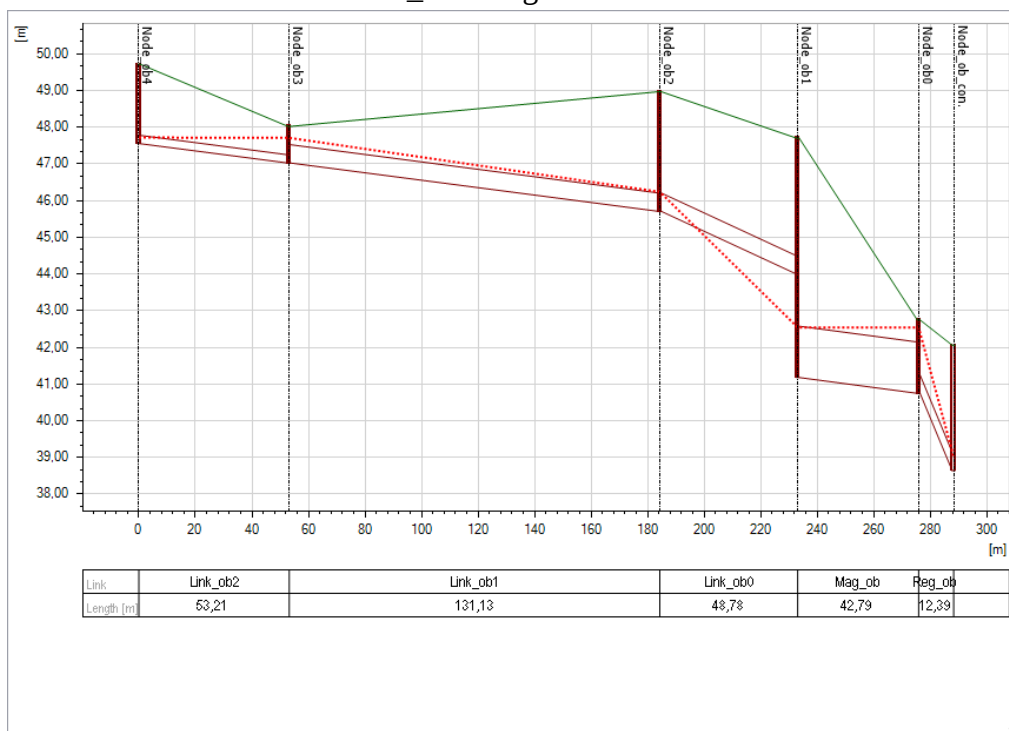


Figur A8. Magasin och delar av ledningsnätet i profil med trycklinje för referensregn för Farstaborg i Gustavsbergsmodellen.

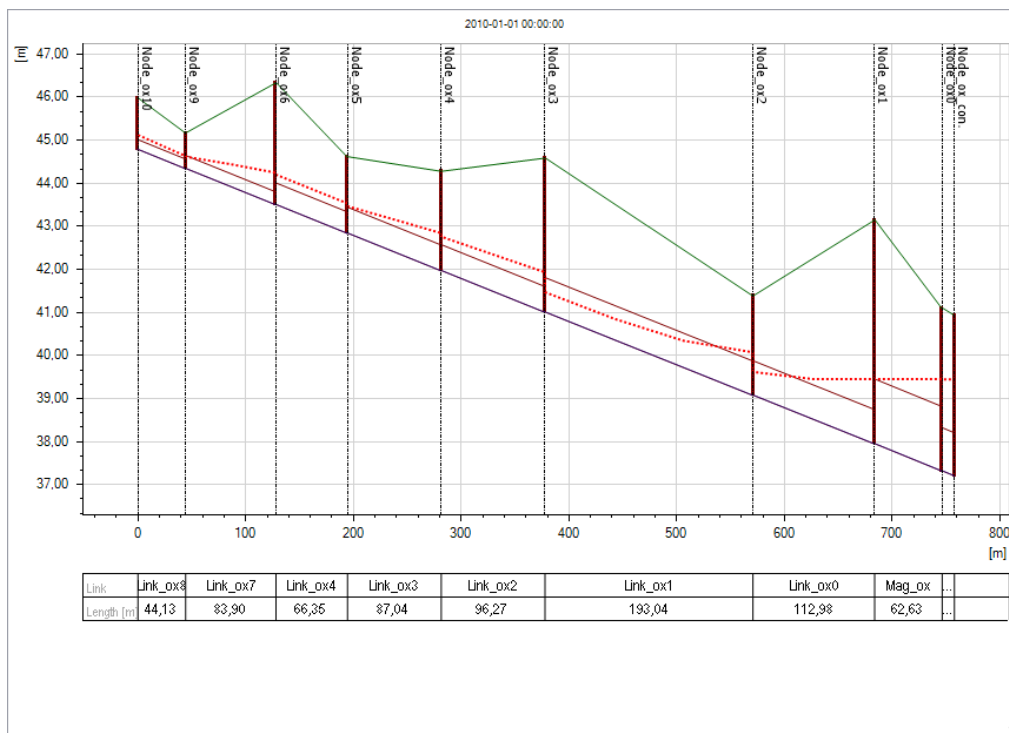


Figur A9. Trycklinje för referensregn nedströms från Farstaborg i Gustavsbergsmodellen.

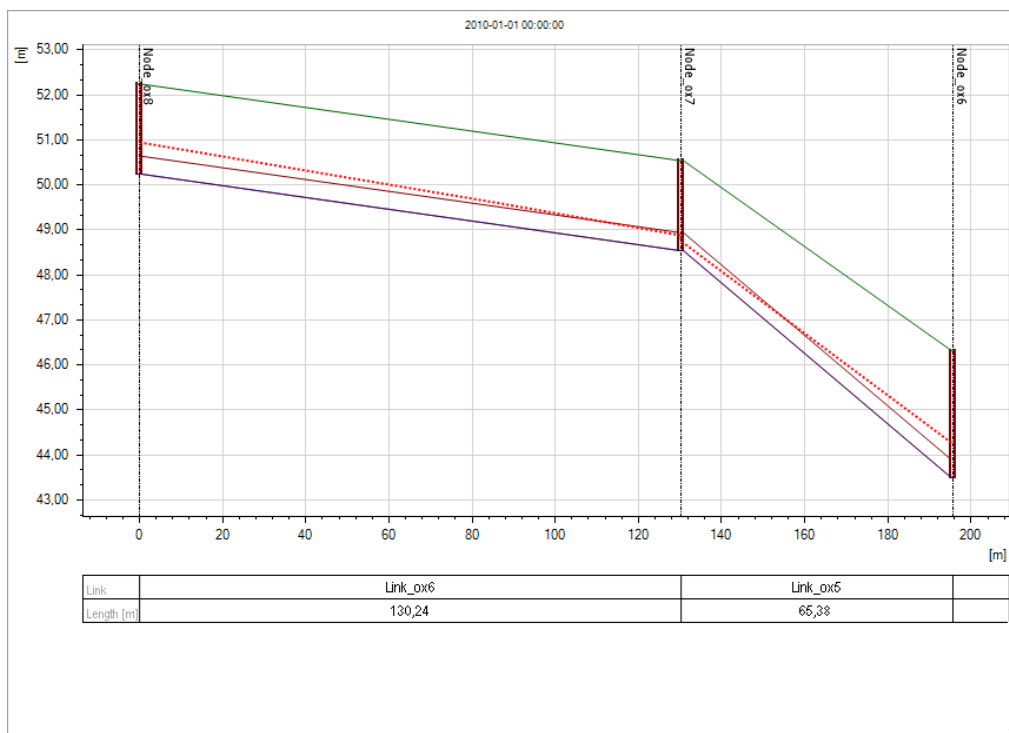
Lutningen i Observatoriet var inledningsvis för brant för att ledningarna skulle kunna anpassas efter markens lutning och därför angavs en fast *Downstream level*. Det är anledningen till nivåskillnaden är stor vid *Node_ob1* i Figur A10.



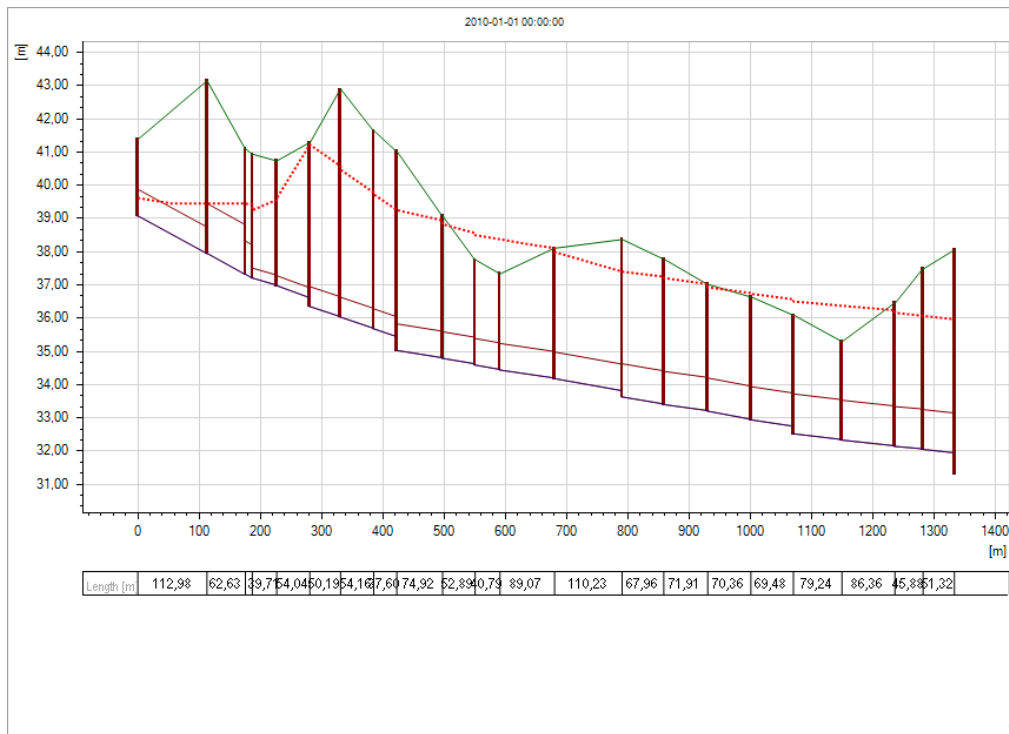
Figur A10. Magasin och delar av ledningsnätet i profil med trycklinje för referensregn för Observatoriet i Malmömodellen.



Figur A11. Magasin och delar av ledningsnätet i profil med trycklinje för referensregn för Oxievång i Malmömodellen.



Figur A12. En del av ledningsnätet i profil med trycklinje för referensregn för Oxievång i Malmömodellen.



Figur A13. Trycklinje för referensregn nedströms från Oxievång i Malmömodellen.

APPENDIX B – PROGRAMMERINGSKOD DATAHANTERING

Koden nedan användes för att skapa nya resultatfiler med mindre data. Resultatfiler i textformat hämtades från MIKE+ där en kolumn innehöll värden för ett magasin vattennivå. Nya resultatfiler skapades där endast de vattennivåer som var 3 cm högre än magasinens lägstanivå sparades. Mätvärden sparades från att vattennivån från ett magasin började stiga tills det att vattennivån var tillbaka till lägsta nivån. Det klassades som en regnhändelse.

```
# ----- #

# Datahantering av textfiler, Examensarbete VT24 DHI, Jonas Flensburg

# ----- Skapar lexikon med data från ASCII-filen ----- #

print("\nSTART RUN\n")

file = "waterlevel_modellB_regn1.txt"

f = open(file)

# Gör en lista med rätt antal kolumner
count = 0
for line1 in f:
    if count == 1: # Första raden innehåller nodernas namn
        name_columns = line1.split()
        count += 1
    elif count == 4: # Fjärde raden innehåller data
        columns1 = line1.split()
        count += 1
    elif count < 4:
        count += 1
    else:
        break # Behöver inte gå igenom all data

n_col = len(columns1) # Antal kolumner

result_dict = {} # Skapar ett lexikon

for i in range(n_col):
    result_dict[f"C{i}"] = [] # Varje kolumn (C) får en nyckel och en tom lista i lexikonet

l = open(file)

counterX = 0
for line2 in l: # För varje rad i tabellen
    counterX += 1
    columns2 = line2.split() # Delar upp data i en lista, en kolumn är ett element
```

```

    if counterX > 3: # För alla rader med data
        for index_col in range(len(columns2)): # För varje index i kolumnlistan, 0-
9.
            if index_col < 2: # Data i de första två kolumnerna kan inte omvandlas
till float-format
                result_dict[f"C{index_col}"].append(columns2[index_col]) # Läger
till rätt kolumnvärde till rätt nyckel
            else:
                result_dict[f"C{index_col}"].append(float(columns2[index_col]))
# Läger till rätt kolumnvärde till rätt nyckel

# ----- Sparar data från olika regnhändelser ----- #

all_dict_val = {} # Lexikon där regnhändelser sparas i separata listor för repektive
kolumn/nod
all_dict_index = {} # Lexikon där index för alla regnhändelser sparas

for key in result_dict: # För varje kolumn i tabellen
    if key == "C0": # Kolumn 0 anger datum
        pass
    elif key == "C1": # Kolumn 1 anger tid
        pass
    else:

        high_val = [] # Lista där alla värden som överstiger lägsta nivån läggs in,
rensas eftersom
        index_high_val = [] # Lista som är till för att hämta datum då höga värden
inträffar, rensas eftersom

        low_val = result_dict[key][0] + 0.03 # Magsinets lägsta nivå, adderar 3 cm
så att inte de minsta regnen registreras
        ### OBS! Lägsta nivån ovan blir bara rätt om det är ett lågt flöde då
mätningarna inleddes, dubbelkolla!
        step_counter = 0 # Räknar steg i for-loopen
        len_col = len(result_dict[key])

        all_dict_val[key] = []
        all_dict_index[key] = []

        for val in result_dict[key]: # För varje värde i varje kolumn
            step_counter += 1

            if val > low_val: # Värden som överstiger lägstanivån sparas
                if step_counter == len_col: # Om sista värdet i kolumnen överstiger
lägstanivån
                    high_val.append(val)
                    index_high_val.append(step_counter-1) # Detta anger index

```

```

        rain_lst = [x for x in high_val if x != 0] # Listan rensas på
nollor

        index_rain_lst = [x for x in index_high_val if x != 0]

        all_dict_val[key].append(rain_lst)
        all_dict_index[key].append(index_rain_lst)

        high_val = []
        index_high_val = []
    else:
        high_val.append(val)
        index_high_val.append(step_counter-1)

    else: # Om värden inte överstiger lägstanivån läggs '0' till i listan
        if len(high_val) == 0:
            high_val.append(0)
            index_high_val.append(0)
        elif high_val[-1] > 0: # När en regnhändelse är slut sparas dessa
värden separat i 'rain_dict'
            rain_lst = [x for x in high_val if x != 0] # Listan rensas på
nollor

            index_rain_lst = [x for x in index_high_val if x != 0]

            all_dict_val[key].append(rain_lst)
            all_dict_index[key].append(index_rain_lst)

            index_high_val = []
            high_val = []
        else:
            high_val.append(0)
            index_high_val.append(0)

# ----- Söker maxvärde i varje regnhändelse, samt dess datum ----- #

maxrain_dict = {} # Gör ett lexikon som sparar maxvärdet från varje regnhändelse
date_maxrain_dict = {}

for key_ in all_dict_val:

    maxrain_dict[key_] = []
    date_maxrain_dict[key_] = []

    for i in range(len(all_dict_val[key_])):

        max_value = max(all_dict_val[key_][i])
        maxrain_dict[key_].append(max_value)

```

```

        index_ = all_dict_val[key_][i].index(max_value)
        date_ = result_dict["C0"][all_dict_index[key_][i][index_]]
        date_maxrain_dict[key_].append(date_)

# --- Skapar resultatfiler --- #

file_name = f" results_modellB_regnl_{key_}.txt"
with open(file_name, "w") as file_:
    file_.write("Date\tMax water level [m]\n")
    for j in range(len(maxrain_dict[key_])):
        file_.write(f"{date_maxrain_dict[key_][j]}\t{maxrain_dict[key_][j]}\n")

# ----- #

print("\nEND RUN\n")

```

Nedanstående kod användes för att visualisera antalet överbelastningar i magasinen och för att skapa en resultatfil med skillnad i vattennivå för olika regnhändelser. Filerna *node_level* är textfiler med referensregnets nivå i magasinet och magasinets bottennivå.

```

# ----- #

# Skapar figurer och resultatfil med nivåskillnad med resultat från
'datahantering_exjobb', Examensarbete VT24 DHI, Jonas Flensburg

# ----- #

# För att koden ska funka och ge rätt resultat måste filnamn på resultatfiler vara
rätt och värden i node-level vara rätt

# ----- #

print("\nSTART RUN!\n")

import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd

file_name_lst = []

# basmodell B, ett magasin
file_name_lst.append(f"results_modellB_regnl_C{c}.txt")

# basmodell C, fyra magasin
#for c in range(2, 6):
#    file_name_lst.append(f"results_modellC_regnl_C{c}.txt")

# Gustavsberg, Lund, Malmö, två magasin
#for c in range(2, 4):

```

```

#     file_name_lst.append(f"2_results_C{c}_tullinge_B1.txt")

for j in range(len(file_name_lst)):

    data_node = pd.read_csv("node_level_tmC.txt", delimiter="\s+")
    max_level = data_node.at[j, "CDS-level"]
    bottom_level = data_node.at[j, "Bottom-level"]
    max_level -= bottom_level # Justerar maxnivån

    data = pd.read_csv(file_name_lst[j], delimiter="\t")

    time = data["Date"]

    water_level = []
    for l in range(len(time)):
        val = data.at[l, "Max water level [m]"]
        water_level.append(val-bottom_level) # Justerar värden på vattennivå

    plt.figure(figsize=(5, 3), dpi=300)
    bars = plt.bar(time, water_level, width=1, edgecolor='grey', color='grey')

    plt.xlabel('Datum', fontsize=5)
    plt.ylabel('Vattennivå [m]', fontsize=5)

    plt.title(f'Vattennivå i nod: {data_node.at[j, "Nod/mag"]}', fontsize=12)

    plt.xticks(time[::10], fontsize=4) # Ändrar hur datum presenteras
    plt.yticks(fontsize=4.5)
    plt.axhline(y=max_level, color='black', linestyle='--', linewidth=0.7,
label='Maxnivå referensregn') # Streckad linje

    diff_water_level = []
    redBars_h = []
    redBars_x = []
    n_flood = 0
    for t, bar in zip(time, bars):
        diff_water_level.append(round(bar.get_height()-max_level, 3))
        if bar.get_height() > max_level:
            n_flood += 1
            bar.set_color('maroon') # Ändrar färgen på staplar som överstiger den
streckade linjen

        redBars_h.append(bar.get_height())
        redBars_x.append(bar.get_x())

    # Läger till text med datum ovanför varje stapel som överstiger

```

```

plt.text(t, bar.get_height() + 0.035, t, ha='left', va='bottom',
bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.7, pad=0.4, linewidth=0.3), rotation=30,
fontsize=2)

print(f'Referensregnets maxnivå överstegs {n_flood} gånger för nod
{file_name_lst[j]}'.)

# Skapar fil där skillnad i vattennivå presenteras
data_copy = data.copy() # Kopierar för att undvika att ändra den ursprungliga
data_copy['Difference water level [m]'] = diff_water_level # Läger till den nya
kolumnen
data_copy.to_csv(f"diff_{file_name_lst[j]}", index=False) # Spara som CSV-fil

plt.legend(loc='upper right', bbox_to_anchor=(1, 1.08), ncol=1, fontsize=4)

plt.tight_layout()
plt.savefig(f"fig_{file_name_lst[j]}.png") # Spara figuren som en PNG-fil
#plt.show()

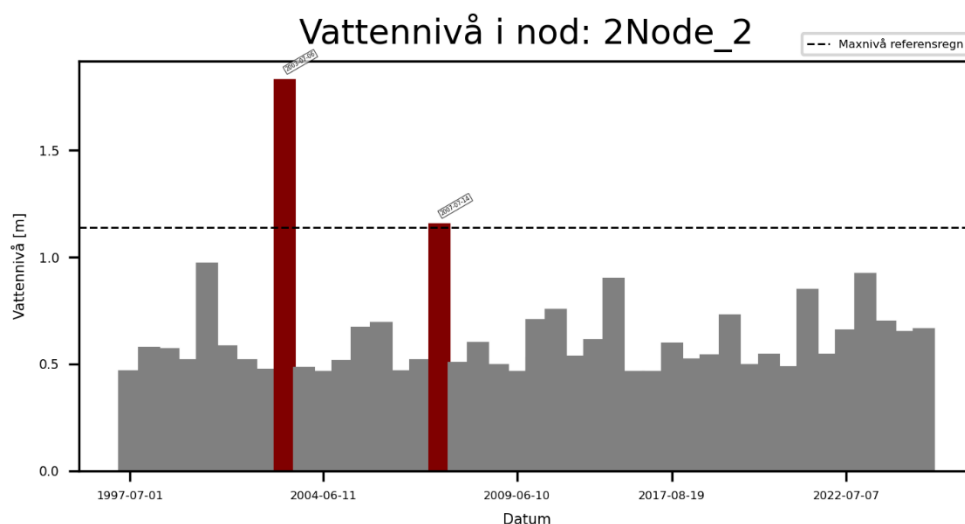
plt.close()

print("\nEND RUN!\n")

# ----- #

```

Ett exempel på hur antalet överbelastningar visualiserades med hjälp av koden presenteras i Figur B1.



Figur B1. Exempel på hur antal översvämningar visualiserades. Resultat från magasin C2 när basmodell C belastades med regndata från Växjö.

APPENDIX C – ÅTERKOMSTTID FÖR REGN VID DEN KRITISKA VARAKTIGHETEN

I basmodellen var det mellan 24 och 29 regn med högre återkomsttid än tio år som inte överbelastade magasinen, av dem var det enbart 2–4 som påträffades vid den kritiska varaktigheten (Tabell C1). Av dessa 2–4 regn var det max ett per mätserie som inte överbelastade magasinen vid kritiska varaktigheten och högsta återkomsttiden för dessa regn var 11,1 år (Tabell C1).

Tabell C1. Återkomsttid för de regn som var större än 10-årsregn vid kritiska varaktigheten och som inte överbelastade magasinen i basmodellen. Kritisk varaktighet baserades på historisk regndata.

Regnserie	Återkomsttid [år]				
	Magasin B1	Magasin C1	Magasin C2	Magasin C3	Magasin C4
Arvika	10,9	10,9	-	-	-
Gävle	10,2	10,9	10,9	10,9	10,9
Helsingborg	-	11,1	10,5	-	-
Hemling	-	-	-	-	-
Lund	-	-	-	-	-
Malmö	10,3	-	10,3	10,6	10,3
Tullinge	-	-	-	-	-
Växjö	10,5	10,5	-	-	-

APPENDIX D – SAMMANSTÄLLNING AV ANTALET ÖVERBELASTNINGAR

I Tabell D1 och Tabell D2 presenteras en sammanställning av antalet överbelastningar i magasin i basmodellen respektive de anpassade modellerna då de belastades med historiska regnserier. För att kunna jämföra regnserier med olika längd har ett jämförelsetal med antal överbelastningar per år tagits fram. Med hjälp av jämförelsetalen kunde ett genomsnittligt antal överbelastningar över en 30-årsperiod tas fram för samtliga magasin (Figur 13). Jämförelsetalet för varje magasin i basmodellen beräknades genom att för varje mätserie dela antalet överbelastningar med antalet år. Därefter beräknades ett medelvärde för alla dessa resultat, vilket sedan användes som jämförelsetal. För att erhålla antalet överbelastningar under en 30-årsperiod multiplicerades jämförelsetalet med 30.

Tabell D1. Sammanställning av magasinens överbelastningar samt genomsnittligt antal överbelastningar per år för magasinerna då basmodellen belastades med uppmätta regnserier.

Regnserie	Längd regnserie [år]	Magasin B1	Magasin C1	Magasin C2	Magasin C3	Magasin C4
Arvika	28	4	4	5	5	5
Gävle	28	5	6	5	6	5
Helsingborg	28	0	1	1	1	1
Hemling	28	3	3	3	2	3
Lund	23	7	8	7	7	7
Malmö	45	3	5	3	4	3
Tullinge	28	6	6	7	7	7
Växjö	28	1	1	2	2	2
Genomsnittligt antal överbelastningar per år		0,13	0,15	0,15	0,15	0,15

Tabell D2. Sammanställning av magasinens överbelastningar då de anpassade modellerna belastades med uppmätta regnserier.

Modell	Nederbördsdata	Längd mätserie [år]	Magasin	Antal översvämningar	Antal översvämningar per år
Gustavsberg	Tullinge	28	Kyrkogården	8	0,29
			Farstaborg	7	0,25
Lund	Lund	23	Pölen	9	0,39
			Sjön	8	0,35
Malmö	Malmö	45	Observatoriet	8	0,18
			Oxievång	7	0,16

APPENDIX E – ANALYS AV REGNHÄNDELSER

I Tabell E1 och Tabell E2 presenteras hur mycket vattennivån i de olika magasinen i basmodellen steg för varje regnhändelse som bidrog till översvämning. I tabellerna presenteras även regnens maximala återkomsttider som gavs vid specifika varaktigheter, antingen 15, 60, 120, 180, 360, 720 eller 1440 minuter. Den varaktighet som gav den maximala återkomsttiden presenteras också i tabellerna. I E1 finns information om de regn som översvämmade alla fem magasin i basmodellen. Samtliga regn har en högre återkomsttid än tio år.

Tabell E1. Skillnad i vattennivå jämfört med nivån från referensregnet, maximal återkomsttid samt den varaktighet som gav högsta återkomsttiden för de uppmätta regn som bidrog till överbelastningar i basmodellen.

Regnserie	Datum	Skillnad vattennivå [m]					Max återkomsttid [år]	Varaktighet [min]
		Mag B1	Mag C1	Mag C2	Mag C3	Mag C4		
Arvika	1996-08-24	0,53	0,51	0,78	1,03	0,95	27,4	360
	2006-07-29	1,41	1,27	1,47	1,52	1,46	49,1	60
	2021-07-14	1,25	1,13	1,34	1,4	1,35	27,4	120
	2022-07-22	1,48	1,33	1,51	1,56	1,5	54,5	60
Gävle	1997-07-02	1,59	1,4	1,57	1,6	1,55	88,5	60
	2006-08-15	0,14	0,19	0,18	0,1	0,16	14,2	60
	2019-09-01	0,13	0,18	0,25	0,23	0,27	16,3	60
	2021-07-07	0,95	0,82	1,16	1,27	1,2	21	60
	2021-08-18	2,14	1,79	1,83	1,76	1,76	494,9	180
Hemling	2006-08-15	0,11	0,21	0,09	0,02	0,09	14,8	120
	2017-08-07	1,7	1,47	1,61	1,63	1,59	108,4	120
Lund	2005-07-29	0,08	0,02	0,25	0,52	0,29	16,1	15
	2006-08-09	0,42	0,37	0,67	1,06	0,83	20,8	180
	2010-08-06	1,29	1,11	1,39	1,46	1,39	29,4	60
	2011-07-02	1,31	1,27	1,3	1,2	1,3	54,11	180
	2011-08-01	0,52	0,4	0,9	1,25	1,06	16,1	60
	2016-06-23	0,36	0,35	0,54	0,79	0,63	16,7	60
	2021-07-16	1,12	0,98	1,25	1,35	1,28	23,2	60
Malmö	1980-07-15	1,28	1,14	1,37	1,43	1,37	33	60
	1996-08-26	0,59	0,49	0,96	1,22	1,08	17,5	60
	2014-08-31	1,86	1,62	1,67	1,67	1,64	202	180
Tullinge	2002-08-15	1,37	1,22	1,43	1,49	1,43	44,1	60
	2003-07-22	0,54	0,46	0,73	1,04	0,87	17,3	60
	2003-08-12	0,2	1,16	0,53	1,01	0,66	15,1	60
	2014-08-03	0,14	0,17	0,21	0,15	0,19	12,9	60
	2016-07-09	0,41	0,31	0,78	1,23	0,97	19	15
	2019-08-05	1,42	1,31	1,46	1,48	1,46	46,8	120
Växjö	2003-07-06	0,35	0,27	0,69	1,15	0,87	16,8	15

I Tabell E2 presenteras de regnhändelser som överbelastade något men inte alla magasin i basmodellen. Dessa regnhändelser presenteras separat för att det finns en tydlig skillnad i hur de har påverkat de olika magasinen i basmodellen.

Tabell E2. Skillnad i vattennivå jämfört med nivån från referensregnet, maximal återkomsttid samt den varaktighet som gav högsta återkomsttiden för de uppmätta regn som bidrog till överbelastningar för något men inte alla magasin i basmodellen. Bindestreck innebär att magasinet inte har blivit överbelastat.

Regnserie	Datum	Skillnad vattennivå [m]					Max återkomsttid [år]	Varaktighet [min]
		Mag B1	Mag C1	Mag C2	Mag C3	Mag C4		
Hemling	2003-08-20	0,25	0,43	0,09	-	0,06	23,1	180
Gävle	2009-08-18	-	0,04	-	-	-	12,1	180
Helsingborg	2013-08-14	-	0,45	-	-	-	47,7	360
Lund	2010-08-14	-	0,07	-	-	-	15,43	360
Malmö	2003-07-18	-	0,08	-	-	-	13	120
Malmö	2010-08-14	-	0,21	-	-	-	26,9	360
Arvika	2000-07-05	-	-	0,01	0,04	0,02	10,9	60
Helsingborg	2002-06-29	-	-	0,06	0,24	0,09	9,17	360
Tullinge	2012-07-18	-	-	0,1	0,3	0,13	9,3	60
Växjö	2007-07-14	-	-	0,01	0,15	0,03	9,88	60
Gävle	1997-07-01	-	-	-	0,01	-	7,9	120
Malmö	2006-08-26	-	-	-	0,01	-	10,2	15

I Tabell E3 presenteras de regnhändelser som bidrog till överbelastningar i Gustavsbergsmodellen då den belastades med regnserien från Tullinge. Alla regn med återkomsttiden 10 år eller högre översvämde något av magasinen. Ett regn med återkomsttiden 9,29 år svämde över magasinet i Farstaborg.

Tabell E3 Skillnad i vattennivå jämfört med nivån från referensregnet, högsta återkomsttid samt den varaktighet som gav högsta återkomsttiden för de uppmätta regn som bidrog till överbelastningar i Gustavsbergsmodellen. Bindestreck innebär att magasinet inte har blivit överbelastat.

Datum för regnhändelse	Skillnad vattennivå [m]		Återkomsttid [år]	Varaktighet [min]
	Kyrkogården	Farstaborg		
2002-08-15	1,279	1,276	27,61	120
2003-07-22	0,638	0,767	17,28	60
2003-08-12	0,44	0,433	15,13	60
2014-08-03	0,163	0,029	12,88	60
2016-07-09	0,154	1,008	19,03	15
2019-08-05	1,388	1,003	46,82	120
1999-09-24	0,398	-	10,13	180
2010-07-29	1,281	-	24,78	360
2012-07-18	-	0,149	9,29	60

I Tabell E4 presenteras de regnhändelser som bidrog till översvämning i magasinen i Lund-modellen då den belastades med regndata från Lund. Ett regn med återkomsttiden 12,3 år vid varaktigheten 180 minuter bidrog inte till överbelastning av något magasin trots att de var anpassade för att klara 10-årsregn. I övrigt bidrog alla regn som hade en högre återkomsttid än tio år till överbelastning av minst ett magasin. Två regn med återkomsttiderna 7,29 år respektive 9,03 år bidrog till översvämningar i magasinet Pölen respektive Sjön trots att återkomsttiden var lägre än tio år.

Tabell E4. Skillnad i vattennivå jämfört med nivån från referensregnet, högsta återkomsttid samt den varaktighet som gav högsta återkomsttiden för de uppmätta regn som bidrog till överbelastningar i Lundmodellen. Bindesträck innebär att magasinet inte har blivit överbelastat.

Datum för regnhändelse	Skillnad vattennivå [m]		Återkomsttid [år]	Varaktighet [min]
	Pölen	Sjön		
2006-08-08	0,023	0,03	20,78	180
2010-08-14	0,003	0,059	15,43	360
2011-07-02	0,066	0,135	54,11	180
2016-06-23	0,057	0,04	16,66	60
2021-07-16	0,037	0,01	23,2	60
2005-07-29	0,012	-	16,07	15
2010-08-06	0,074	-	29,36	60
2011-08-01	0,037	-	16,09	60
2019-09-10	0,002	-	7,29	180
2013-08-14	-	0,019	10,63	720
2020-09-25	-	0,021	9,03	360
2023-08-07	-	0,189	59,9	1440

Magasinen i Malmö-modellen översvämmades av de regn som presenteras i Tabell E5. Ett regn från Malmös mätserie hade återkomsttiden 10,17 år vid varaktigheten 15 min men trots det var det inget av magasinen som blev överbelastade. Övriga regn i mätserien som hade en högre återkomsttid än tio år bidrog till överbelastning av minst ett magasin i Malmö-modellen. Ett regn med återkomsttiden 9,4 år översvämmade magasinet Observatoriet.

Tabell E5. Skillnad i vattennivå jämfört med nivån från referensregnet, högsta återkomsttid samt den varaktighet som gav högsta återkomsttiden för de uppmätta regn som bidrog till överbelastningar i Malmömodellen. Bindesträck innebär att magasinet inte har blivit överbelastat.

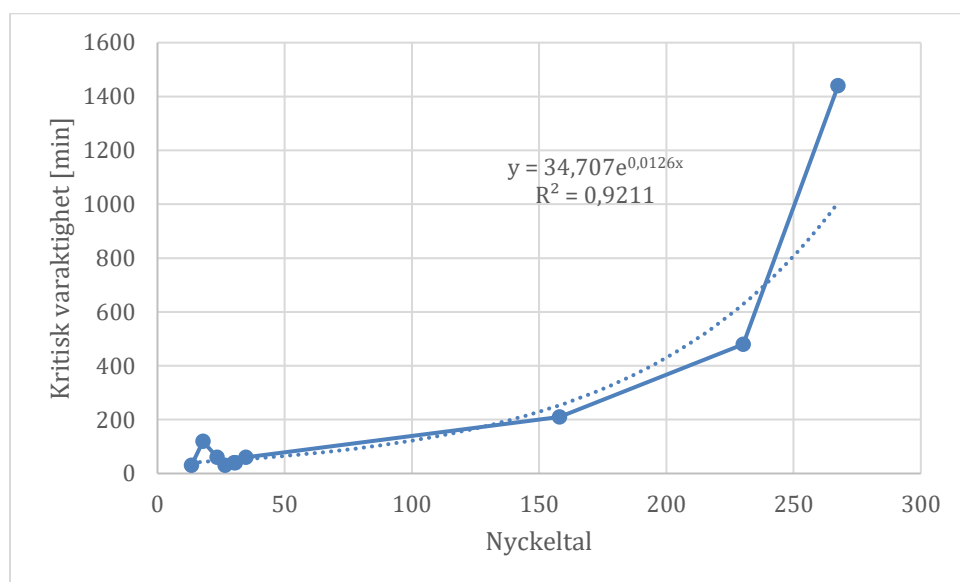
Datum för regnhändelse	Skillnad vattennivå [m]		Återkomsttid [år]	Varaktighet [min]
	Observatoriet	Oxievång		
1980-06-18	1,334	0,601	39,97	1440
1980-07-15	0,843	2,24	33,01	60
2003-07-18	0,152	0,692	13,00	120
2010-08-14	1,075	1,46	26,92	360
2014-08-31	2,214	3,554	201,98	180
1987-07-19	0,269	-	9,4	360
1994-09-16	1,017	-	15,63	720
2007-07-05	0,998	-	19,32	720
1996-08-26	-	1,108	17,49	60
2004-07-09	-	0,094	10,28	60

APPENDIX F – SAMBAND MELLAN KRITISK VARAKTIGHET OCH NYCKELTAL

Kritiska varaktigheten varierade mellan olika magasin, det föreslagna nyckeltalet presenterades för att kunna förklara dessa skillnader. Det fanns ett samband mellan parametrarna vilket kunde påvisas med en trendkurva, den kan i sin tur användas för att uppskatta kritisk varaktighet när ett dagvattenmagasin dimensioneras. Det fanns alternativa metoder för att ta fram nyckeltalet och sambandet som presenteras i detta avsnitt. Det tillvägagångssätt som valdes för att ta fram sambandet var det som gav högst R^2 -värde. Det tillvägagångssätt som valdes för att ta fram nyckeltalet var det som gav högst R^2 -värde och bedömdes samtidigt som det enklaste att tillämpa. R^2 -värdet för trendkurvan som presenteras i resultatet (Figur 17) var 0,936. Det alternativa nyckeltalet som valdes bort undersöktes främst för att det gav en enhet som var mer korrekt från ett vetenskapligt perspektiv. Det alternativa nyckeltalet beräknades genom att byta plats på täljare och nämnare, se Ekvation F1.

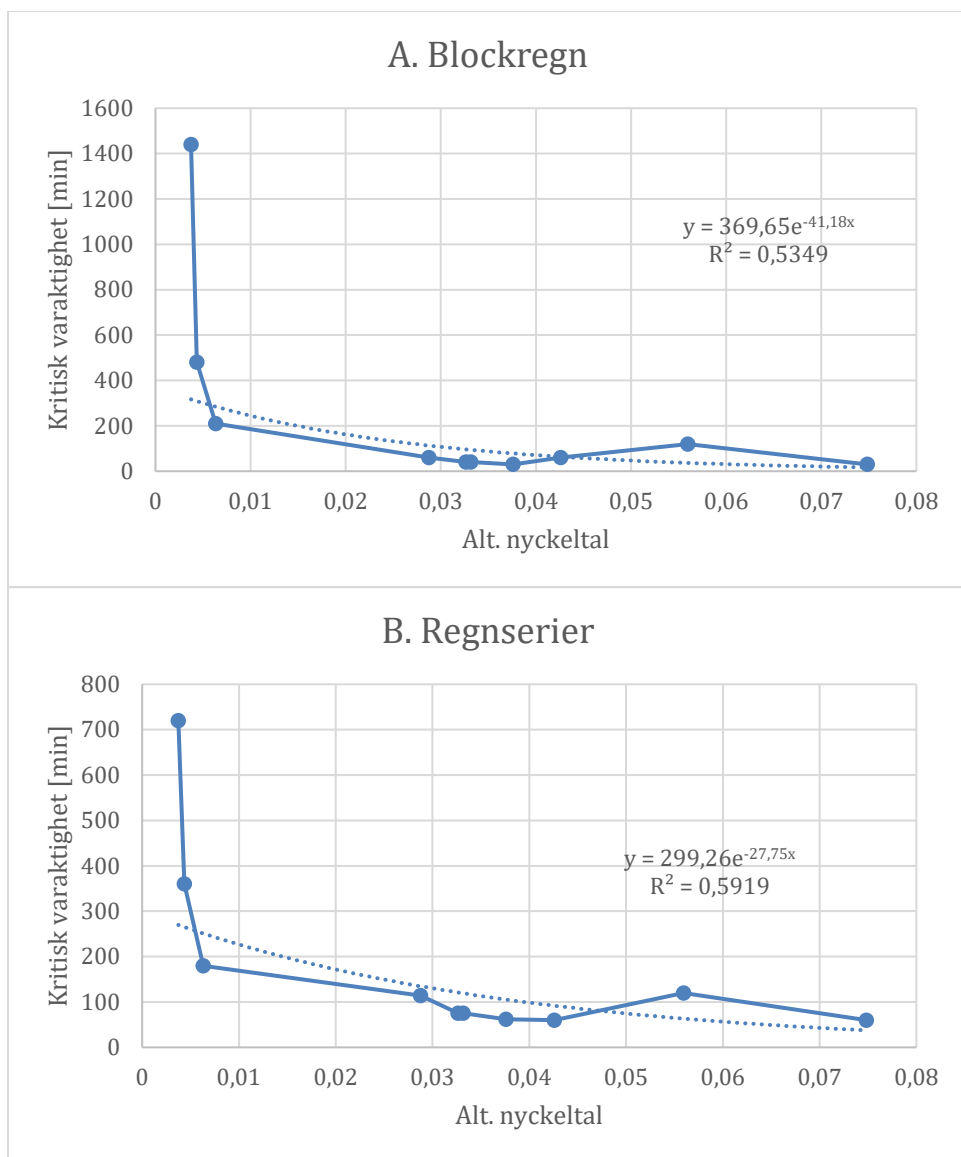
$$\frac{\text{Maxflöde utlopp} \left[\frac{m^3}{s} \right]}{\text{Reducerad area} [ha]} = \text{Alt. nyckeltal} \left[\frac{m^3}{s \cdot ha} \right] \quad (F1)$$

I Figur F1 presenteras trendkurva och R^2 -värde för sambandet mellan nyckeltal och kritisk varaktighet som tagits fram baserat på blockregn. Detta R^2 -värde var lägre än det som presenteras i resultatet (Figur 17) där kritisk varaktighet baserades på historisk regndata. Kritisk varaktighet som baserat på historiska regn bedömdes samtidigt som ett bättre val än blockregn då det har en starkare koppling till verkligheten.



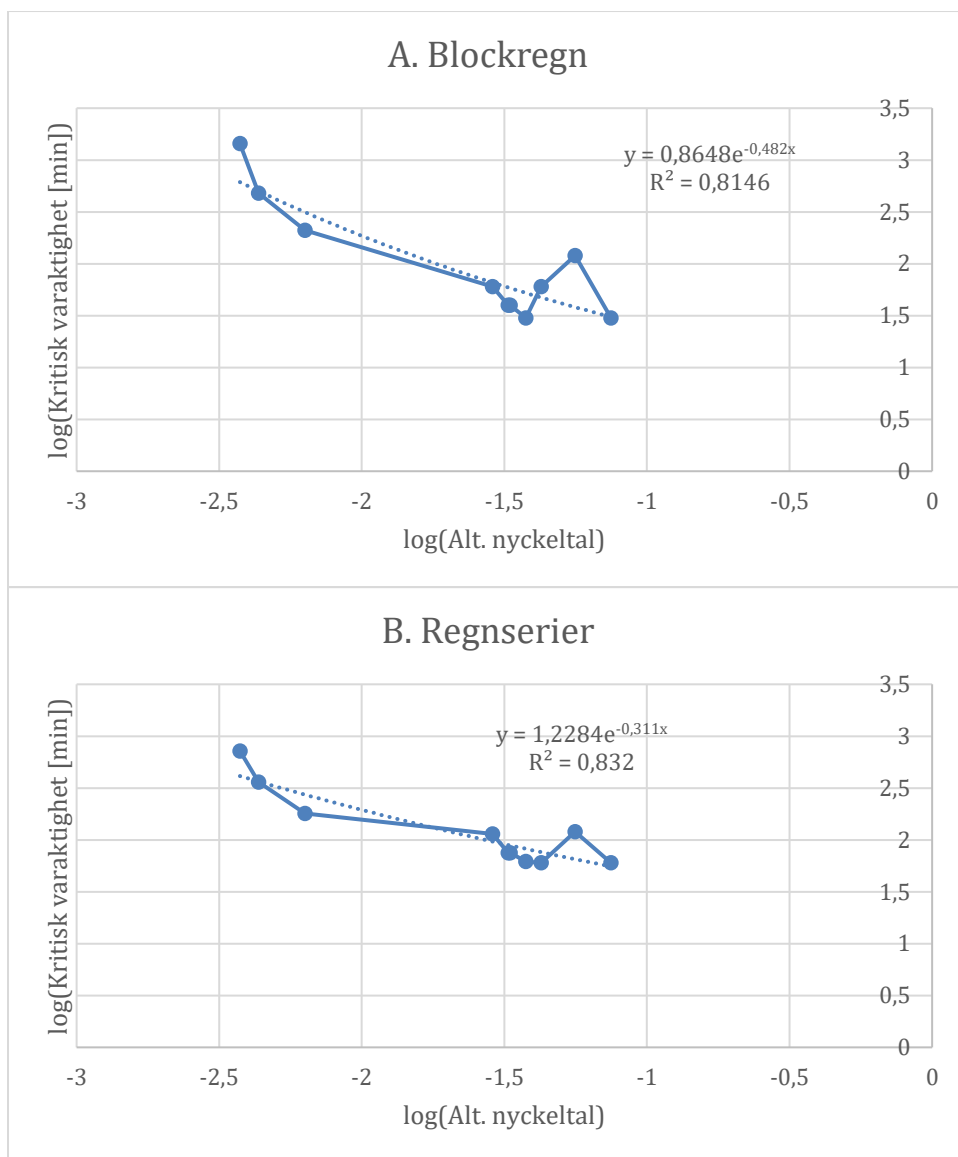
Figur F1. Trendkurva och R^2 -värde för sambandet mellan nyckeltal och kritisk varaktighet som baserats på blockregn.

I Figur F2 presenteras trendkurva och R^2 -värde för sambandet mellan alternativt nyckeltal och kritisk varaktighet som tagits fram baserat på blockregn i Figur F2A och historiska regn i Figur F2B.



Figur F2. Trendkurva och R^2 -värde för sambandet mellan alternativt nyckeltal och kritisk varaktighet. (A) Kritisk varaktighet baserades på blockregn. (B) Kritisk varaktighet baserades på historiska regnserier.

I Figur F3 presenteras trendkurva och R^2 -värde för sambandet mellan alternativt nyckeltal och kritisk varaktighet som tagits fram baserat på blockregn i Figur F3A och historiska regn i Figur F3B. Skillnaden från Figur F2 är att värden för nyckeltal och de kritisk varaktighet är logaritmerade.



Figur F3. Trendkurva och R^2 -värde för sambandet mellan logaritmerade alternativa nyckeltal och logaritmerade kritiska varaktigheter. (A) Kritisk varaktighet baserades på blockregn. (B) Kritisk varaktighet baserades på historiska regnserier.

APPENDIX G – POÄNGSYSTEM FÖR KRITISK VARAKTIGHET

Ett poängsystem användes för att fastställa den kritiska varaktigheten då den baserades på historisk regndata. Tabell G1 visar hur poäng tilldelades för magasinen i Gustavsbergsmodellen när den belastades med regnserien från Tullinge. Den varaktighet som studerades var 60 min. Varje rad i tabellen motsvarar ett verkligt regn och regnets återkomsttid baseras på den bestämda varaktigheten samt medelnederbördsintensitet för den varaktigheten (Figur 10). Det regn som hade längst återkomsttid fick lägst poäng. Poängen från de regn som orsakade överbelastning i respektive magasin sammanställdes och omvandlades till ett medelvärde. Kritiska varaktigheten utgjordes av den varaktighet som resulterade i lägst medelpoäng för ett magasin. Kritiska varaktigheten för Farstaborg var 60 min eftersom ingen annan varaktighet kunde resultera i en lägre medelpoäng (Tabell G1).

Tabell G1. Exempel som förklarar poängsystemet som användes för att fastställa kritisk varaktighet baserat på historisk regndata. Innehållet visar poängen som Gustavsbergsmodellens magasin tilldelades när regnserien från Tullinge användes som indata. Regn studerades utifrån varaktigheten 60 min.

Datum Tid	Återkomsttid [år]	Poäng
2002-08-15 15:15	44,12	1
2019-08-05 15:30	29,12	2
2003-07-22 20:30	17,28	3
2003-08-12 13:45	15,13	4
2014-08-03 03:15	12,88	5
2016-07-09 13:45	12,45	6
2012-07-18 09:15	9,29	7
2005-08-06 13:45	8,19	8
2011-08-10 11:30	7,88	9
1996-09-12 14:30	7,18	10
2010-07-29 14:00	4,96	11
2019-08-10 22:30	3,92	12
2004-08-03 03:15	2,93	13
1999-09-24 06:45	2,82	14
2016-08-29 06:30	2,62	15
2013-08-09 01:15	2,57	16
2010-08-07 15:30	2,33	17
1999-07-14 19:00	2,24	18
2000-07-12 18:15	2,24	19
2021-06-23 11:45	2,11	20
2003-07-12 05:00	1,98	21
2008-08-09 16:45	1,75	22
2005-08-26 02:30	1,43	23
2019-08-06 09:15	1,28	24
2004-08-13 04:15	1,1	25
2010-07-24 20:00	1,07	26
2014-08-07 03:15	1,07	27
2013-07-10 10:00	0,83	28
2017-08-31 02:00	0,76	29
2020-07-30 15:00	0,76	30
2021-10-21 13:30	0,74	31
1996-07-09 19:15	0,58	32
1997-07-26 15:15	0,58	33
2000-10-06 06:45	0,55	34
2021-07-07 05:30	0,55	35
2008-06-22 23:00	0,53	36
2023-08-04 13:30	0,5	37
2007-07-12 08:30	0,48	38
2022-08-20 05:00	0,48	39
2008-08-08 03:30	0,43	40

Poäng	
Kyrkogården	Farstaborg
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
11	7
14	

Medelvärde poäng	
Kyrkogården	Farstaborg
5,75	4

Överbelastade magasin:
Kyrkogården & Farstaborg
Endast Kyrkogården
Endast Farstaborg

Varaktighet: 60 min