



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 24035

Examensarbete 30 hp

juni 2024

Skyfallsmodellering

en jämförelse av metoder och känslighetsanalys för val
av regn

Astrid Magnusson



Abstract

Heavy rainfall cause flooding and can be dangerous for human health and safety. With climate change, the occurrence of heavy rainfall is increasing and several municipalities in Sweden are working on their readiness for heavy rainfall by carrying out flood assessment. This can be done with different levels of detail, with different software's and accuracy of variables in the models, where the purpose of the analysis is the guiding factor for the level of detail that should be performed.

Two software's were used to make a quantitative evaluation of two different levels of detail for flood assessment. A simplified analysis in SCALGO Live where mapping of low points and land use was performed. It was compared with a detailed analysis performed in HEC-RAS for analysing the runoff over the surface considering land use and topography. The analyses used rainfall events with 100- and 200-year return periods, 4 h duration and climate factor 1.4. The comparison shows that the different models describe the flooding differently. The simplified analysis is quick and good for general analysis while the detailed one provides more values for the flood with larger extent of the flooding with 0.28 km² for the 100-year rain and 0.33 km² for the 200-year rain.

A sensitivity analysis was performed in HEC-RAS regarding the choice of rain where the time variance and choice of rain statistics were studied. A total of ten different rains were studied, eight of which were produced using rainfall statistics from Dahlström (2010) and two from SMHI (2017). Design storms was CDS with skewness factors $r = 0.37, 0.5$ and 0.75 and uniform rainfall. The studied return periods were 100- and 200-years. The sensitivity analysis shows that a higher skewness factor increases the extent and flow of the runoff. Also, the uniform rainfall and the rain statistics from SMHI gives less rain and flooding then the CDS with Dahlström statistics while having the same return period and duration.

Key words: Heavy rainfall, flood assessment, hydraulic modelling, surface runoff, SCALGO Live, HEC-RAS

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten

Uppsala universitet, Utgivningsort Uppsala

Handledare: Anna Thorsell och Ingela Filipsson Ämnesgranskare: Benjamin Fischer

Examinator: Antonio Segalini



Referat

Skyfall orsakar översvämningar som kan ge stor påverkan på människor och våra samhällen. Med klimatförändringar ökar förekomsten av skyfall och flera kommuner i Sverige jobbar med sin beredskap mot skyfall genom att utföra skyfallsanalyser. Skyfallsanalyser kan göras med olika detaljeringsnivå, med olika mjukvaror och noggrannhet på variabler i modellerna, där syftet med analysen är den styrande faktorn för vilken nivå som bör användas.

Två programvaror användes för att göra en kvantitativ utvärdering av två olika detaljnivåer för skyfallsanalys. En förenklad analys i SCALGO Live där kartering av lågpunkter och markanvändning utfördes. Den jämfördes med en detaljerad analys utförd i HEC-RAS för analys av avrinningens flöde över ytan med hänsyn till markens egenskaper samt topografi. I analyserna användes regn med 100 och 200 års återkomsttid, 4 h varaktighet och klimatfaktor 1,4. Jämförelsen visar att de olika modellerna beskriver vattnets rörelse över marken olika vilket främst ger skillnader i översvämningens utbredning i flödesvägar. Den förenklade analysen är snabb och bra för översiktlig analys medan den detaljerade ger fler värden för översvämningen med större utbredning med 0,28 km² för 100-årsregnet och 0,33 km² för 200-årsregnet.

En känslighetsanalys utfördes i HEC-RAS med avseende på val av regn där regnens tidsvarians och val av regnstatistik studerades. Totalt studerades tio olika regn varav åtta var framtagna med regnstatistik från Dahlström (2010) och två från SMHI (2017). Typregnen var CDS-regn med skevhetsfaktorerna $r = 0,37, 0,5$ och $0,75$ samt blockregn med konstant regnintensitet. Studerade återkomsttider för regnen var 100 och 200 år. Känslighetsanalysen visar att en högre skevhetsfaktor ökar flödet, volymen och utbredningen av avrinningen. Vidare ger blockregnen och SMHI:s regnstatistik betydligt mindre regn, flöden och översvämningar än CDS-regnen med Dahlströms regnstatistik trots samma återkomsttid och varaktighet.

Nyckelord: Skyfall, skyfallsanalys, hydraulisk modellering, avrinning, SCALGO Live, HEC-RAS

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten

Uppsala universitet, Utgivningsort Uppsala

FÖRORD

Med detta examensarbete avslutar jag mina studier på civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik på Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet, SLU. Mina handledare var Anna Thorsell och Ingela Filipsson från Structor Mark Uppsala. Min ämnesgranskare var Benjamin Fischer från institutionen för geovetenskaper; Luft-, vatten, och landskapslära; Hydrologi, Uppsala universitet.

Jag vill tacka Anna och Ingela för handledningen och all hjälp i det dagliga arbetet med projektet och rapporten. Tack för att jag fått sitta på kontoret och blivit inkluderat i gänget på Structor. Tack också till min ämnesgranskare Benjamin för stöd och bra feedback under arbetets gång. Till sist vill jag tacka alla vänner och kursare som förgyllt min studietid.

POPULÄRVATENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Extremväder ökar i takt med att klimatförändringar ökar. De extremväder som blir allt vanligare är bland annat värmeböljor, stormar och extrema regn i form av skyfall. Skyfall är kraftiga regn som leder till översvämningar. Dessa intensiva regn utgör allvarliga risker för människors hälsa och säkerhet, samtidigt som de orsakar betydande ekonomiska skador på samhällen. I Sverige arbetar många kommuner aktivt med att förbättra sin beredskap genom att utföra skyfallsanalyser.

Skyfallsanalyser är verktyg för att förstå och hantera de effekter som skyfall kan ha på ett område. Dessa analyser kan variera i detaljeringsgrad beroende på syftet. Två olika typer av analyser jämfördes i denna studie: en förenklad analys och en detaljerad analys.

Förenklad Analys med datorprogrammet SCALGO Live: Denna metod kartlägger lågpunkter och markanvändning för att ge en översiktlig bild av översvänningsrisken. Modellen är statisk vilket innebär att flöden inte kan beskrivas. Modellen ger svar på vid vilka lågpunkter vatten från skyfallet lägger sig samt vilken väg vattnet tar mellan lågpunkterna.

Detaljerad Analys med datorprogrammet HEC-RAS: Denna metod analyserar hur vatten rör sig över markytan, med hänsyn till markens egenskaper och topografi. Modellen är dynamisk vilket innebär att den har en tidsaspekt. Det gör att vattnets hastighet och flöde kan beskrivas. Förutom lågpunkter och flödesvägar visas också bland annat utbredningen av flödet mellan lågpunkter.

För att utföra jämförelsen användes två typer av regn med 100- och 200-års återkomsttid, en varaktighet på 4 timmar och en klimatfaktor på 1,4. Återkomsttid är ett begrepp som beskriver hur ofta en extremhändelse kan förväntas inträffa. Ett regn med 100-års återkomsttid har en sannolikhet att inträffa minst en gång på hundra år eller sannolikhet på 1 % under ett år. Varaktighet är hur länge regnet pågår och klimatfaktor är en uppskattning på hur regnintensiteten kan förväntas öka i framtiden med ökade klimatförändringar. Resultaten visade att de olika modellerna gav olika bilder av hur vattnet rör sig över marken där den detaljerade analysen visade en större översvänningsutbredning, men skillnaderna i medeldjupet på översvämningarna var små. Det blev också en viss skillnad på vart översvämning uppstod mellan modellerna. Den förenklade analysen är snabb och lämplig att använda i översiktliga karteringar och tidiga skeden för att identifiera riskområden. Den detaljerade analysen lämpar sig bättre för att studera flöden och översvänningsutbredning som ligger närmare verkligheten.

Modeller har alltid en osäkerhet i sig, därför utfördes också en känslighetsanalys på den detaljerade modellen i HEC-RAS. I en känslighetsanalys studeras hur stor påverkan som ges i resultatet från modellen när en viss variabel ändras. Variabeln som studerades i känslighetsanalysen var val av regn.

Totalt studerades tio olika regnscenarier, varav åtta baserades på statistik från Dahlström (2010) och två från SMHI (2017). SMHIs data visade lägre regnmängder jämfört med Dahlströms, alltså hur många millimeter regn som faller under regnets varaktighet. De olika regnscenarierna var också uppdelade i olika typregn. Typregn är förenklade representationer av verkliga regnhändelser. De valda typregnen som studerades var CDS-regn (Chicago Design Storm) och blockregn. CDS-regn har en intensiv topp under regnet och de kännetecknas av en skevhetsfaktor (r) som anger hur symmetrisk regnet är fördelat över tiden. Blockregn har en konstant intensitet över hela varaktigheten. Typer av regn som användes var: CDS-regn med skevhetsfaktorerna $r = 0,37, 0,5$ och $0,75$ framtagna med Dahlström samt CDS-regn med $r = 0,5$ framtagna med SMHI-statistik. Blockregn framtagna med Dahlström-statistik. Känslighetsanalysen visade att en högre skevhetsfaktor ökade både flödet, volymen och utbredningen av översvämningen. Därför visar den att val av regn är en styrande variabel i skyfallsanalyser när modeller i exempelvis HEC-RAS utförs.

Skyfall är ett allvarligt och växande problem i en tid av klimatförändringar. Genom att använda avancerade analysverktyg kan kommuner förbereda sig för de ökade riskerna. Denna studie visar att val av analysmetod påverkar resultatet och vilka effekter som kan förväntas av ett skyfall. Denna studie kan ge ytterligare information om vilken metod som bör användas beroende på syftet med utredningen. Den förenklade analysen är snabb och bra för översiktlig analys av fallstudieområdet medan den detaljerade ger fler värden för översvämningen med större utbredning. Studien visar också betydelsen av att förstå hur val av regn påverkar resultaten av dessa analyser och att beroende på typregnens utformning och val av regnstatistik påverkas översvämningen trots samma varaktighet och återkomsttid.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1.	INLEDNING	1
1.1	SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR	6
2.	METOD.....	8
2.1	FALLSTUDIE - KOPPARLUNDEN.....	8
2.2	FÖRENKLAD ANALYS - SCALGO LIVE.....	8
2.3	DETALJERAD ANALYS - HEC-RAS.....	10
2.3.1	Terrängdata.....	12
2.3.2	Markanvändning och råhet.....	13
2.3.3	Infiltrationsmodul.....	15
2.3.4	Randvillkor – gränsvärden	15
2.3.5	Strukturer i modell, kulvertar	16
2.3.6	Beräkningsmetod för instabilt flöde	17
2.3.7	Beräkningsnät och val av tidssteg	18
2.4	REGN	20
2.4.1	Typregn.....	22
2.4.2	Profillinjer	24
2.5	ANALYS AV ÖVERSVÄMNING FRÅN MODELLER	25
3.	RESULTAT.....	26
3.1	SKILLNAD MELLAN FÖRENKLAD OCH DETALJERAD ANALYS.....	26
3.2	KÄNSLIGHETSANALYS.....	32
3.2.1	Flöde.....	33
3.2.2	Ackumulerad volym.....	34
3.2.3	Utbredning och djup.....	36
4.	DISKUSSION	40
4.1	JÄMFÖRELSE MELLAN METODER.....	40
4.2	KÄNSLIGHETSANALYS.....	43

4.3	FELKÄLLOR OCH ANDRA FAKTORER.....	44
4.3.1	HEC-RAS.....	44
4.3.2	Infiltration.....	46
4.3.3	Regn	47
5.	SLUTSATS.....	48
6.	REFERENSER.....	49
7.	BILAGOR	53

1. INLEDNING

Med ett alltmer förändrat klimat till följd av klimatförändringar ökar förekomsten av skyfall. Konsekvenser av skyfall kan bli väldigt kostsamma för samhället och därför behöver det tillämpas åtgärder för att öka beredskapen mot skyfall (MSB 2023). Ett skyfall är enligt SMHI ett regn där 50 mm faller på en timme eller 1 mm på en minut (SMHI 2023b), det kan också definieras som den nederbörd som inte kan tas omhand av dagvattennätet (Salomonsson et al. 2017; MSB 2023).

IVL Svenska Miljöinstitutet och Svensk Försäkring har sedan 2015 kartlagt svenska kommuners klimatanpassningsarbete. I rapporten från 2023 visar det sig att av de svarande kommunerna, vilket var 194 stycken, var det 91 % som uppfattat att de påverkats av klimatförändringar och extremväder (Hennlock et al. 2023). Bedömning av konsekvenser för översvämningar bör göras med de två utgångspunkterna, sannolikheten för översvämning samt vilka konsekvenser en översvämning skulle ge (Boverket 2022). Vem som ansvarar för att säkerställa att dessa konsekvenser hanteras regleras i svenska lag och är delat på flera aktörer där landets kommuner har det yttersta ansvaret (MSB 2023).

En bra utgångspunkt för att identifiera risker av skyfall är att utföra en skyfallsanalys. Detta kan göras med olika noggrannhetsnivå vilket bör bestämmas utifrån syftet med analysen. De olika noggrannhetsnivåerna utgår alla från att identifiera lågpunkter som kan fyllas med vatten vid ett skyfall. Ytterligare noggrannhet kan fås genom att identifiera hur avrinning från skyfall rör sig över terrängen genom att identifiera markens råhet med markanvändning och markens genomsläpplighet. Ännu större noggrannhet fås om ytterligare analys görs genom att studera hur avrinningen rör sig när ledningsnätet tar hand om en del av avrinningen.

Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) utförde på uppdrag av regeringen 2022 en handledning för hur analyser ska genomföras *Metod för skyfallskartering av tätorter* (MSB 2023). I handledningen kategoriserar MSB skyfallsanalys i tre nivåer, förenklad analys, detaljerad analys samt fördjupad analys. Dessa beskrivs även i *Vägledning för skyfallskartering: tips för genomförande och exempel på användning* (MSB 2017) där kategorierna beskrivs som kartering av lågpunkter, kartering av markavrinning samt kartering av markavrinning och ledningsnät. För att bestämma vilken metod som är lämplig för analys måste syftet vara definierat (MSB 2017, 2023).

I en förenklad analys undersöks höjddata för att se vilka lågpunkter som kan förväntas bli vattenfyllda med utgångspunkt från topografin i området. Modeller för förenklad analys är

statiska vilket innebär att inget tidsförlopp beaktas i modellen. Modellen och analysen är snabb men på bekostnad av att den inte tar hänsyn till dynamiska förlopp med olika regnintensiteter eller flöden. Eftersom den inte har något tidsförlopp går det inte att studera de dynamiska förloppen utan analysen baseras på en viss volym vatten som läggs på höjdmodellen. Flödesvägar visas men inte utbredningen eller själva storleken på flödet. Att modellen är enkel medför också att den data som läggs in i modellen bör vara mer konservativ, osäkerheten är stor och det måste tas höjd för i indata (MSB 2017, 2023). En mjukvara som kan användas för förenklad analys är SCALGO Live. Programmet är webbaserat och tillhandahåller variabler som beskriver markförhållanden och användaren kan även själv ändra i markförhållanden. Det medför att programmet blir visuellt och snabbt (Scalgo u.å.d). Warzecha och Dudek-Klimiuk (2021) visar att mjukvaran SCALGO Live är snabbt och lättförståeligt och är därför bra för att göra en första utredning över området. De uppmärksammar särskilt att det är ett bra sätt att få reda på vart vatten flödar i terrängen. En nackdel med SCALGO Live är att det finns begränsningar i beräkningarnas tillförlitlighet (Warzecha & Dudek-Klimiuk 2023).

Detaljerad analys utförs i en tvådimensionell (2D) hydraulisk modell med tidsaspekt där vattnets rörelse över marken beskrivs med fysiska principer. Tidsaspekten innebär att det går att applicera olika regn på modellen och se hur de påverkar översvämning. Tidsaspekten gör också att det är möjligt att studera flöden och hur vattnet rör sig över marken. För att ta hänsyn till markanvändning, infiltration och ledningsnät görs schablonavdrag av regnet, alternativt används infiltrationsmoduler. Eftersom avdraget bara är en uppskattning av verkligheten måste osäkerheten i avdraget tas med i analysen (MSB 2017, 2023). Tidigare 2D-hydrauliska modeller har utförts i program som HEC-RAS och MIKE+ med flera och i programmen används olika funktioner för att beskriva avrinningens rörelse när nederbörd läggs i modellen (Ennouini et al. 2024). HEC-RAS är en mjukvara som utvecklats av *US Army Corps of Engineers*. Mjukvaran är gratis och framtagen för att utföra en- och tvådimensionella flödesberäkningar samt sedimenttransport i vattendrag (Brunner 2024). Studier där HEC-RAS använts visar att modellen behöver kalibreras mot kända förhållanden för att validera resultat. HEC-RAS används främst för modellering av flöden i vattendrag så som floder men kan även användas för modellering av skyfall över hela avrinningsområden (Zeiger & Hubbart 2021).

Fördjupad analys kan ses som en påbyggnad av den detaljerade. För dessa analyser görs en kopplad modell där både marken beskrivs som i den detaljerade analysen men även en modell

över ledningsnätet inkluderas. Detta kräver mer tid samt kunskap om området som ska analyseras. Eftersom modellen är mer kostsam bör också variabler i modellen vara mindre konservativa än för de andra analyserna (MSB 2023).

För att skapa modeller behövs data för att beskriva området. Den data som används i skyfallsmodeller är höjddata, markanvändning, jordarter, information om ledningsnät och information om nederbörden för platsen. Markanvändning och jordarter ger information om vilka avrinningskoefficienter och råheter respektive vilken infiltration som ska läggas som indata (MSB 2023). Vilken noggrannhet som finns på inlagda variabler i modellen ger påverkan på resultaten. En faktor som påverkar modellen är terrängdata som används där Zeiger & Hubbart (2021) rekommenderar att ha så hög upplösning som möjligt för 2D-hydrodynamiska modeller över urbana områden. Zeiger & Hubbart (2021) säger att i urbana miljöer är det svårt att fånga upp rinnvägarna för vattnet med terrängdata med exempelvis 1x1 m upplösning. Med en upplösning på 1x1 m är detaljeringsgraden i höjddata är inte tillräcklig vilket ger felkällor i analysen. Zeiger & Hubbart (2021) påpekar också att andra problem med modellering över urbana områden är dagvattennätets påverkan på översvämningen inte är möjlig att få med i en 2D-hydrodynamisk modell.

Vilket regn som läggs på modellen påverkar markavrinningen och det finns flera metoder för att ta fram regn till modeller. För att få modellen att vara representativ behövs ett regn som utgår från lokala förhållanden och som kan representera framtida scenarion. I Sverige har SMHI det främsta ansvaret att ta fram sådan statistik (MSB 2023).

Intensiteten på regn beror på återkomsttid och varaktighet. Återkomsttid är ett mått på hur ofta ett regn mest sannolikt kommer inträffa. Ett regn med 10-, 50- eller 100-års återkomsttid kommer rent statistisk hända en gång var tionde, femtionde och hundra år. Sannolikheten att ett 100-årsregn faller under ett år är därför 1 %. Det betyder dock inte att det inte kan falla mer än ett 100-årsregn under samma år. Sannolikheten ackumuleras över åren vilket innebär att sannolikheten att 100-årsregn faller på 2 år är 2 % och över 100 år är det 63 %. Detta är särskilt viktigt att beakta vid framtidsplanering (Salomonsson et al. 2017). Varaktigheten på regnet är ett mått på hur länge regnet pågår. För den förenklade analysen går det inte att ha med varaktigheter för regn eftersom tidsaspekten inte finns i modellen. I stället används en viss regnvoly. För att räkna ut volymen kan modellområdets koncentrationstid användas. Koncentrationstid är den tid det tar för vatten att rinna igenom avrinningsområdet via den längsta rinnvägen. Den ackumulerade volymen från ett regn med en viss varaktighet och återkomsttid läggs på den förenklade modellen. Något att ta hänsyn till är dock att en

nederbördsvolym är kopplad till både återkomsttiden och varaktigheten, en viss volym kan alltså vara samma men återkomsttiden och varaktigheten är olika. Exempel ges av MSB (2023) att 30 mm regn kan motsvara både ett 100-årsregn med 10 min varaktighet eller ett 10-årsregn med 2 h varaktighet.

För att få fram intensiteten av regn anpassade för den plats analysen ska utföras på krävs kännedom om nederbördstatistik. Den mest använda regnstatistiken som används i Sverige kommer från Dahlström (2010) rapport *Regnintensitet – En molnfysikalisk betraktelse* (Dahlström 2010; Svenskt Vatten 2011). Senare statistik för nederbörd har sedan tagit fram av Olsson et al. (2017) och Dahlström (2018). I den senare framtagna statistiken har regionala uppdelningar gjorts för att bättre representera nederbörden. Statistiken från Dahlström (2010) är framtagen för återkomsttider upp till 10 år men har använts för återkomsttider upp till 100 år av Svenskt Vatten (2011). Nederbördstatistiken av Olsson et al. (2017) samt Dahlström (2018) är framtagen för återkomsttider upp till 200 år. Vid jämförelse av de olika metoderna har det visats att Dahlström (2010) är på den säkra sidan för dimensionering av dagvattenanläggningar då den ger en generellt större regnintensitet. För de nyare metoderna behöver mer validering och utvärdering göras. De kan komma att ersätta Dahlström (2010) i framtiden (SMHI & Svenskt Vatten 2020).

Typregn är teoretiska regn som ofta används för att dimensionera dagvattensystem och undersöka översvämningsrisker. Eftersom regnen är teoretiska är de inte en korrekt beskrivning av verkligheten. En viktig aspekt i framtagandet av typregn är hur nederbörden varierar med tiden (Krvavica & Rubinić 2020). Det vanligaste typregnet i Sverige är det så kallade *Chicago Design Storm* (CDS) där intensiteten för en viss varaktighet beskrivs i flera blockregn över den totala varaktigheten (Svenskt Vatten 2011). I dagsläget finns inga rekommendationer på hur regnen ska utformas eller hur de bör variera med tiden, vilken tidsvarians som ska användas, i modellering av skyfall (Krvavica & Rubinić 2020; MSB 2023). Från statistik framtagen av SMHI från svenska regn finns observationer som kan användas för att designa regnen. De säger bland annat att för regn med längre varaktighet (>60 min) kommer intensitetmaximum ofta i början av regnet och för regn med varaktighet längre än 90 min kommer intensitetmaximum oftast i mitten (Olsson et al. 2017). Resultat av Chen et al. (2023) som studerat CDS-regn med olika tidsvarians visar att med längre återkomsttider blir översvämningen större när intensitetsmaximum kommer i regnets senare halva, dock blir skillnaderna i översvämningens maximum mindre när återkomsttiden är längre. Chen et al. (2023) rekommenderar därför att ha intensitetmaximum i slutet av regnets

då det ger en större översvämning och därför är bättre för att identifiera områden som kan påverkas av ett skyfall. Från resultaten av Krvavica och Rubinić (2020) visar de att typregn vars utformning utgår från tidsvariansen av lokala regn är mer representativa än exempelvis CDS-regn. Ett exempel som användes av Krvavica och Rubinić (2020) är metoden för genomsnittlig variabilitet där observerade nederbördstillfällen delades upp i mindre tidsintervaller. Dessa intervaller rankades efter hur mycket regn som föll i varje intervall. Genom att genomsnittligt ranka intervallen för alla valda nederbördstillfällen kunde de skapa ett mönster för ett typiskt skyfall. Dessa kan uppskattas genom analys av uppmätta regnmängder (Krvavica & Rubinić 2020). Muhandes et al. (2023) har studerat feluppskattningar i typregn och visade att typregn kan underskatta den faktiska volymen av regnet vid dess intensitetmaximum jämfört med observerade regn.

En annan aspekt med skyfallsanalyser är den delen av nederbörden som inte blir avrinning utan infiltrerar ner i marken eller avleds till ledningsnät. Enligt MSB:s handledning (2023) bör ett schablonavdrag göras för ledningsnätet om regn med återkomsttider längre än 100 år studeras. För regn med kortare återkomsttid har ledningsnätet större betydelse och ska dessa händelser undersökas bör en fördjupad analys utföras. Beroende på när dagvattennätet är byggt är det dimensionerat enligt olika standarder (MSB 2023). Rekommendationer i Svenskt Vatten P110 för nya ledningar är att de ska ha kapacitet för regn med 10-års återkomsttid i bebyggda områden som avser centrum och affärsområden, där trycklinjen för marknivå ska klara ett 30-årsregn (Svenskt Vatten 2016).

Modeller kan aldrig visa verkligheten utan är en approximation av den. Oftast har regnhändelserna som modelleras inte skett i verkligheten. Det medför att det inte finns data och observationer att kalibrera modellen mot. Därför är känslighetsanalys en bra metod för att se hur robust indata är (Gao et al. 2021). I en känslighetsanalys studeras vilka indata som ger stor påverkan på modellen och då är viktiga att ha större noggrannhet på. Anni et al. (2020) visar till exempel att genom att inte göra något avdrag för de vatten som leds bort med ledningsnätet kan översvämningens volymer överskattas med en faktor åtta. Samma studie av Anni et al. (2020) visar också att felaktig representation av infiltrationen kan underskatta översvämningens volymer med en tredjedel. Å andra sidan rekommenderar inte MSB (2017) att göra en känslighetsanalys på infiltration om jorden består av mestadels icke genomsläppliga jordarter. Om marken inte är genomsläpplig och regnet är intensivt är det inte relevant att studera olika scenarion för infiltration. Detta då infiltrationen förmodligen är näst intill obefintlig under tiden regnet pågår (MSB 2017). Beroende på analysens syfte har variabler

olika stor vikt i modellen. Om ens intressen är för vattenvolymer visar Xing et al. (2021) att nederbörd är den faktorn som påverkar mest. Om intresset är för flödet och dess utbredning skriver samma författare att beräkningsnätet är en viktig variabel. Beräkningsnätet storlek beskriver upplösningen av beräkningspunkter i modellen. Andra variabler så som markanvändning och råhet visar sig påverka i samma storleksordning. Markens råhet är en beskrivning av friktionen från olika markanvändningar vilket påverkar vattnets hastighet över marken. Vägar och dess råhet har dock en större påverkan då det är den huvudsakliga rinnvägen i urbana områden (Xing et al. 2021).

Vid skyfallskarteringar är det ofta det maximala vattendjupet på översvämningen som granskas. Det menar Gao et al. (2021) kan vara missvisande vid risk och konsekvensanalys av översvämningar då översvämningens tidsvariation också har påverkan. De visar att skador från översvämning ökar ju längre tid ett område är översvämmat. Exempelvis skulle översvämningens maximala djup intill en byggnad kunna gå till 2 m men vilka konsekvenser de har för byggnaden beror på hur länge vattnet blir stående (Gao et al. 2021).

1.1 SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR

Syftet är att undersöka hur stora skillnader det blir på resultaten från en förenklad och detaljerad analys. Med förenklad analys menas en statisk modell med kartering av lågpunkter. Med fördjupad analys menas en 2D-hydrodynamisk modell med beskrivning av markanvändning och tidsaspekt. Det ska undersökas genom att på ett kvantitativt sätt jämföra resultaten från två olika modeller för förenklad och detaljerad analys och göra en bedömning av vad som medför skillnaderna. För den detaljerade analysen ska en känslighetsanalys göras med utgångspunkt på val av regn. De variabler som undersöks i känslighetsanalysen är skillnader i översvämningens flöde, ackumulerad volym samt utbredning och djup. Modellerna utförs som en fallstudie vilket utgår från avrinningsområdet till Kopparlunden i Västerås.

Frågeställningarna som ska besvaras är: (1) Vad blir det för skillnader i översvämningens utbredning och djup mellan förenklad och detaljerad analys i fallstudien? Vad är anledningen till skillnaderna? Från känslighetsanalysen (2) Hur val av typregn och regnstatistik påverkar översvämningens flöde, ackumulerade volym samt utbredning och djup i den detaljerade analysen?

För att begränsa projektet kommer skillnaderna i känslighetsanalysen fokusera på en skyfallsväg inom fallstudieområdet. De resultat som kommer studeras är flöde, ackumulerad volym samt utbredning och djup av avrinning som passerar flödesvägen.

2. METOD

För att besvara de två frågeställningarna utfördes modellering i SCALGO Live och HEC-RAS. Eftersom MSB (2023) gett ut sin handledning om hur skyfallsanalyser ska utföras i syfte att ge likvärdiga skyfallsanalyser i landet användes den som underlag till variabler så långt som möjligt.

2.1 FALLSTUDIE - KOPPARLUNDEN

Den här studien utgick från fallstudieområdet Kopparlunden vilket ligger i centrala Västerås. Området byggdes under sent 1800-tal för industrier och under 1990-talet började andra verksamheter etableras i området. Området har pekats ut som riksintresse för kulturmiljövården. I dagsläget utförs en upprustning av Kopparlunden med blandad bebyggelse av gamla och nya byggnader för bostäder, förskolor och arbetsplatser. Under området finns en kulverterad bäck som tar emot vatten från ett stort område norr om Kopparlunden (Västerås stad u.å.; Nordlöf 2021).

Avrinningsområdet som analyserna utgått ifrån togs fram med hjälp av verktyget *Watershed – depression-Free Flow* i SCALGO Live. *Depression-Free Flow* är en analys som ger flödesvägar när alla lågpunkter är fyllda vilket gör att inget mer vatten kan samlas i området och alla flödesvägar för vattnet går till slutet av avrinningsområdet. När *Depression-Free Flow* används tillsammans med *Watershed* fås det maximala avrinningsområdet med utgångspunkt från topografen (Scalگو u.å.a). Punkten för beräkning av avrinningsområdet sattes intill Metallverksgatan vilket är en genomfartsgata som går igenom Kopparlunden. En översikt av avrinningsområdet visas i figur 1.

Storleken på avrinningsområdet är 14,6 km². Markanvändningen inom avrinningsområdet består till stor del av naturlig mark som skog, växlighet och öppen mark (62 %) och exploaterad mark (37 %), karteringen är framtagen av SCALGO Live med utgångspunkt från Naturvårdsverkets nationella marktäckedata, Lantmäteriet, Trafikverket och Jordbruksverket. Jordarten inom avrinningsområdet består till största del av lera (52 %) och sandig morän (30 %), framtaget från data av Sveriges geologiska undersökning (SGU).

2.2 FÖRENKLAD ANALYS - SCALGO LIVE

För den förenklade analysen användes SCALGO Live. SCALGO Live är ett webbaserat verktyg för topografisk analys som visar lågpunkter rinnvägar och avrinningsområden. I programmet är platsspecifika data inlagt av SCALGO vilket hämtas från relevanta källor så

som myndigheter. För Sverige är data hämtad från Lantmäteriet, Naturvårdsverket, SGU med flera. Höjddata i SCALGO Live är främst tagen från Lantmäteriets *Markhöjdmodell*, *Nedladdning*, *grid +1* vilket är en raster med upplösningen 1x1 m. För att ta hänsyn till byggnader är huskropparna tillagda med hjälp av Lantmäteriets *Byggnad*, *Nedladdning*, *vektor*. Utifrån byggnadernas placering har platser med byggnader höjts med 10 m över högsta angränsande marknivå. Detta är gjort för att säkerställa att vatten inte rinner över platser med byggnader. Markanvändningen är framtagen av Scalgo Live med maskininlärning som utgått från data av Lantmäteriet, Trafikverket och Jordbruksverket. Markanvändning är kategoriserad i tio grupper. Varje grupp är tilldelad en siffra för att ge förklaring vid nedladdning av rasterdata (Scalgo u.å.c).

För att beräkna hur vattnet rör sig över terrängen använder SCALGO Live en algoritm kallad "åtta närliggande metoden" (eng. *eight-neighbours method*, *D8*). Metoden utgår från att topografin från de åtta närmaste rastercellerna runt varje cell jämförs. Algoritmen fungerar så att vattnet som läggs i varje cell rör sig mot den närliggande cell som ger den brantaste lutningen nedåt och bort från den aktuella cellen. Om den aktuella cellen är lägre än de åtta närliggande cellerna ges cellen samma värde som sin lägst liggande granne och vatten flödar då mot cellen (esri u.å.).

Verktyget *Flash Flood Map* i SCALGO Live visar vart avrinningen kommer flöda samt vart den samlas. Det vatten som läggs på modellen är lika fördelat på alla celler i hela området. Vattnet rör sig nedströms över ytan och fyller lågpunkter, dessa visas genom att aktivera lagret för översvämmade ytor (eng. *Flooded Areas*). När en lågpunkt är fylld flödar vattnet vidare till nästa lågpunkt. Flödesvägarna mellan lågpunkter visas genom lagret för ackumulerat flöde (eng. *Flow Accumulation*). En effekt av att det inte finns någon tidsvarians i modellen är att sträckan mellan lågpunkter inte har någon påverkan på flödesvägen, det kommer vara en flödesväg hur lång den än är. Flödesvägarna har heller ingen utbredning utan visas endast som en linje. Tjockleken på linjen beror dock på hur stort avrinningsområdet som bidrar med avrinning till flödesvägen är. Det område som bidrar med vatten i en lågpunkt räknas till dess avrinningsområde. Avrinningsområdet kan förändras beroende på volymen vatten som läggs på ytan och visas med lagret avrinningsområde (eng. *Watershed*) (Scalgo u.å.b).

Avdrag för infiltration och ledningsnät är inbyggd i SCALGO Live vilket utgår från markandvändning och jordartskartor från SGU. Infiltrationen bestäms efter curve number (CN) funktioner. CN är ett värde mellan 30 och 100 där ett högt CN ger en större avrinning (Scalgo u.å.b). Avrinningsmodellen med CN är en amerikansk metod framtagen av *US Soil*

Conservation Service och utgår från ett empirisk framtaget förhållande mellan regn och avrinning. Förhållandet beror på två parametrar CN och initial abstraktion (eng. *initial abstraction*) λ där λ är proportionell faktor för nederbörden som inte blir till avrinning som oftast sätts till 0,2 (Scalgo 2023). CN beror i sin tur på markens egenskaper och hämtas som tabellvärden (Garen & Moore 2005; Scalgo 2023). Metoden togs fram under 1950-talet och är en empirisk metod som är vanlig att använda i modellering för avrinning då den är enkel att använda och väl accepterad inom området. Garen och Moore (2005) påpekar dock att metoden har stora osäkerheter då den inte tar hänsyn till alla flödesvägar, ovan och under mark, vilket bör beaktas när metoden används.

SCALGO Live har något modifierade CN och beskriver dessa som CN-p för att särskilja de från de ordinarie värdena. Värdena för avrinningen är framtagna genom modellering av CDS-regn (Chicago Design Storms) med olika återkomsttider där avrinningen är den del av regnet som inte infiltrerar i marken. För att ta reda på infiltrationen används Hortens ekvation. De framtagna CN-p värden är inbyggda i modellen men kan ändras manuellt genom att skapa en egen arbetsyta (eng. *workspace*) i SCALGO Live. För hårdgjorda ytor så som asfalterade vägar och liknade infiltrerar inte vatten ned i marken utan avdraget motsvarar avvattning av ytor till brunnar och ledningar. Genom anpassningar av CN funktioner till undersökningar av avrinning från hårdgjorda ytor vid flera olika CDS-regn har CN-p tagits fram för även dessa ytor av SCALGO (Scalgo 2023).

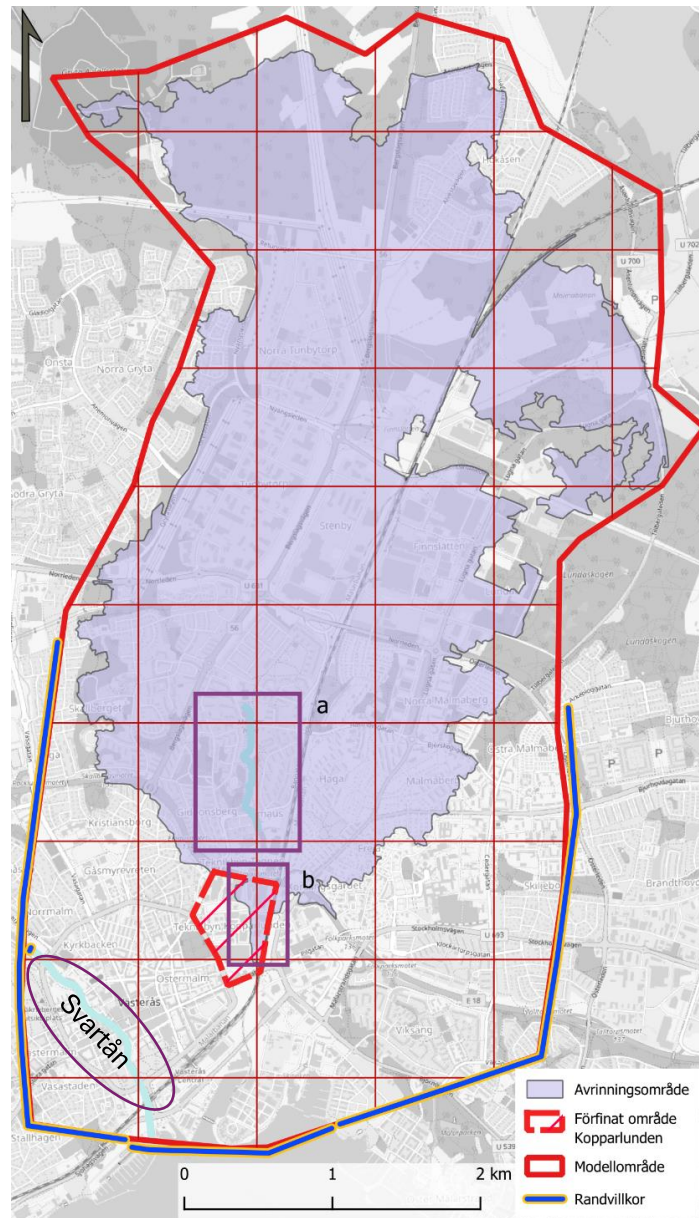
2.3 DETALJERAD ANALYS - HEC-RAS

För den detaljerade analysen användes HEC-RAS version 6.4.1. Modellen som skapades i HEC-RAS var en 2D hydraulisk modell för ojämna flöden (eng. *2D Unsteady Flow Model*). De variabler som lades till i modellen var terrängdata, markanvändning med Manningstal och infiltration, gränsvärden, beräkningsnät och till sist nederbörd (tabell 1).

Tabell 1. Indata till HEC-RAS modell med källor för inhämtning

Indata	Detaljer	Källa
Projektion	EPSG:3010: SWEREF99 16 30	Spatial Reference 2024Spatial Reference 2024
Terräng, höjddata	Terrain upplösning 1x1 m. SWEREF99 16 30. Tillagda byggnader 2 m.	SCALGO Live, hämtad [2024-04-11]
Markanvändning	Land cover. Upplösning 4x4 m SWEREF99 16 30	SCALGO Live, hämtad [2024-02-22]
Manningstal (M)	Tabell 10 i Vägledning Metod för skyfallskartering av tätorter	MSB 2023
Avrinningskoefficient	Tabell 4.8 och 4.9 i Avledning av dag- drän- och spillvatten	Svenskt Vatten 2016
Jordlager	GE.Jordarter 1:25 000-1:100 000: Jordarter 1:25 000-1:100 000	SCALGO Live, hämtad [2024-02-22] Data från SGU
Infiltration	CN-p tal framtaget av SCALGO	Scalgo 2023
Break lines	Egen uppskattning från vägnät	Markanvändning, land cover SCALGO Live

Modellområdet definierades med utgångspunkt från avrinningsområdet till Kopparlunden framtaget med *Water shead tool – depression free flow* i Scalgo Live beskrivet i avsnitt 2.1. Figur 1 visar en översikt av modellområdet. Detaljer om modellen presenteras i detta avsnitt (2.4). Utmärkt i figur 1 med ruta a och b är de områden som presenteras i figur 3 och 5.



Figur 1. Modellområde i HEC-RAS. Markerat avrinningsområde (blå skuggning) framtaget med Water shed tool – depression free flow i SCALGO Live. Beräkningsnät med 20x20 m upplösning samt förfinat område kring Kopparlunden 2,2x2,2 m (rött) och randvillkor (blått). Rutor med a och b markerar områden för kommande figur 3 och 5. Bakgrundskarta Open street Map från QGIS.

2.3.1 Terrängdata

Den terrängdata som använts i HEC-RAS modellen är hämtad från SCALGO Live och kommer från Lantmäteriet *Markhöjdmodell, grid +1*. Tidigare studier av Mustafa och Szydłowski (2021) och David och Schmalz (2020) har studerat representationen av byggnader där två alternativ kan nyttjas i HEC-RAS. Första är att höja upp byggnaderna i terrängmodellen och det andra är att inte ha med byggnaderna i terrängen och i stället lägga ett extremvärde för Manningstal över byggnader. Det andra alternativet ska ge en så pass hög skrovlighet vid platsen för byggnader att vattnet passerar runt byggnaden. Vid validering av

strategierna visar Mustafa och Szydlowski (2021) att båda alternativen fungerar bra, alternativet med Manningstal ska vara särskilt bra när det inte finns en tillräckligt högupplöst terrängmodell att använda (Mustafa & Szydlowski 2021). En annan studie av David och Schmalz (2020) beskriver att när alternativet med upphöjda byggnader används tolkar HEC-RAS den snabba förändringen i terrängen som ett djupt dike och därför fylls beräkningscellerna intill byggnaden med ett extremt vattendjup. Därför rekommenderar författarna att använda metoden med Manningstal (David & Schmalz 2020). Båda metoderna testades i HEC-RAS och efter de resultat som erhöles valdes alternativet med upphöjda byggnader som de mest representativa för denna studie. Metoden med Manningstal gav en icke representativ översvämning på platser med byggnader, se bilaga A.

För att inte få en så drastisk höjning i terrängen användes inte höjdmodellen där korrigering skett för byggnader av SCALGO med byggnader som höjts med 10 m. I stället gjordes en egen korrigering där platser med byggnader höjdes med 2 m. Detta gjordes i QGIS genom att kombinera terrängdata och markanvändning med hjälp av *Raster calculator*.

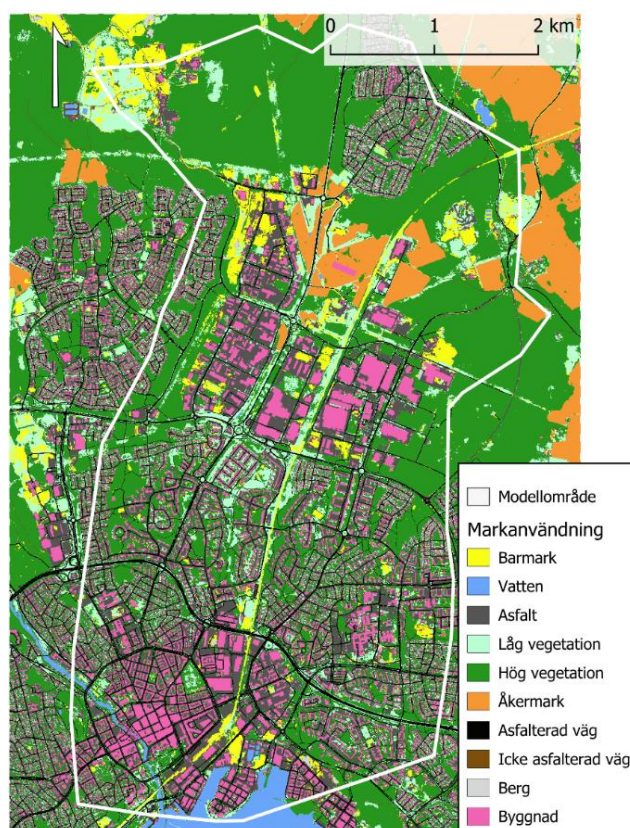
2.3.2 Markanvändning och råhet

Markanvändningen, och dess råhet är viktiga variabler för att beskriva vattnets rörelse i modellen. I denna modell hämtades markanvändningen från SCALGO Live genom nedladdning av *Land Cover* som raster med upplösning 2x2 m. För att filen skulle kunna läggas in i HEC-RAS behövde den tilldelas attribut för de olika klassarna av markanvändningen i QGIS (figur 2). Därefter lades filen in i HEC-RAS där markanvändningen tilldelas värden för råheten och avrinningskoefficienter (tabell 2).

Råheten beskrivs med Manningstal (M) vars värden hämtades från vägledningen av MSB (2023) för de olika markanvändningarna. Ett högt värde på M innebär att materialet har en låg råhet vilket gör att avrinningen får en högre hastighet över ytan. I HEC-RAS används Mannings n [$\text{s/m}^{1/3}$] vilket beräknas med $n = 1/M$. För lagret med markanvändning lades även avrinningskoefficienten till vilket är ett värde mellan 0 och 1 som beskriver hur stor andel av nederbörden som förväntas bli avrinning på ytan. Värden för koefficienterna hämtades från Svenskt Vatten (2016) P110, se tabell 2.

Tabell 2. Beskrivning av markanvändning med Mannings n [$s/m^{1/3}$] (MSB 2023) och avrinningskoefficienter (Svenskt vatten 2016).

Markanvändning	Mannings n [$s/m^{1/3}$]	Beskrivning MSB	Avrinningskoefficient	Beskrivning P110
Barmark	0,050	Övrig öppen mark	0,2	Grusplan obebyggd kvarter
Vatten	0,020	Vattenytor	0,1	Inget angett värde
Övrig asfalterad yta	0,025	övriga vägar hårdgjorda ytor	0,8	Betong asfaltsytor
Icke asfalterad väg	0,050	Övrig öppen mark	0,4	Grusväg
Låg vegetation	0,050	Övrig öppen mark	0,1	Odlad mark, gräsyta mm
Hög vegetation	0,200	Skog	0,1	Park med rik vegetation
Åkermark	0,200	Åkermark	0,1	Odlad mark
Asfalterad väg	0,014	Vägar	0,8	Betog, asfaltyta
Berg	0,033	Berg i dagen	0,3	Berg i dagen utan stark lutning
Byggnad	0,020	Takytor	0,9	Tak



Figur 2. Översikt över markanvändning som användes för tillägg av råhet samt avrinningskoefficienter. Värden hämtade från SCALGO Live Land cover.

2.3.3 Infiltrationsmodul

För att få med infiltrationen i marken läggs ett infiltrationslager till i modellen. Lagret kombinerar markanvändningen och jordartslagret för att sedan kunna tilldelas värden för infiltration. Metod för beräkning av infiltrationen valdes till *SCS Curve Number*. Indata till infiltrationsmodulen är curve number (*CN*), initial abstraktion (eng. *initial abstraction*) (λ) och minsta infiltrationshastighet i mm/h (Brunner 2024). Avdraget som görs är ett direkt avdrag från regnet som appliceras i modellen beroende av infiltrationslagret och beror inte på vattendjupet över ytan (Brunner 2020). För att använda samma värden som för det avdrag som görs i SCALGO Live valdes värdena för *CN-p* i infiltrationsmodulen.

För hårdgjorda ytor där ingen infiltration sker kan ett konstant avdrag av regnet göras för att räkna med avdraget som sker till ledningsnät (Krvavica & Rubinić 2020; MSB 2023). Det kan bli missvisande när modellering sker över ett större område som inte endast är urban miljö. Därför tilldelades hårdgjorda och artificiella ytor ett visst avdrag trots att ingen infiltration sker där genom att ge *CN-p* värde även där. Det är samma metod som SCALGO Live använder för avdrag till ledningsnät. En sammanställning av samtliga använda värden för infiltrationen redovisas i bilaga B. En enklare känslighetsanalys av infiltrationens påverkan på modellen gjordes och beskrivs i bilaga A.

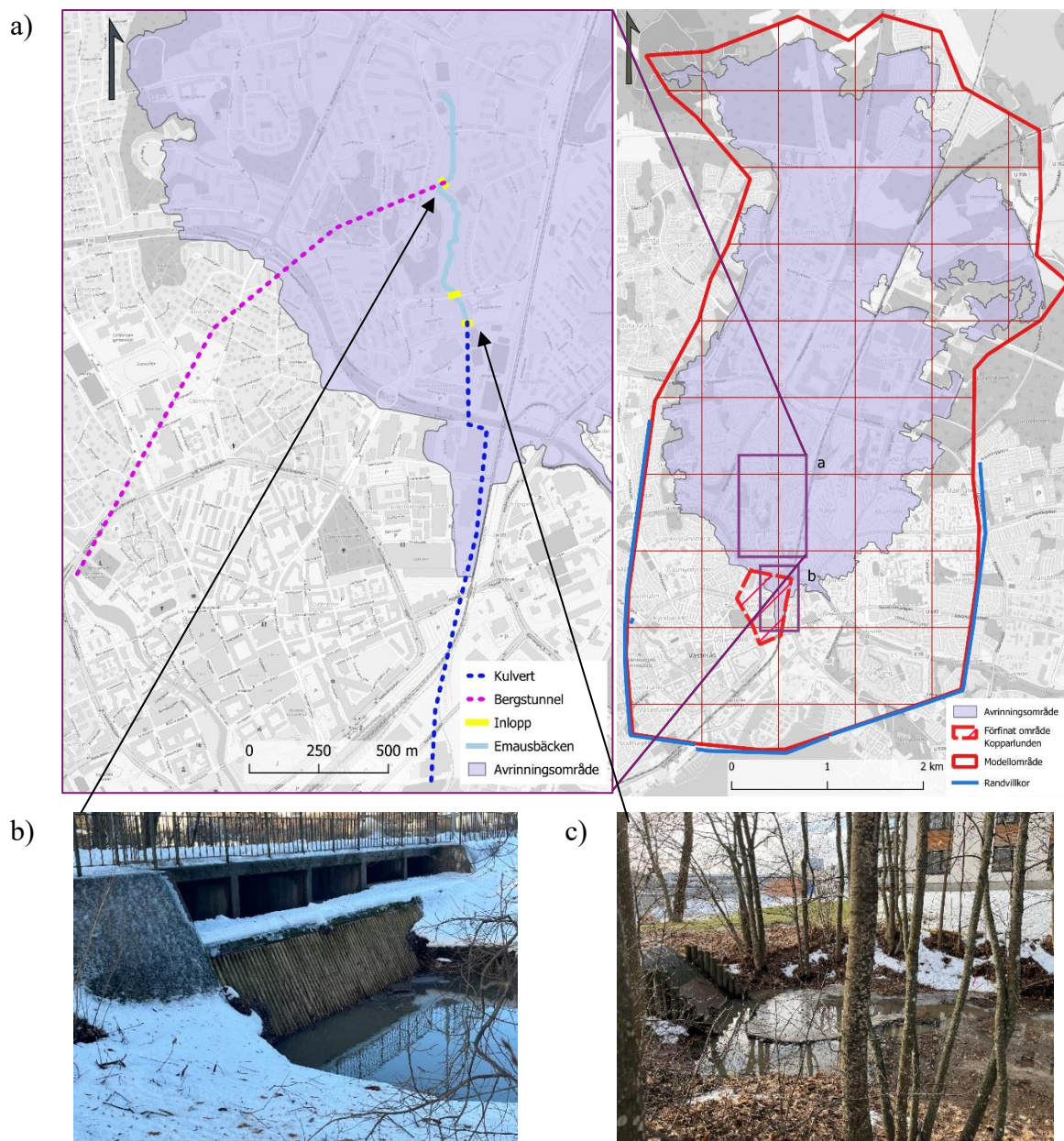
2.3.4 Randvillkor – gränsvärden

I HEC-RAS kommer vatten in i och ut ur modellen genom att lägga till randvillkor (eng. *Boundary conditions*). De randvillkor som användes i modellen var *Normal depth*, *Stage hydrograph* som yttre randvillkor, *Flow hydrograph* som inre samt *Precipitation* för själva regnet. Villkoret *Normal depth* gör det möjligt för vatten att ta sig ut ur modellen genom att en lutning motsvarande terrängens lutning anges vid beräkningsnätets kant (Brunner 2024). Detta randvillkor sattes vid två platser i modellen, vid beräkningsnätets nedre västra och östra del. Lutningen för *Normal depth* sattes till 0,014 för det östra och 0,04 för det västra randvillkoret. Randvillkoret *Stage hydrograph* sätter en yttre vattennivå som gränsvärde och kan variera med tid. Om vattennivån är högre än nivån i modellen går vatten in i modellen och om vattennivån är lägre åker vatten ut (Brunner 2024). Detta randvillkor angavs vid beräkningsnätets södra gräns mot Mälaren. Den historiska medelhöjden för Mälaren är 0,86 m över havet, uttryckt i nationella markhöjdsystemet RH2000 (SMHI 2023a), vilket är de värde som nivån sattes till i villkoret. Svartån som går igenom Västerås centrum (se figur 1) gavs randvillkoret *Flow hydrograph*. Det är ett inre randvillkor som ger vatten in i modellen genom

att applicera ett flöde. Villkoret användes för att simulera flödet i ån och sattes till $7,8 \text{ m}^3/\text{s}$ vilket är medelflödet för Svartån uppmätt åren 2004 till 2020 (Petersson 2021). Randvillkoren kan ses markerade tillsammans med modellområdet i figur 1.

2.3.5 Strukturer i modell, kulvertar

I avrinningsområdets norra del avleds vatten med hjälp av två kulvertar vilka lades till som inbyggda strukturer i modellen. En går från Gideonsberg där Emausbäcken rinner in i en bergstunnel som sedan rinner ut i Svartån. Dimensionerna på bergstunneln är $2,4 \times 2,25 \text{ m}$ vid inloppet och $3,4 \times 2,7 \text{ m}$ vid utloppet (Mail från Mälarenergi 24-02-23). Kulverten som går under Kopparlunden och ut i Mälaren har sitt inlopp vid Emausbäckens slut söder om Långmårtensgatan. Dimensionerna är inte kända för hela sträckningen av kulverten. Strax uppströms från kulverteringens början går Emausbäcken genom en vägtrumma som också lades in i modellen. Storleken på trumman uppskattades vid platsbesök till ca. 1 m. Bergstunnelns dimensioner sattes i HEC-RAS till samma dimensioner som vid inloppet ($2,4 \times 2,25 \text{ m}$). Kulverten fick diametern 2 m och trumman 1 m. Placering av inloppen är inom ruta a i figur 1 och sträckning för de inbyggda strukturerna visas i figur 3, samt bilder för inloppen till bergstunneln och kulverten tagna vid platsbesök.



Figur 3. Kulvertar tillagda i modellen a) Markering av inlopp samt vägtrumma (gul) och sträckning av kulvert och bergstunnel (blå och lila) från Emausbäcken. Bakgrundskarta Open street Map från QGIS. b) inlopp bergstunnel och c) inlopp kulvert (bilder från platsbesök)

2.3.6 Beräkningsmetod för instabilt flöde

I HEC-RAS finns olika ekvationer för beräkning av det ojämna flödet i två dimensioner.

Dessa ekvationer är diffusionsvågsekvationen (eng. *Diffusion Wave equation*) och två olika versioner av Shallow Water Equations (SWE) Eulerian-Lagrangian method (SWE-ELM) och Eulerian method (SWE-EM) (se bilaga C). Användaren kan välja vilken ekvation som ska användas. Som standard är diffusionsvågsekvationen inställd då den är snabb och är generellt en stabil metod. Rekommendationen från *HEC-RAS 2D User Manual* är att börja modelleringen med diffusionsvågsekvationen och sedan testa att byta till SWE. Om resultaten

från de två simuleringarna skiljer sig mycket från varandra bör den senare antas vara den mer korrekta. (Brunner 2024). Det finns ingen definition på vad stor skillnad är i dokumentationen från HEC-RAS.

SWE är en förenkling av Navier-Stokes ekvation som beskriver rörelsen av vätskor genom bevarande av rörelsemängden och massa i tre dimensioner. De antaganden som görs är att flödet inte antas vara komprimerbart, att densiteten och det hydrostatiska trycket är uniformt samt antaganden om turbulensen. Det antas också att den vertikala längdskalan är mycket kortare än den horisontella vilket ger att det vertikala flödet är långsamt och trycket är hydrostatiskt. Skillnaderna mellan SEW-ELM och SWE-EM är att den senare är mer konservativ i bevarandet av rörelsemängden. I diffusionsvågsekvationen är accelerationstermerna borttagna vid beskrivning av rörelsemängden (US Army Corps of Engineers u.å.). Diffusionsvågsekvationen förenklar de hydrodynamiska processerna vilka är komplexa att beskriva (Gao et al. 2021). Se ekvationer i bilaga C.

Val av beräkningsmetod gjordes med utgångspunkt att få modellen så snabb som möjligt och hålla den stabil. Med stabil innebär stabiliteten i de numeriska lösningarna för flödet (Brunner 2024). Davis och Schmalz (2020) utvärderade sin HEC-RAS modell genom att testa båda ekvationerna och valde SWE då den gav ett högre värde för flödet i modellen. Samma undersökning gjordes för modellen i denna studie där det motsatta resultatet visades, diffusionsvågsekvationen gav ett större flöde än SWE (bilaga A). Eftersom diffusionsvågsekvationen är snabbare, mer stabil och gav större flöde valdes denna för beräkning av det ojämna flödet av avrinningen.

2.3.7 Beräkningsnät och val av tidssteg

Beräkningsnätet i modellen anpassas efter detaljnivån som behövs över området. Inom en beräkningscell representerar variationer i terrängen och varje kant av en beräkningscell ger ett tvärsnitt med information om terrängen, våt perimeter och råhet. Detta betyder att även när större upplösning används för beräkningsnätet kan terrängen fortfarande representeras på ett korrekt sätt. För områden med flack terräng kan generellt större beräkningsnät användas då vattnet inte rör sig lika fort över ytan. För brantare terräng behövs mindre beräkningsnät för att fånga upp rörelsen av vattnet. Det är viktigt att kanten av beräkningscellerna är linjerade (parallella) med högpunkter som blir barriärer för vattnet. Inom varje beräkningscells finns en mittpunkt där vattendjupet beräknas vilket representerar ett medelvärde för vattenytans nivå beräknat i två dimensioner för cellen. Beräkningsnätet kan anpassas med hjälp av förfinade

områden (eng. *refinement regions*) och brytningslinjer (eng. *breaklines*) för områden där mer detaljer om terrängen behövs. För att få med vattnets rörelse över terrängen behöver beräkningscellerna vara parallella med flödesriktningen. Därför bör brytningslinjer läggas till för viktiga rinnvägar så som vägar och vattendrag för att anpassa beräkningsnätet (Brunner 2024).

Handledningen från MSB (2023) rekommenderar vilken upplösning det bör vara på beräkningsnätet. De säger att beräkningsnätet utanför tätorter bör vara 7x7 m där vägar och viktiga rinnvägar bör ha en upplösning på 2,2x2,2 m. Beräkningsnätet över tätorter och intresseområde bör vara 2,2x2,2 m där vägar och rinnvägar bör ha en upplösning på 1,4x1,4 m.

Den totala ytan för beräkningsnätet sattes med marginal runt avrinningsområdet och ner till Mälaren med upplösning 20x20 m. Över Kopparlunden gjordes ett förfinat område med upplösning 2,2x2,2 m. Brytningslinjer gjordes för större vägar, Emausbäcken samt för Svartån med en upplösning 2,2x2,2 m utanför det förfinade området och 1,4x1,4 m innanför. Det gav ett beräkningsnät med 556 955 celler, maximal cellstorlek på 961 m², minsta cellstorlek på 0 m² och genomsnittlig cellstorlek 44 m². En översikt av modellområdet visas i figur 1 med markeringar för det totala området, det förfinade området samt randvillkoren.

Brytningslinjerna kan ses i bilaga D.

För att få bra beräkningar av flödet i modellen och för att hålla den stabil behöver tidssteget bestämmas utifrån val av beräkningsmetod. Ett kortare tidssteg ger längre simuleringstid men noggrannare resultat. Beroende på val av funktion för att beskriva flödet, diffusionsvågsekvationen eller shallow water equation (SWE) kan tidssteget bestämmas utifrån beräkningsnätet storlek och hastigheten på flödet i modellen. Förhållandet mellan dessa kallas för Courant number och beräknas med ekvation 1,

$$C = \frac{V\Delta T}{\Delta X} \leq 1 \quad (1)$$

Där C är Courant number [-], V flood wave velocity [m/s], ΔT är det uträknade tidssteget [s] och ΔX den genomsnittliga cell storleken [m]. Maximalt tillåtet värde för C och med det tidssteg beror på val av beräkningsmetod. Det går att välja ett fast tidssteg vilket är den förvalda metoden eller att HEC-RAS räknar ut och anpassar tidssteget utefter Courant number. För val av beräkningsmetod och tidssteg måste simuleringstiden vägas mot noggrannheten i resultaten. Vid simulering ges enlogg som ger information om de

ackumulerade felen som skett under simuleringen. Felen uppstår på grund av att iterationen över en cell inte kunde lösas under det bestämda tidssteget (Brunner 2024). Det finns ingen definition för hur stort ett acceptabelt fel är.

En annan indikation på vilket tidssteg som bör användas är flödet i modellen. Om det blir ojämnt och har en spikig form visar det att tidssteget är för långt. Olika tidssteg testades för att hitta ett som var så snabbt som möjligt och fortfarande ge ett jämt flöde, se bilaga A. För detta projekt valdes att använda diffusionsvågs ekvationen med ett fast tidssteg på 4 sekunder. Varje simulering gjordes för 24 h och en simulering tog omkring 11 timmar att utföra över modellområdet.

2.4 REGN

Regnets intensitet och tidsvariation behövde bestämmas för regnen i den detaljerade analysen. För den förenklade analysen går det inte att ha med intensitet och tidsvariation. Dock kan information om nederbördsvolym hämtas från regnen i den detaljerade analysen. För båda modellerna lades regnen uniformt över hela modellområdet.

Intensiteten på regn beror på återkomsttid och varaktighet. Val av återkomsttid bör ej vara under 100 år för förenklad och detaljerad analys där ledningsnätet ej tas i beaktande. För att ta höjd av osäkerheter i analysen rekommenderas att använda flera regn med olika återkomsttider och för risk och konsekvensanalys kan återkomsttider upp till 1000 år användas (MSB 2023). Det är viktigt att beakta att långa återkomsttider innebär större osäkerheter i framtagande av intensitet på regnet. MSB (2017) nämner att några av de största regnen som uppmätts i Sverige har klassificerat som 1000-årsregn vilket motsvarar en regnvolym om 95 mm som faller under 30 minuter. Större regn med längre återkomsttider än 1000 år är inte rimligt att studera i vårt klimat (MSB 2017). Utifrån rekommendationer att använda en återkomsttid på minst 100 år samt att olika återkomster bör studeras har återkomsttiderna 100 och 200 år valts för simuleringarna.

Varaktigheten bör minst vara lika lång som avrinningsområdets koncentrationstid för att all avrinning ska hunnit rinna genom modellområdet under simuleringstiden (Svenskt vatten 2011). I Svenskt Vatten P110 finns rekommendationen att ett standardvärde för varaktigheten kan vara 240 min (4 h), dock behöver information om avrinningsområdet beaktas vid val av varaktighet (Arnell 1992 se Svenskt Vatten 2011).

En uppskattning av koncentrationstiden gjordes med en Mannings formel enligt metod från Svenskt Vatten P110 (ekvation 2).

$$v = M \cdot R^{2/3} \cdot S^{0,5} \quad (2)$$

v vattenhastighet [m/s], M Manningstal [$m^{1/3}/s$], R vattendjup [m] och S lutningen [%]. M valdes till 20 för öppen mark med låg vegetation då det var den största andelen av avrinningsområdets markanvändning (avsnitt 2.1), vattendjupet R valdes till 0,005 m likt Svenskt Vatten (2011), S till 3,98 ‰ uträknat av SCALGO Live. Det gav en vattenhastighet på 1,2 m/s vilket i sin tur multiplicerades med den längsta rinnvägen genom avrinningsområdet framtaget med SCALGO Live vilket var 11,6 km. Det gav en koncentrationstid på 155 min (2,5 h). För att ta marginal av den enklare uppskattningen valdes varaktigheten 240 min (4h).

För dimensionering av dagvattenanläggningar och dagvattensystem används en klimatkfaktor för att ta hänsyn till ett framtida förändrat klimat. För att uppskatta framtida klimat används olika utsläpps-scenarion, Representative Concentration Pathways (RPC). Svenskt vatten (2016) rekommenderar en klimatkfaktor 1,2 för regn med varaktighet längre än 60 min. Något större intervall ges av MSB (2017) där de rekommenderar en klimatkfaktor mellan 1,2 och 1,5. För ett regn där klimatscenario RPC 8.5 ska beaktas mot slutet av århundradet (år 2071–2100) ska en klimatkfaktor på 1,4 appliceras. För samma tid med scenario RPC 4.5 används i stället 1,2. (Olsson et al. 2017). MSB (2023) refererar till Olsson et al. (2017) för klimatkfaktorer. Med utgångspunkt i hur takten på klimatkförändringarna ser ut idag bör en pessimistisk syn på val av klimatkfaktor användas vilket innebär en högre klimatkfaktor.

I ett intensitet-varaktighets samband visas intensiteten mot varigheten av regnet beroende på återkomsttid (Svenskt Vatten 2011). För beräkning av regnets intensitet används oftast i Sverige Dahlströms formel, se ekvation 3 (Dahlström 2010; Svenskt Vatten 2011).

$$i = 190 \sqrt[3]{\frac{\ln T}{T^{0,98}}} + 2 \quad (3)$$

Intensiteten i [l/s,ha], $\bar{A}$ återkomsttiden i månader och T varaktigheten i minuter. Ekvationen är framtagen för regn med återkomsttid upp till 10 år men har senare använts för återkomsttider upp till 100 år. Statistiken som Dahlströms ekvation är framtagen av är från regn uppmätta i sydvästra Sverige (Olsson et al. 2017). Senare statistik har tagits fram bland annat från SMHI av Olsson et al. (2017) där regionala skillnader i regnets intensitet finns. Denna statistik är framtagen för regn med återkomsttid upp till 100 år. Statistiken har visats ha

god trovärdighet för återkomsttider upp till 200 år (MSB 2023). Beräkning av regnvolymer med viss återkomsttid och varaktighet beräknat med metoden från SMHI ses i ekvation 4

$$R = k(T) \cdot V^{p(T)} \quad (4)$$

R regnvolum av ackumulerat regn [mm], V varaktighet [min], T återkomsttid i år.

Parameterfunktionerna $k(T)$ och $p(T)$ beräknas med regionspecifika parametrar. För parameterfunktionerna finns parametrar för sydvästra, sydöstra, mellerst och norra Sverige (Olsson et al. 2017). Än så länge anses Dahlström (2010) vara på den säkra sidan vid dimensionering av dagvattenanläggningar (SMHI & Svenskt Vatten 2020). För modellering av skyfall kan Dahlström anses konservativt, ger höga regnmängder, om området som studeras inte ligger i sydvästra Sverige (MSB 2023).

För jämförelsen mellan förenklad och detaljerad analys användes regn framtagna med Dahlström (2010). För känslighetsanalysen har regnvolymer beräknats med metoden från Dahlström (2010) samt Olsson et al. (2017) med parametrar för sydöstra Sverige. Sydöstra regionen valdes då Västerås ligger i den regionen för regionsuppdelningen enligt Olsson et al. (2017).

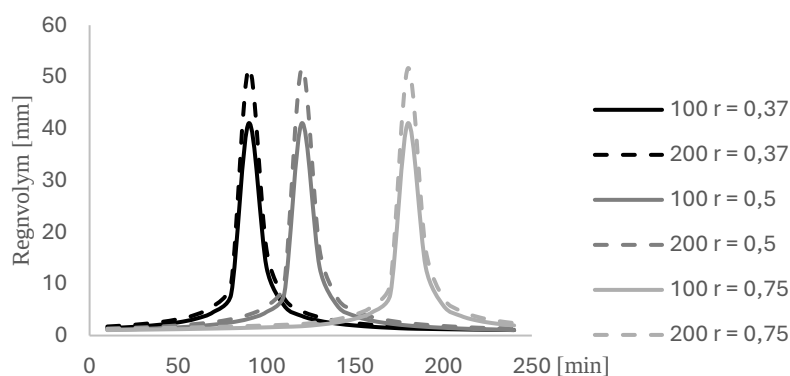
2.4.1 Typregn

För att besvara frågeställning två, hur val av regn påverkar resultaten i den detaljerade analysen, togs olika typregn fram med intensitets-varaktighets samband där återkomsttiden och tidsvariansen påverkan på modellen undersöktes.

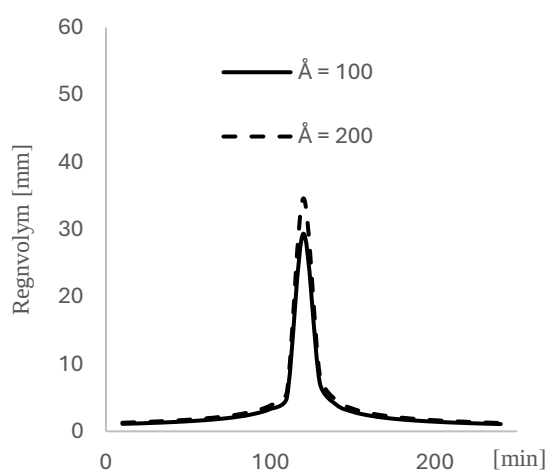
Antalet studerade regn i analysen var totalt tio stycken där åtta var CDS-regn framtagna med olika regnstatistik och olika skevhetsfaktor. Skevhetsfaktorn r är en beskrivning av regnets tidsvarians där r beskriver hur symmetrisk regnets intensitetsmaximum är fördelat över den totala varaktigheten. Två blockregn studerades framtagna med Dahlström (2010), se figur 4. Skevhetsfaktorn för CDS-regnen framtagna med Dahlström (2010) sattes i tre olika scenarion med intensitetmaximum i regnets första halva, mitt och sista halva. Detta med utgångspunkt från resultat av Chen et al. (2023) om påverkan av CDS-regnets skevhetsfaktor på översvämningen och att regn med ett senare intensitetsmaximum ger en större översvämning. Val av r valdes också från resultat av Olsson et al. (2017) från observationer av svenska regn där regn med längre varaktighet oftast har sitt intensitetsmaximum i början och mitten av regnets totala varaktighet. De använda skevhetsfaktorer valdes till $r = 0,37$, $0,5$ och $0,75$. Regnen framtagna med metoden från Olsson et al. (2017) var ett CDS-regn med

skevhetsfaktor $r = 0,5$. Samtliga regn har varaktighet 240 minuter och klimatfaktor 1,4. Utformningen på regnen påverkar inte den slutliga ackumulerade volymen av den totala nederbörden. Den totala ackumulerade volymen från regnen framtagna med Dahlström (2010) var 108 mm och 135 mm för 100-repektive 200-årsregnen. För regnen framtagna med sambandet av Olsson et al. (2017) var den ackumulerade volymen från regnen 80 mm och 93 mm för 100-respektive 200-årsregnen.

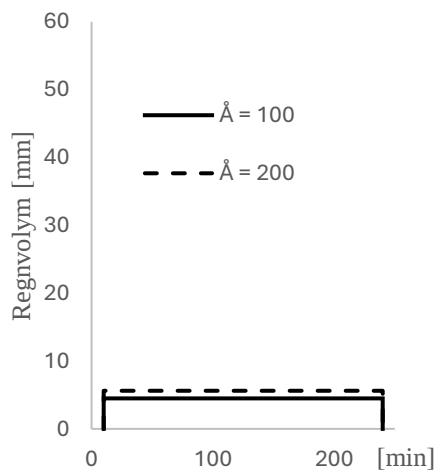
a)



b)



c)



Figur 4. Regn i analysen återkomsttid 100 och 200 år, varaktighet 240 min och klimatfaktor 1,4. a) CDS-regn från Dahlström (2010) med skevhetsfaktor $r = 0,37$, $r = 0,5$ och $r = 0,75$ b) CDS-regn från Olsson et al. (2017) $r = 0,5$ och c) blockregn.

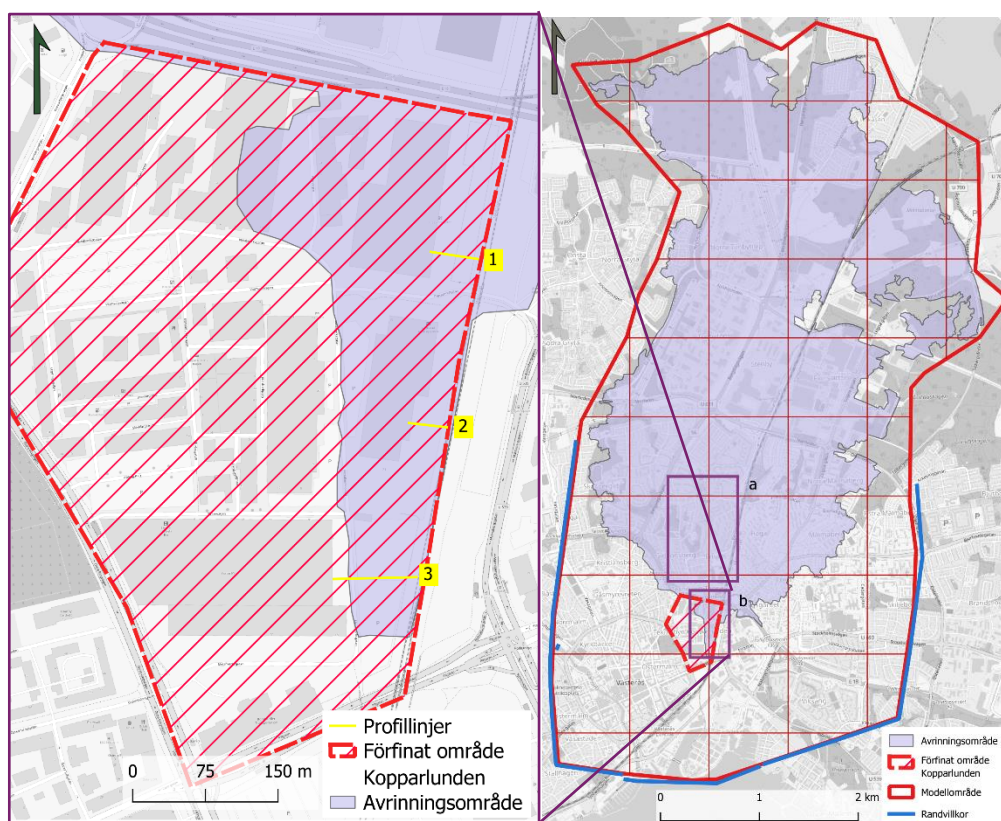
För att enklare kunna beskriva och diskutera regnen kommer regnen som är framtagna med Dahlström omnämnas som CDS $r = 0,37$, $r = 0,5$, $r = 0,75$ och block 100/200 alternativt

blockregn. Regnen framtagna med Olsson et al. (2017) kommer omnämnas som SMHI 100/200.

Utifrån regnen av Dahlström (2010) togs volymerna som applicerades i den förenklade analysen fram. Volymerna var de ackumulerade volymerna från regnen efter hela varaktigheten vilket också motsvarar den totala volymen på Dahlström regnen.

2.4.2 Profillinjer

I känslighetsanalysen undersöktes hur val av regn påverkade den detaljerade analysen genom att studera hur flödet, den ackumulerade volymen och vattendjupet förändrades mellan regnen. Detta gjordes vid utloppen från det studerade avrinningsområdet i Kopparlunden. I HEC-RAS visas flöde och ackumulerad volym genom att skapa profillinjer vid utvalda platser. Tre profillinjer placerades vid en väg som går från norr till söder i östra Kopparlunden. Denna plats valdes då den har pekats ut som skyfallsväg för det studerade avrinningsområdet. Profillinjernas placering i modellområdet är utmärkt med ruta b figur 1 och kan ses i figur 5.



Figur 5. Profillinjer för beräkning av flöde och ackumulerad volym (gul). Bakgrundskarta Open Street Map från QGIS.

2.5 ANALYS AV ÖVERSVÄMNING FRÅN MODELLER

Jämförelsen av översvämningens utbredning och djup gjordes i QGIS version 3.34.3.

Resultaten med vattendjup på översvämningen hämtades från SCALGO Live och HEC-RAS genom raster med 1x1 m upplösning. Vattendjup under 0,1 m filtrerades bort i enlighet med rekommendation från MSB (2023) genom att använda *raster calculator*. Statistik om vattendjupet togs fram genom *raster layer statistics* som ger information om största, minsta och medelvärde av vattendjupen, standardavvikelsen samt summan av det totala vattendjupet.

För att ta reda på översvämningens utbredning dividerades varje rastercell med sig själv med *raster calculator* vilket gav alla djup till ett värde av ett. Med *raster layer statistics* räknades summan av raster vilket motsvarar arean av vattenfyllda raster då varje rastercell hade en area på 1x1 m. Areal av vattenfyllda raster dividerades med totala arean av området för att få ut andelen översvämmat område. Totala ytan för modellområdet var 24,6 km². För känslighetsanalysen studerades endast området runt centrum och Kopparlunden vilket har en storlek på 1,42 km².

3. RESULTAT

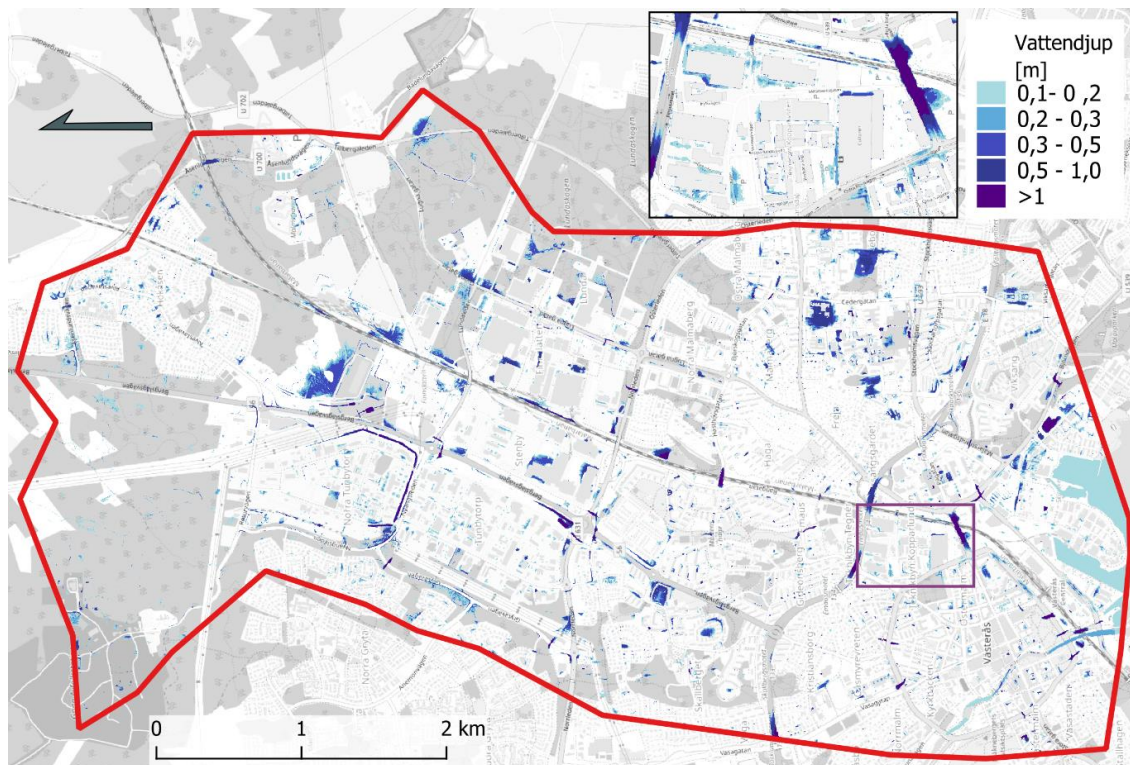
För att besvara den första frågeställningen, vad skillnaden blir i översvämningens utbredning och djup mellan förenklad och detaljerad analys, jämfördes raster från modellerna utförda i SCALGO Live och HEC-RAS. Jämförelsen av resultaten presenteras nedan i avsnitt 3.1. För den andra frågeställningen, hur val av regn påverkar resultatet i den detaljerade analysen, togs både grafer och raster fram för analys av resultaten från HEC-RAS. Dessa resultat presenteras i avsnitt 3.2.

3.1 SKILLNAD MELLAN FÖRENKLAD OCH DETALJERAD ANALYS

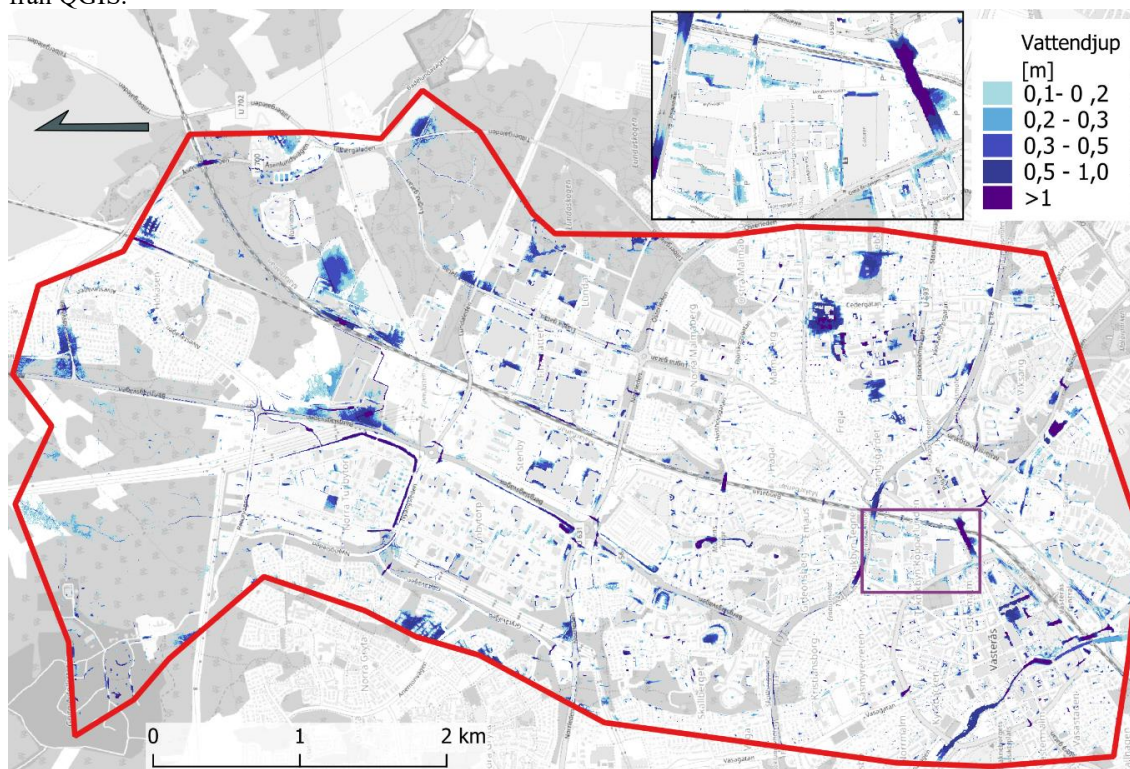
För resultaten av vattendjupet från den detaljerade analysen visas det maximala vattendjupet samt vattendjupet vid slutet av simuleringstiden. Det *maximala* vattendjupet innebär att översvämningen inte visas för en viss tidpunkt under simuleringen utan det är en sammanställning av det maximala djupet som uppstått i respektive cell under hela simuleringen.

Vattendjupen som är större än 0,1 m för den förenklade analysen samt maximala djupen och djupen vid simuleringens slut av den detaljerade analysen visas i figur 6 till 8.

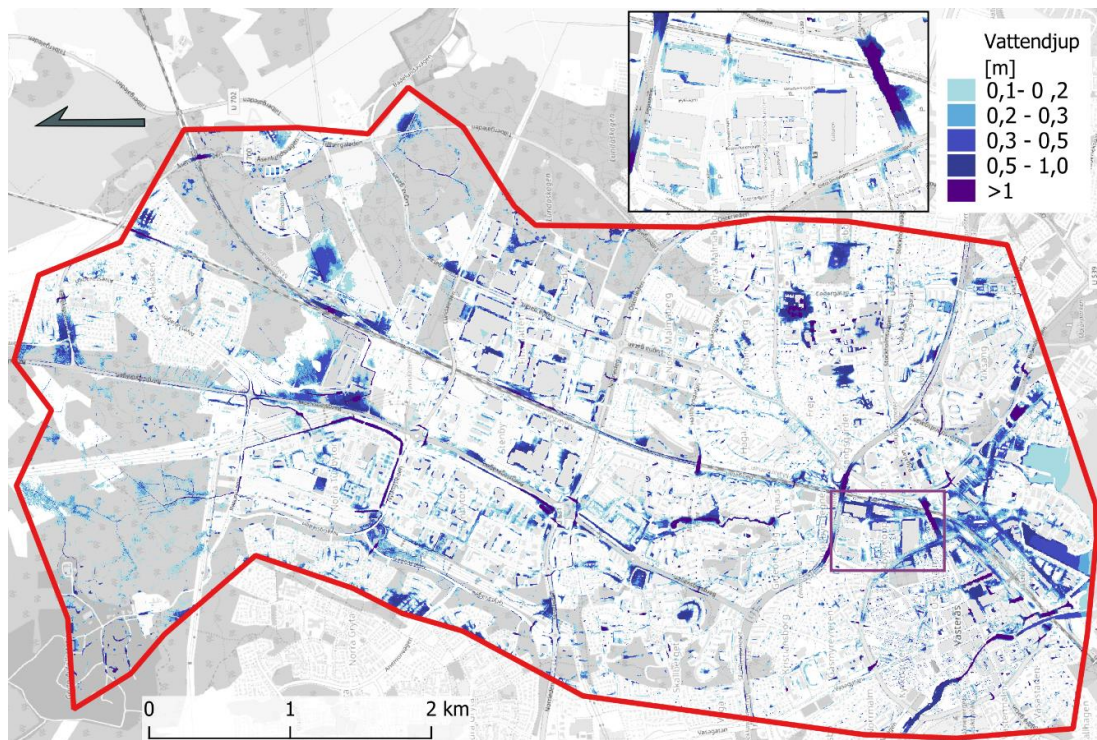
En skillnad mellan översvämningens utbredning kan ses mellan analyserna där den största utbredningen ses för det maximala vattendjupet från den detaljerade analysen (figur 8). Det visas en skillnad mellan den förenklade analysen (figur 6) och simuleringsslut av den detaljerade (figur 7) där utbredningen är något större för den detaljerade. Skillnaden i utbredning visas tydligast i figur 9 där endast utbredningen av den förenklade och simuleringsslut av den detaljerade analysen presenteras. Den förenklade analysen färgsattes med orange och simuleringsslut av den detaljerade med lila. Där utbredningen är samma färgsattes med blått. Något som visas vid jämförelse av utbredningen mellan de olika analyserna är också att översvämningen sker på lite olika platser i de olika modellerna. Särskilt noterbart är att utbredningen från den förenklade analysen är i Mälaren medan simuleringensslut av den detaljerade analysen inte är det (figur 9).



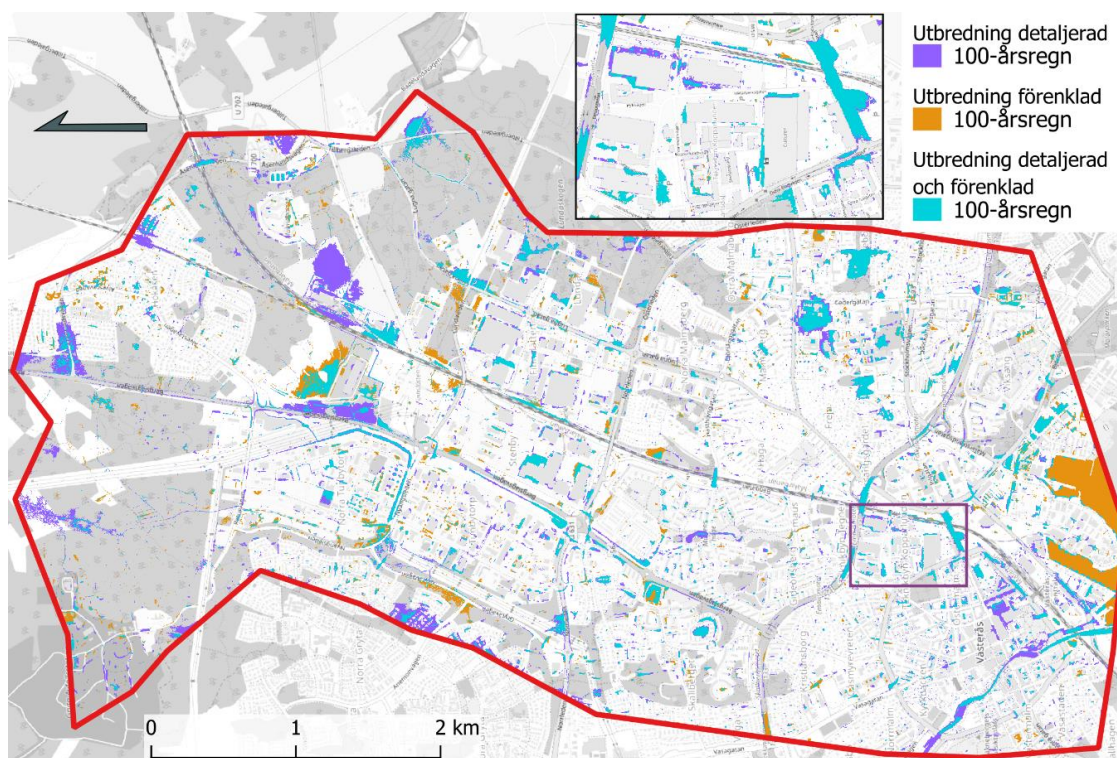
Figur 6. Vattendjup från 100-årsregn förenklad analys 108 mm regn tillagt. Bakgrundskarta Open Street Map från QGIS.



Figur 7. Vattendjup från 100-årsregn slutet av simulering detaljerad analys blockregn med 240 min varaktighet. Bakgrundskarta Open Street Map från QGIS.



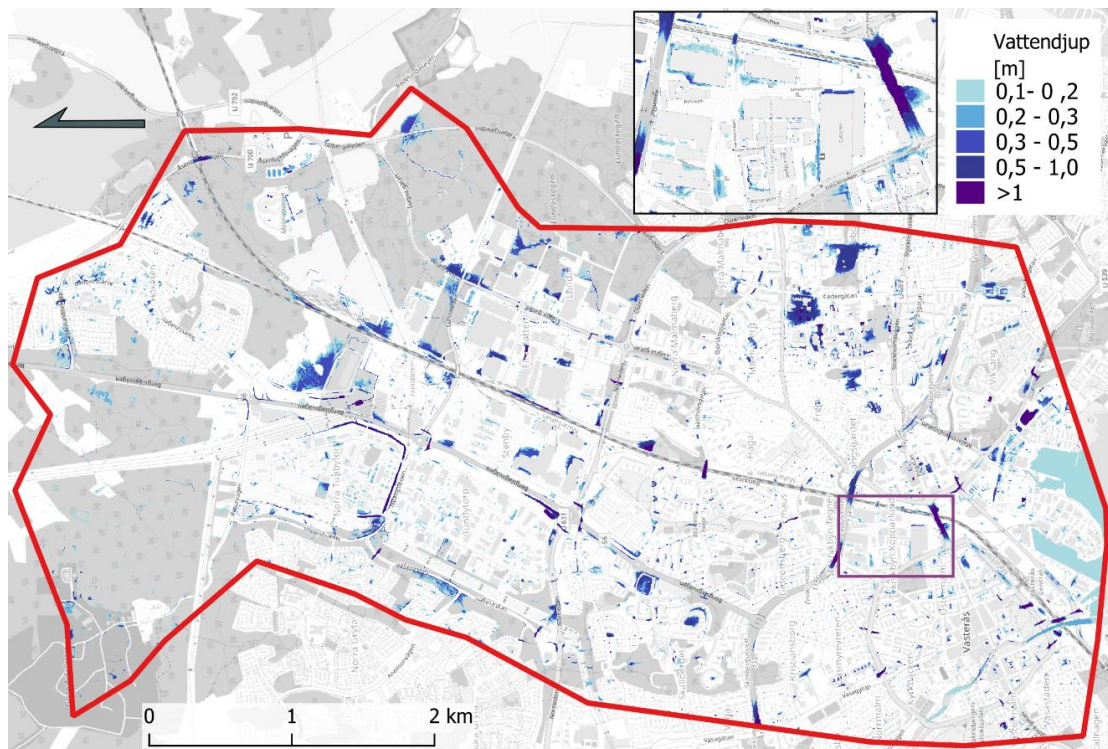
Figur 8. Vattendjup från 100-årsregn maximalt djup detaljerad analys blockregn 240 min varaktighet. Bakgrundskarta Open Street Map från QGIS.



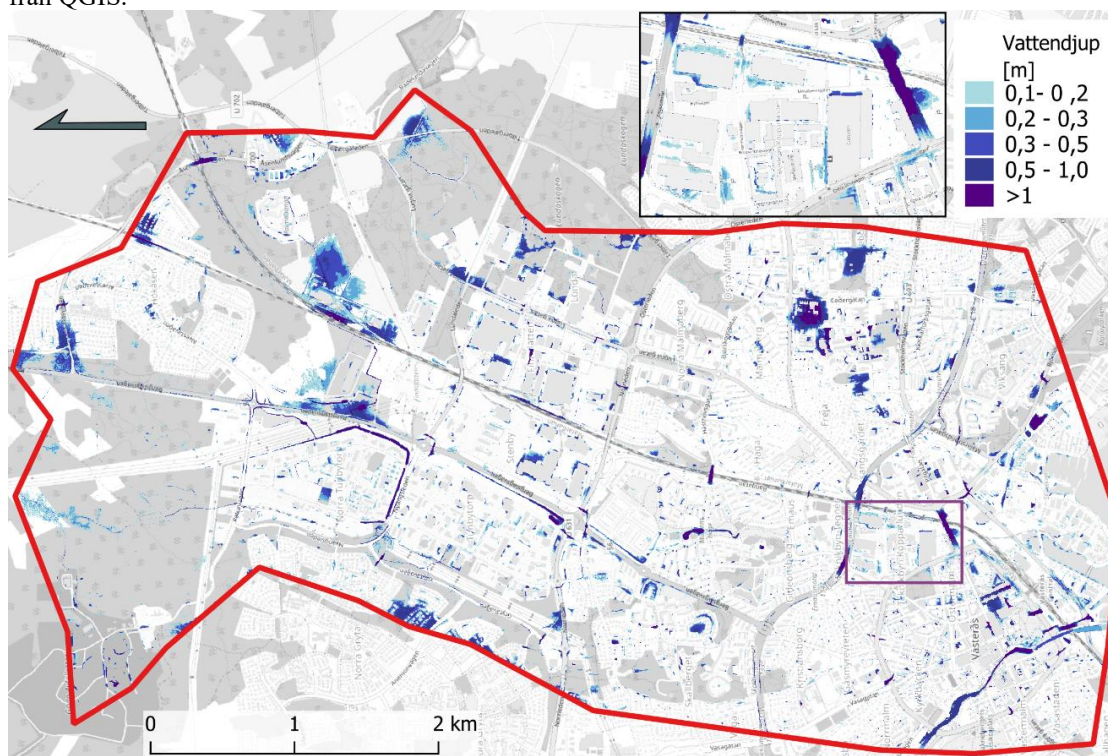
Figur 9. Utbredning 100-årsregn för den förenklade analysen (orange) och simuleringens slut av den detaljerade (lila). Där utbredning är samma för analyserna (blått). Bakgrundskarta Open Street Map från QGIS.

Resultaten av vattendjupen för 200 år regnet visar på samma trender som de för 100 års regnet. Översvämningens djup för den förenklade, maximala och simuleringens slut för den detaljerade analysen presenteras i figur 10, 11 och 12.

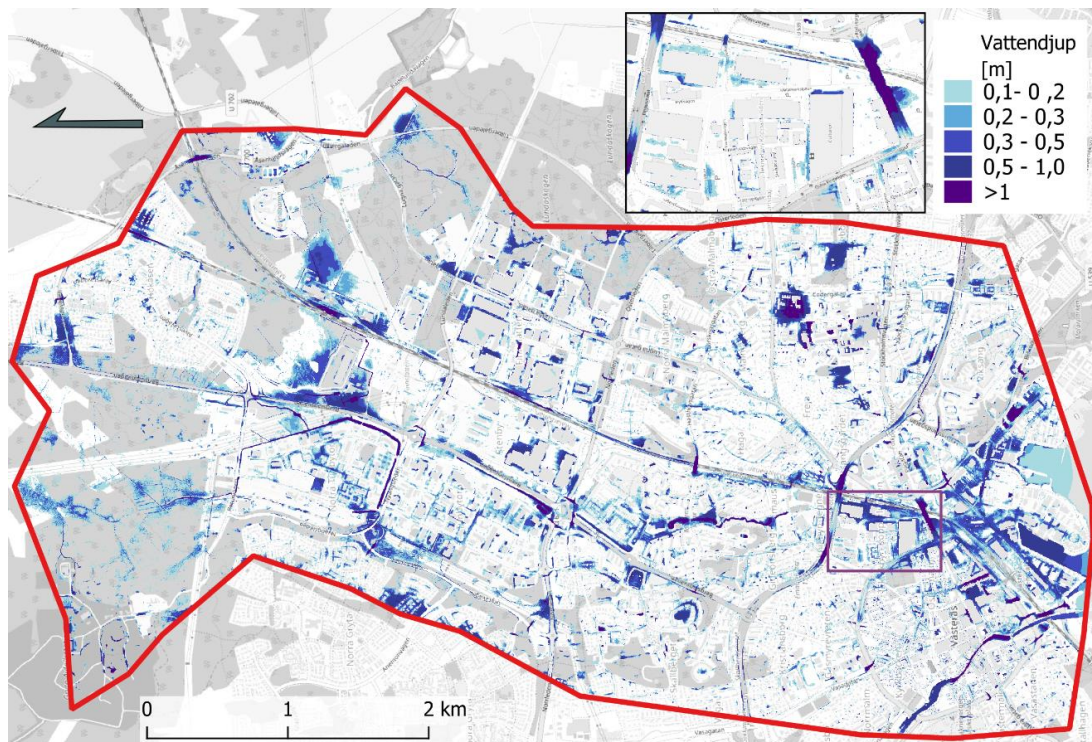
Utbredningen på översvämningen är större för 200 års regnet än för 100 års regnet för båda analyserna. Det maximala vattendjupet från den detaljerade analysen visar på stor utbredning (figur 12). Skillnaderna i utbredning för 200-årsregnen mellan den förenklade analysen och simuleringsslut av den detaljerade visas i figur 13.



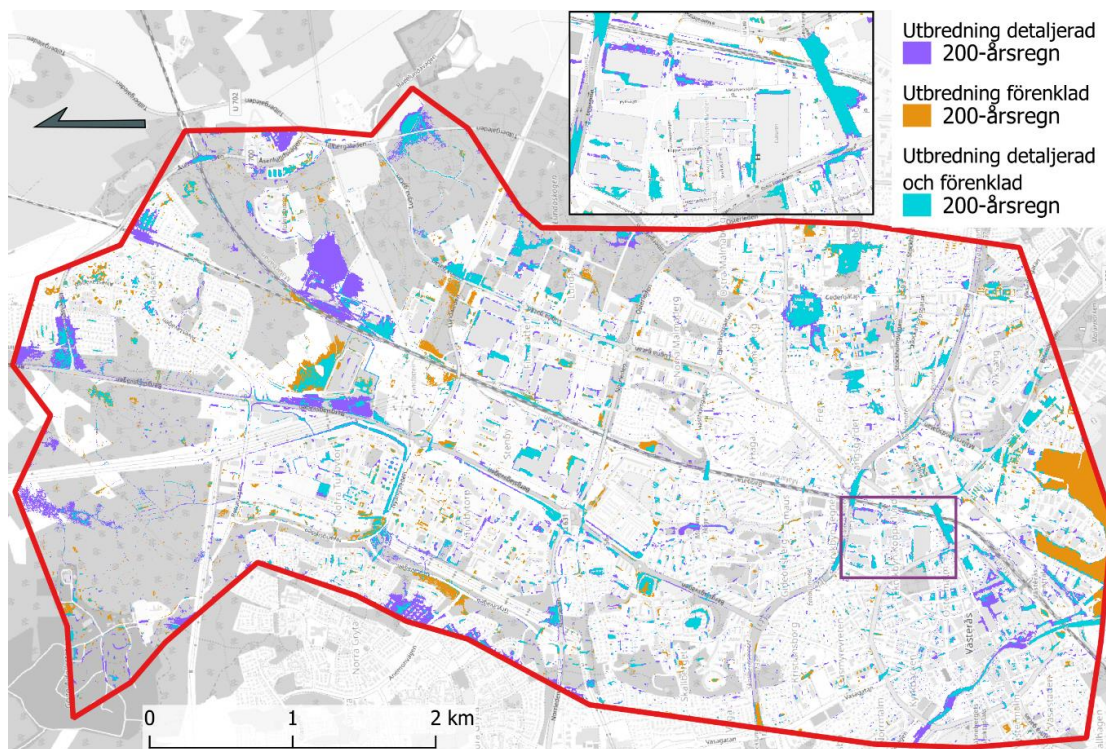
Figur 10. Vattendjup från 200-årsregn förenklad analys 135 mm regn tillagt. Bakgrundskarta Open Street Map från QGIS.



Figur 11. Vattendjup från 200-årsregn slutet av simulering detaljerad analys blockregn 240 min varaktighet. Bakgrundskarta Open Street Map från QGIS.



Figur 12. Vattendjup från 200-årsregn maximala djupet detaljerade analys blockregn 240 min varaktighet. Bakgrundskarta Open Street Map från QGIS.



Figur 13. Utbredning 200-årsregn för den förenklade analysen (orange) och simuleringens slut av den detaljerade (lila). Där utbredning är samma för analyserna (blått). Bakgrundskarta Open Street Map från QGIS.

Med verktyget *raster layer statistics* i QGIS togs statistik fram om de olika vattendjupen. Från statistiken om vattendjupen visas att den förenklade analysen ger högre maximalt vattendjup än både max och slutvärden från den detaljerade analysen för båda regnen. För 100-årsregnet i den förenklade analysen blev det högsta vattendjupet 8,43 m och för den detaljerade analysen 4,83 m vid maxdjupet och 4,82 m för slutet av simuleringen. För 200-årsregnen blev det maximala djupet 11,32 m för den förenklade och 5,22 m för både maxdjupet och simuleringsslutet av den detaljerade analysen.

Utbredningen av översvämningen är större för den detaljerade analysen vilket även ses i figur 9 och 13. Störst utbredning av översvämningen har maxvärdena från den detaljerade analysen. Skillnaden i utbredning från den förenklade analysen och slutvärdet för den detaljerade är 0,28 km² motsvarande 1,13 procentenhet för 100-årsregnen och 0,33 km² motsvarande 1,35 procentenheter för 200-årsregnen (tabell 3).

Tabell 3. Statistik om vattendjup från resultaten av den förenklade och detaljerade analysen.

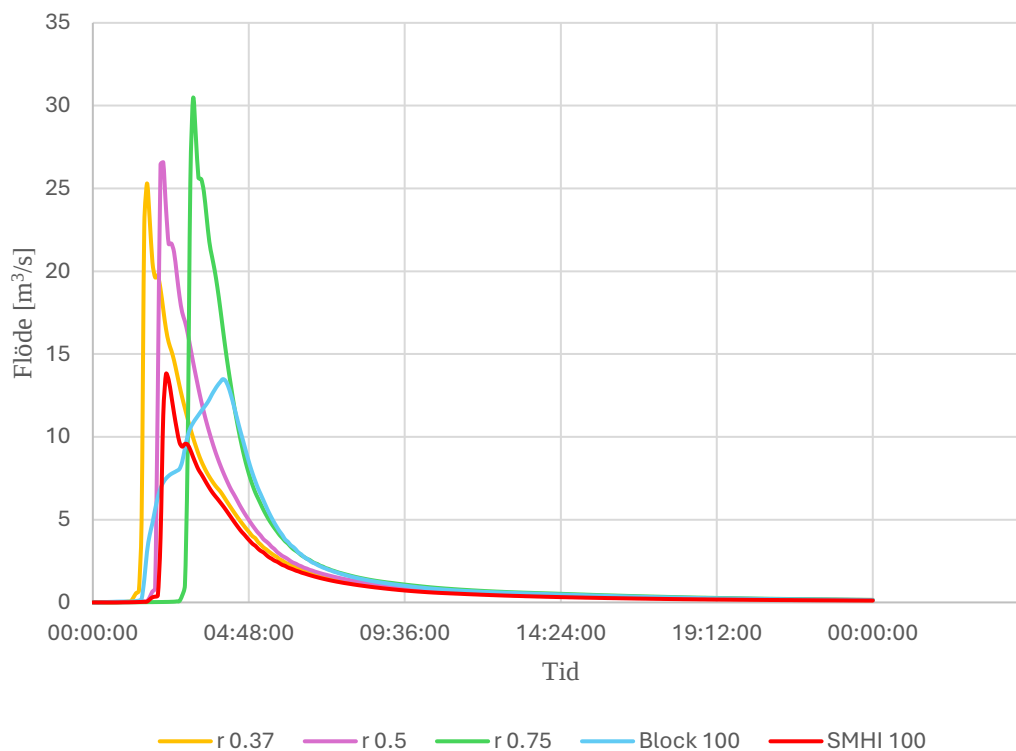
	Förenklad 100	Förenklad 200	Detaljerad 100 (slut)	Detaljerad 200 (slut)	Detaljerad 100 (max)	Detaljerad 200 (max)
Max djup [m]	8,43	11,32	4,82	5,22	4,83	5,22
Medeldjup [m]	0,32	0,33	0,39	0,35	0,34	0,40
Standard- avvikelse [m]	0,32	0,33	0,37	0,32	0,32	0,38
Summa av vattenfyllda raster [antal]	1 601 191	1 706 539	1 878 931	2 039 682	4 153 257	4 862 177
Yta av vattenfyllda raster [km²]	1,60	1,71	1,88	2,04	4,15	4,86
Översvämnings- utbredning totala ytan [%]	6,50	6,93	7,63	8,28	16,86	19,73

3.2 KÄNSLIGHETSANALYS

För att besvara frågeställning två utfördes en känslighetsanalys i HEC-RAS med avseende på olika typregn. Resultaten för frågeställning två utgår från flödesvägen i Kopparlunden. De studerade regnen var både 100- och 200-årsregn.

3.2.1 Flöde

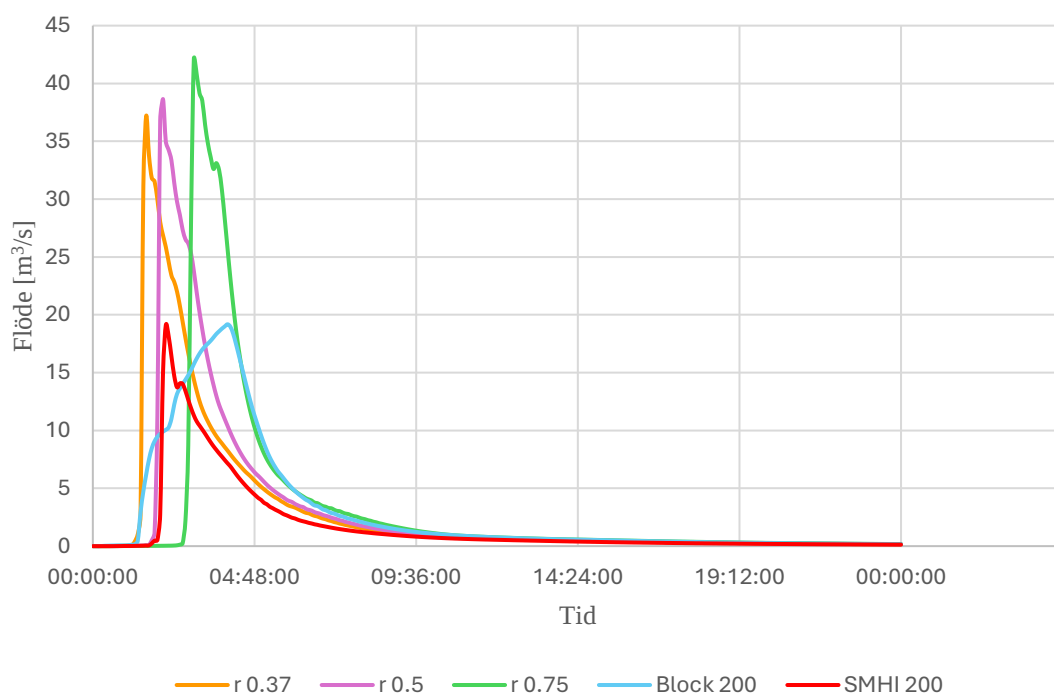
Flöden för 100-årsregnen vid från profillinje 3 visar att störst flöde fås med CDS-regn $r = 0,75$. Block 100 ger minsta flödet av Dahlström-regnen. Flödets storlek från SMHI 100-regnet är i likande storlek som block 100. Flödesmaximum uppkommer på olika tidpunkter, för Dahlström-CDS-regnen uppkommer det maximala flödet ca. 10 minuter efter att regnet har sitt intensitetsmaximum. Flödesmaximum för blockregnet är 240 min (4 h) in i simuleringen, alltså vid slutet av regnet. Flödesmaximum för SMHI 100 är 15 minuter efter intensitetsmaximum för regnet. För SMHI 100-regnet går det att se ett lokalt maximum i flödet 40 minuter efter totala flödesmaximum. För de andra CDS-regnen visas inget lokalt maximum men en stagnering i flödet i form av en plåtå ses för samtliga CDS-regn (figur 14). För de andra profillinjerna ser flödet liknade ut men med andra storlekar på flödet. För profillinje 1 är flödet större och för profillinje 2 är flödet mindre jämfört med det från linje 3 (bilaga E).



Figur 14. Flödet [m^3/s] över tid från profillinje 3 i HEC-RAS från typregnen med återkomsttid 100 år.

Flödet vid profillinje 3 för 200-årsregnen visar på samma trender som för 100-årsregnen. Flödesmaximum kommer något tidigare för 200-årsregnen jämfört med 100-årsregnen. För CDS-regnen $r = 0,37$ och $0,5$ kommer flödesmaximum fem minuter efter att regnet haft sitt

intensitetsmaximum medan för regnet $r = 0,75$ kommer flödesmaximum samtidigt som intensitetsmaximum för regnet. Blockregnet har flödesmaximum efter att regnet har upphört. SMHI 200-regnet har sitt flödesmaximum 10 min efter att regnet haft sitt intensitetsmaximum. Även här visats ett lokalt maximum för SMHI 200-regnet 35 minuter efter totala maximum. Något som ses för CDS-regn $r = 0,75$ är att de också har ett lokalt maximum 40 minuter efter det maximala flödet för 200-årsregnet (figur 15). Grafer över flödet vid de två andra profillinjerna ses i bilaga E. Viss förskjutning av när flödes maximum kommer ses mellan profillinjerna. Storleken på flöden varierar också där flödet är som högst vid profillinje 1 och som lägst vid profillinje 2 (bilaga E).



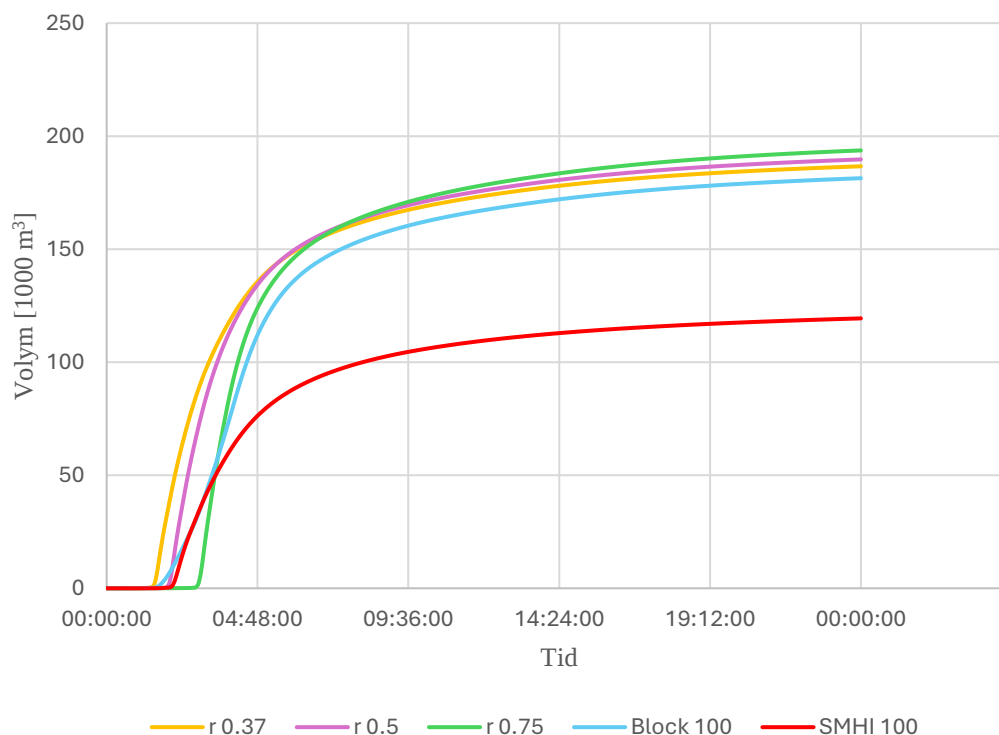
Figur 15. Flödet [m³/s] över tid från profillinje 3 i HEC-RAS från typregnen med återkomsttid 200 år.

3.2.2 Ackumulerad volym

De ackumulerade volymerna uppmätt vid profillinje 3 för 100-årsregnen visar att de tre CDS-regnen alla når samma volym på ca 158 000 m³ ca 420 min (7 h) in i simuleringen.

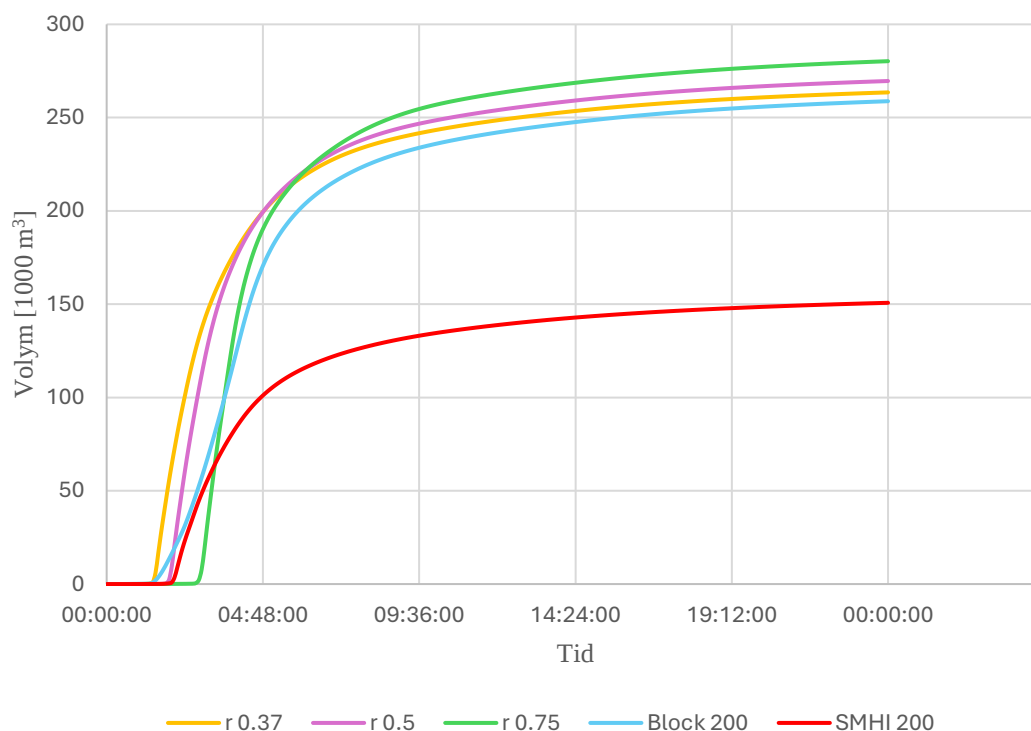
Ackumuleringen av volymen tar längre tid att börja för CDS $r = 0,75$ regnet men är sedan snabbare och det får störst ackumulerat volym. Blockregnet når inte upp till samma ackumulerade volym som de andra Dahlström regnen. Ackumulerad volym stagnerar mot slutet av simuleringen men avtar inte helt. Den slutliga ackumulerade volymen är 181 406 m³ för block 100-regnet och för de andra Dahlström-regnen är den 186 672 m³ ($r = 0,37$), 189

715 m³ ($r = 0,5$) och 193 695 m³ ($r = 0,75$). SMHI 100-regnet har en något flackare stigning och slutar på en volym 119 396 m³ (figur 16).



Figur 16. Ackumulerad volym [1000 m³] från profillinje 3 i HEC-RAS för regnen med återkomsttid 100 år.

Den ackumulerade volymen för 200-årsregnen vid profillinje 3 har samma trend som den för 100-årsregnet men volymen är större. CDS-regnen når samma volym efter ca 360 min (6 h). Den slutliga ackumulerade volymen är 258 805 m³ för block 200-regnet och för de andra Dahlström regnen är den 263 531 m³ ($r = 0,37$), 269 625 m³ ($r = 0,5$) och 280 805 m³ ($r = 0,75$). SMHI 200-regnet slutar på en volym 150 748 m³ (figur 17). Den slutliga ackumulerade volymen är likt flödet störst vid profillinje 1 och minst vid profillinje 2 (bilaga E).



Figur 17. Ackumulerad volym [1000 m³] från profilinje 3 i HEC-RAS för regnen med återkomsttid 200 år.

3.2.3 Utbredning och djup

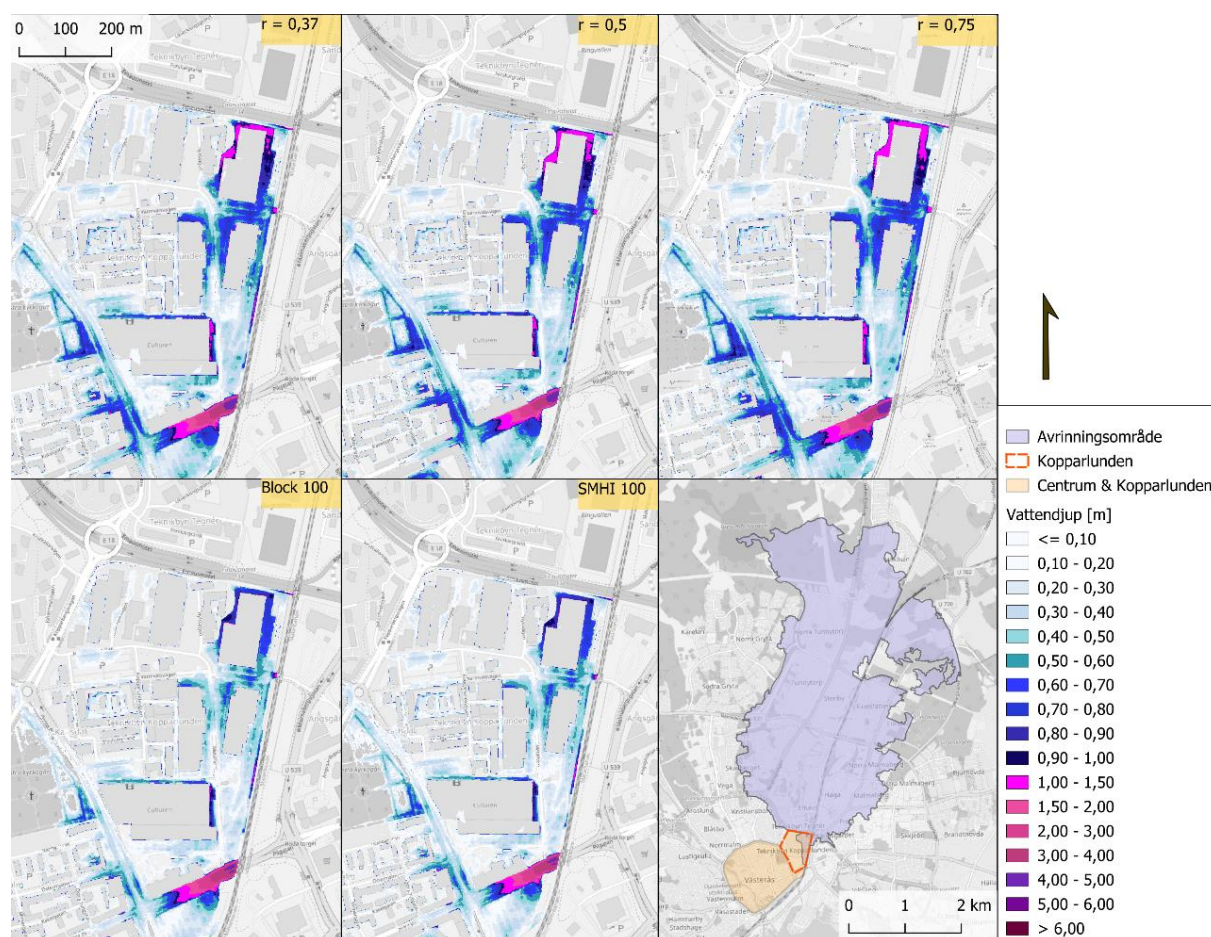
Vattendjupen analyserades för regnen med samma metod som användes tidigare (avsnitt 2.6 samt 3.1). Resultaten från HEC-RAS klipptes för att endast täcka Kopparlunden och centrum, se figur 1, och vattendjup under 0,1 m filtrerades bort.

Gällande vattendjupet vid simulering av 100-årsregnen är det marginell skillnad mellan regnen. Det maximala djupet är mellan 4,15 och 4,31 m och medeldjupet för regnen är mellan 0,39 och 0,43 m där $r = 0,75$ regnet har det största maximala och medeldjupet djupet. (tabell 4).

Utbredningen blir större för SMHI 100-regnet jämfört med block 100-regnet med 29,62 % respektive 24,61 % trots att SMHI 100-regnet är mindre i volym. Störst utbredning har CDS-Dahlström regnen där utbredningen över det studerade området är 34,54 % ($r = 0,37$) 34,98 % ($r = 0,5$) och 35,71 % ($r = 0,75$) (tabell 4 och figur 18).

Tabell 4. Statistik över maximala vattendjupen för 100 års regnen. Avgränsat till området över Kopparlunden och centrum

	$r = 0,37$	$r = 0,5$	$r = 0,75$	Block 100	SMHI 100
Max djup [m]	4,27	4,28	4,31	4,15	4,16
Medeldjup [m]	0,42	0,42	0,43	0,42	0,39
Standardavvikelse [m]	0,38	0,38	0,38	0,40	0,37
Summa av vattenfyllda raster [antal]	490 475	496 788	507 133	349 434	420 625
Översvämnings-utbredning Kopparlunden [%]	34,54	34,98	35,71	24,61	29,62



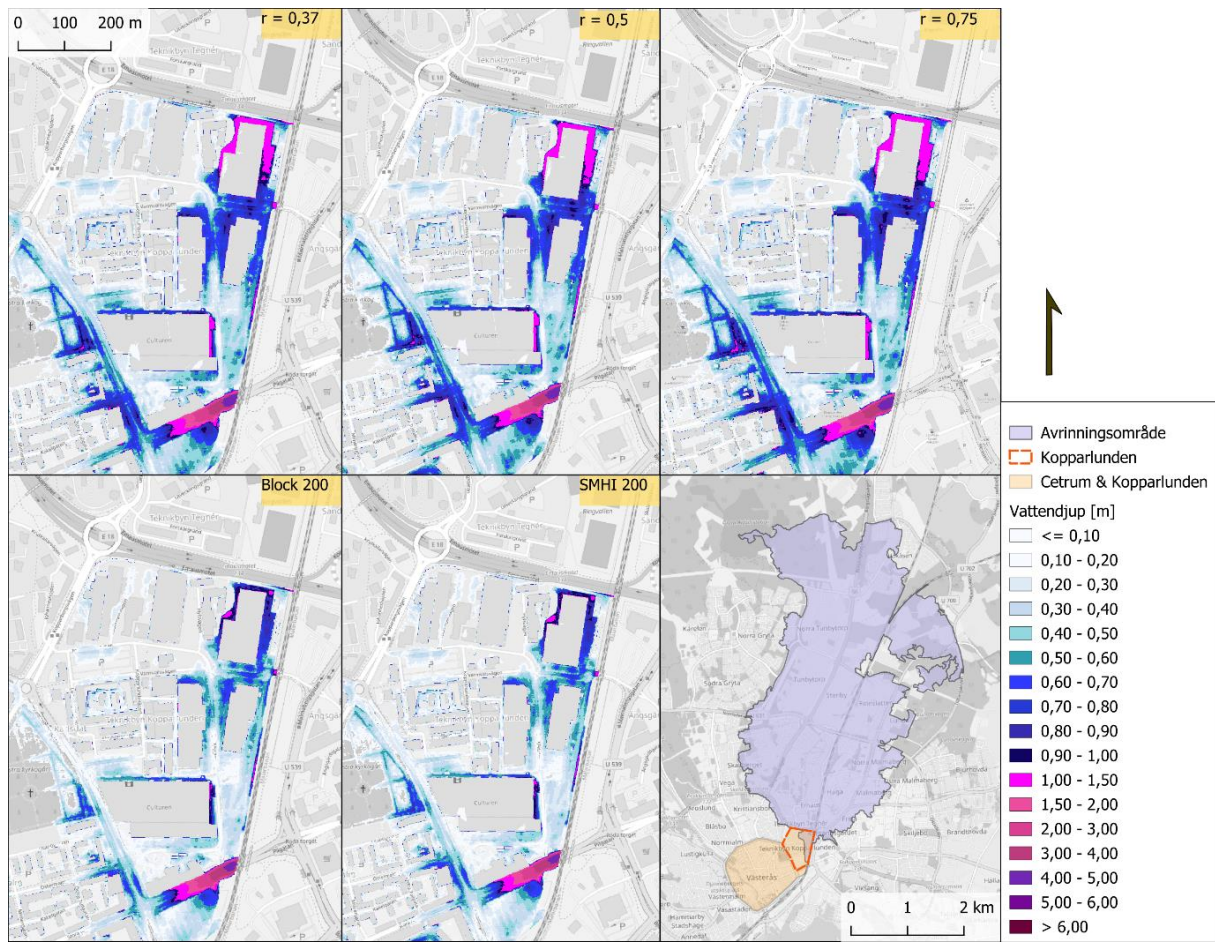
Figur 18. Maximala vattendjup i Kopparlunden för 100-årsregnen framtagna i HEC-RAS. Avrinningsområde (blå skuggning) samt Kopparlunden och Centrum (orange). Bakgrundskarta Open Street Map från QGIS.

Vid analys av vattendjupen för 200-årsregnen visas att maxdjupen blir större när intensitetsmaximum kommer senare i regnet. Skillnaden mellan Dahlström CDS-regnen i maximalt vattendjup är på några cm där $r = 0,37$ har ett maximalt djup på 4,36 m, $r = 0,5$ har ett maximalt djup på 4,38 m och $r = 0,75$ har ett maximalt djup på 4,4 m. Block 200-regnet och SMHI 200 regnet har liknade maximalt djup med 4,20 m (block 200) och 4,21 m (SMHI 200).

De visas också viss skillnad i översvämningens utbredning på någon procentenhet för Dahlström-CDS-regnen. Utbredningen av SMHI 200-regnet är 32,17 % av ytan vilket är mindre än för de andra CDS-regnen men större än för block 200-regnet som har en utbredning på 26,43 % (tabell 5). Skillnaderna i vattendjupen och dess utbredning visas också i figur 19.

Tabell 5. Statistik över maximala vattendjupen för 200 års regnen. Avgränsat till området över Kopparlunden och centrum

	$r = 0,37$	$r = 0,5$	$r = 0,75$	Block 200	SMHI 200
Max djup [m]	4,36	4,38	4,40	4,20	4,21
Medeldjup [m]	0,44	0,44	0,45	0,43	0,40
Standardavvikelse [m]	0,38	0,39	0,39	0,40	0,37
Summa av vattenfyllda raster [antal]	541 766	546 364	554 912	375 345	456 800
Översvämnings-utbredning Kopparlunden [%]	38,15	38,48	39,08	26,43	32,17



Figur 19. Maximalt vattendjupen i Kopparlunden, 200-årsregnen framtagna i HEC-RAS. Avrinningsområde (blå skuggning) samt Kopparlunden och centrum (orange). Bakgrundskarta Open Street Map från QGIS.

4. DISKUSSION

4.1 JÄMFÖRELSE MELLAN METODER

Från resultaten av analysen över översvämningen mellan den förenklade och detaljerade analysen visas en skillnad i översvämningens utbredning och djup. Den detaljerade analysen ger en större utbredning. Utbredningen för den förenklade analysen över fallstudieområdet var 6,5 % och 6,93 % för 100- respektive 200-årsregnet och för den detaljerade analysen vid simuleringens slut var utbredningen 7,63 % respektive 8,28 %. Medeldjupet mellan analyserna är inom samma storleksordning. För att bygga HEC-RAS modellen hämtades data från SCALGO Live vilket gör att trots att modellerna är från två olika mjukvaror bör de vara jämförbara.

Det är inte representativt att jämföra den förenklade analysen med det maximala vattendjupet från den detaljerade analysen då den visar djupet i det tidssteg då djupet var som störst i varje cell under hela simuleringstiden. Från den förenklade analysen finns inget tidssteg att jämföra med utan endast resultatet när vattnet lagt sig i lågpunkter. Resultatet vid simuleringsslut för den detaljerade analysen är därför en mer representativ jämförelse med den förenklade analysen då dessa bör visa samma typ av resultat. Vid fysisk planering är det dock det maximala vattendjupet som är av intresse.

Standardavvikelsen är ett mått på hur mycket vattendjupen varierar från medelvärdet av vattendjupen. Den är i samma storleksordning för alla resultaten. Standardavvikelsen är mellan 0,32 m och 0,38 m där maximala djupet från 200-årsregnet och slutet av 100-årsregnet i den detaljerade analysen har högst värde. Eftersom medeldjupet också är i samma storleksordning visar det att alla analyserna ger liknade vattendjup. Dock är det maximala vattendjupet 3,6 m respektive 6,1 m högre i den förenklade analysen (tabell 3). Platserna med de extrema vattendjupen undersöktes närmare i SCALGO Live och QGIS. Det är enskilda rasterceller vid och på byggnader där terrängdata visar en plötslig sänka/hålrum i terrängen vilket stänger in vattnet. De celler som blivit instängda fylls därför med en stor volym vatten. De höga maxdjupen från de förenklade analyserna är därför inte representativa vilket också indikeras på standardavvikelsen från analysen av vattendjupen. Ett alternativ skulle kunna varit att sortera bort extremvärden från vattendjupen som utifrån terrängen inte verkar rimliga. Detta har inte gjorts för denna studie. Möjligen hade terrängen i markhöjdmodellen kunnat modifierats och jämnats ut i SCALGO Live för att ta bort hålrummen för de enskilda rastercellerna för att få bort hålrummen. Det gjordes inte heller för denna studie.

Anledningarna till att det blir skillnader i utbredningen av översvämningen mellan de olika metoderna och modellerna är antagligen hur de beskriver vattnets rörelse över markytan. I SCALGO Live beräknas vattnets rörelse med åtta närliggande metoden vilket ger att vattnet fyller lågpunkter och rinner vidare till nästa lågpunkt men rinnvägen beskrivs inte med något flöde och har ingen utbredning. Eftersom ingen tidsaspekt finns visas en rinnväg endast som en linje och begränsas inte av längden mellan lågpunkterna eller om rinnvägen har en begränsad kapacitet. I HEC-RAS beskrivs vattnets rörelse över terrängen genom dess rörelsemängd och massa med diffusionsvågsekvationen. Detta gör att vattnets rörelse beskrivs i tre dimensioner och flödesvägarna påverkas av markens råhet och sträckan mellan lågpunkter.

Något att notera vid jämförelse av utbredningen (figur 9 och 13) är att resultaten från SCALGO Live ger vatten i Mälaren medan simuleringsslut från HEC-RAS inte har något vatten där. Anledningen till att det inte är någon vattennivå i Mälaren från simuleringens slut i HEC-RAS är inte känd. Randvillkoret *stage hydrograph* hade ett konstant värde på 0,86 m vilket är högre än den satta höjden över Mälaren från terrängmodellen vilket är 0,81 m. Därför bör vatten i Mälaren fyllts till nivån på 0,86 m genom randvillkoret. Möjligen borde vattendjupet i Mälaren tagits bort vid jämförelse av översvämningens utbredning.

En skillnad mellan analyserna som även tas upp av MSB (2017) är att de olika metoderna tar olika lång tid att genomföra. De säger att en förenklad analys med kartering av lågpunkter kan genomföras på 1 vecka och medan en detaljerad med kartering av markanvändning tar 2 till 3 veckor. Detta är med utgångspunkt från en med vana att utföra dessa analyser och kan inte jämföras med tidsåtgången i detta projekt. Tidsåtgången av analysen beror också på storleken och komplexiteten av området som ska analyseras. Men att utföra analysen i SCALGO Live där all data redan är inbyggd tar väsentligt kortare tid än att bygga modellen och utföra analysen i HEC-RAS. Själva simuleringstiden för en HEC-RAS modell över ett större område så som avrinningsområdet i detta projekt blir också lång. Tidsåtgången behöver nödvändigtvis inte vara avgörande utan val av metod bör utgå från syftet med analysen. Önskas värden för flödet, vattendjup och utbredning i en flödesväg eller översvämningar uppströms en begränsad flödesväg exempelvis måste en detaljerad analys göras. Önskas endast en översiktlig kartering över var översvämning kan ske genom identifiering av lågpunkter räcker en förenklad.

Att utföra en risk- och konsekvensanalys av skyfall består inte endast i att utreda hur avrinning rör sig och var vatten ansamlas. För att få en indikation på vilka konsekvenser som

kan fås av skyfallet är det också relevant att studera vilka flöden och hur länge översvämningen varar på en plats (Gao et al. 2021). Vilka konsekvenser som en översvämning har för exempelvis en byggnad där vatten ansamlas beror på hur länge och hur högt vattnet står intill byggnaden. Från båda metoderna fås information om vattendjupet och rinnvägar men endast en modell med tidsaspekt kan ge information om flödet. Hur flödet och vattendjupet varierar med tiden under ett skyfall visas i HEC-RAS men inte i SCALGO Live.

En positiv aspekt med att använda HEC-RAS för modellering och utförandet av en detaljerad analys är att det är ett gratisprogram där tillgängliga data från myndigheter om terrängen och markanvändningen bygger upp modellen. Fördelen med att använda data från till exempel Lantmäteriet är att modellen blir enklare att replikera senare.

Warzecha och Dudek-Klimiuk (2021) påpekar i sin studie där de använder SCALGO Live att det finns en osäkerhet i beräkningarnas tillförlitlighet från mjukvaran. Det är något som uppmärksammats i denna studie också då det inte finns information om hur SCALGO Live gör beräkningar för avrinningen i dokumentationen från programmet. Det minskar transparensen och är en nackdel med programmet.

En övergripande sammanställning av fördelar och nackdelar med de olika programvarorna använda i denna studie för förenklad och detaljerad analys, SCALGO Live och HEC-RAS visas i tabell 6.

Tabell 6. Fördelar och nackdelar med programvarorna SCALGO Live för förenklad analys och HEC-RAS för detaljerad analys.

SCALGO Live		HEC-RAS	
Fördelar	Nackdelar	Fördelar	Nackdelar
Snabb	Osäkerhet i beräkningar av flöde okänt	Får ut fler värden för översvämning med tidsaspekt	Osäkerhet när kalibrering inte kan utföras
Användarvänlig	Behöver licens	Open access	Främst gjord för simulering av vattendrag
Variabler för topografi, markanvändning m.m. finns i programmet		Ger fler värden som är viktiga vid risk- och konsekvensanalys	Måste ha tillgång till och lägga till variabler för topografi, markanvändning m.m.

För att göra en mer djupgående analys av skillnaderna mellan metoderna skulle modellerna behöva kalibreras. Då skulle analysen göras över ett område där kända parametrar finns från skyfall för att bättre validera resultaten

4.2 KÄNSLIGHETSANALYS

Med de olika regnen visas skillnader i flöde ackumulerad volym och djup. En senare topp för intensitetsmaximum ger större översvämning i form av utbredning och maximalt djup.

Skillnaderna är dock små. Avrinningen beter sig på samma sätt för 100- och 200-årsregnen.

Anledningen till att översvämningen blir större för regn med senare intensitetsmaximum kan vara att marken är mättad när peaken kommer. Marken som blir mättad av det mindre regnet som faller i början kan inte ta emot intensitetsmaximum av regnet, den bidrar då till större del till avrinningen.

Från observationer av regn med lång varaktighet har det visat sig att det inte är lika troligt att regnen har intensitetsmaximum i slutet (Olsson et al. 2017). Det har å andra sidan påvisats att ett senare intensitetsmaximum ger högre flöden vilket kan vara bra att ha vid beaktning vid modellering. Resultaten stöds också av resultaten från Chen et al. (2023), där de kom fram till samma slutsats. Det vanligaste vid skyfallsanalys är att använda CDS-regn med en skevhetsfaktor $r = 0,5$. Utifrån resultaten av denna studie bör man vid val av CDS-regn för dynamisk skyfallsanalys välja fler än ett regn för att ta höjd av osäkerheten av typregn.

Storleken på regnmängden av Dahlström (2010) och regnet från Olsson et al. (2017) (SMHI-regnen) är olika vilket gör att det inte går att göra någon direkt jämförelse av flöden mellan dessa. Dock verkar SMHI-regnen bete sig lite annorlunda. Flödesmaximum är mer förskjutet relativt till när intensitetsmaximum sker för regnet. För SMHI-regnen visas också ett lokalt maximum efter totala flödesmaximum, det visas inte för de andra CDS-regnen. Där visas endast en mindre plåtå i flödeskurvan efter flödes maximum. Vad denna ökning i flödet beror på är inte känt.

SMHI-regnet är markant mindre än Dahlström-regnen vilket är anledningen till att Dahlström är på säkra sidan vid risk- och konsekvensanalyser. Utgångspunkten för det är att man inte vill studera ett underskattat regn. Det finns också en feluppskattning i typregn vilket kan underskatta regnet jämfört med verklig nederbörd (Muhandes et al. 2023). Å andra sidan vill man heller inte överskatta regnet och få ett orealistiskt scenario. Det kan innebära att eventuella åtgärder överdimensioneras med negativa ekonomiska, sociala och miljömässiga konsekvenser. Även om resultaten mellan de olika metoderna för framtagning av

regnintensiteten skiljer sig är det intressant att regnen framtagna av SMHI är så pass mycket mindre. Det visar också på hur stor osäkerheten är vid val av regn för modellering av skyfall i en dynamisk modell med tidsaspekt. Vilken statistik och tidsvarians som används på regnet i modellen ger påverkan på resultatet men det finns inget svar på vad som är troligast eller närmast verkligheten i nuläget. Utifrån resultaten i denna studie visar att regnet har stor påverkan på modellen.

Trots skillnaden i regnmängd mellan olika regnstatistik ger blockregnet från Dahlström och SMHI-regnet, vilket är ett CDS-regn, liknade storlek på flödesmaximum. Dahlström-regnen ger en total volym på 108 respektive 135 mm och SMHI-regnen en volym på 80 respektive 93 mm, storleken på flödesmaximum blev ca. $13,5 \text{ m}^3/\text{s}$ för både block 100 och SMHI 100-regnen och $19 \text{ m}^3/\text{s}$ för block 200 och SMHI 200-regnen (figur 14 och 15). Det blir dock skillnader i den ackumulerade volymen mellan regnen (figur 16 och 17).

Något som inte studerats i känslighetsanalysen är varaktighetens påverkan på översvämningen. För vidare studier skulle därför fler varaktigheter för regnen kunna studeras. Varaktigheten rekommenderas att vara densamma som koncentrationstiden för avrinningsområdet. I HEC-RAS modellen utfördes simulering för 4 h regn och total simuleringstid var 24 h. Trots det verkar inte flödet avstannat helt då det i slutet av simuleringstiden fortfarande viss ökning i ackumulerad volym.

Framtida studier skulle kunna undersöka fler variabler i regnet där varierande varaktighet och dess påverkan skulle kunna studeras samt fler återkomsttider. Andra faktorer som inte ändrats i regnen i denna studie är påverkan av val av klimatfaktor eller olika metoder för att göra avdrag för ledningsnät. Andra utformningar på regnet är också intressanta där formen på typregn så som *metoden för genomsnittlig variabilitet* (Krvavica & Rubinić 2020) och hur de tas fram skulle vara intressanta att undersöka.

4.3 FELKÄLLOR OCH ANDRA FAKTORER

4.3.1 HEC-RAS

Markens råhet beskrivet med Mannings n påverkar avrinningen i den detaljerade analysen. De värden för Manningstal som ges av MSB (2023) bör ses som ett första värde men för ett mer representativt resultat skulle kalibrering behöva göras. I en kalibrering utförs en känslighetsanalys där råheten ändras för olika markanvändningar för att se vilka värden för råheten som ger mest representativa resultat. Det har inte gjorts på grund av data att kalibrera

mot inte funnits för denna fallstudie. Å andra sidan visar resultat från Gao et al. (2021) där kalibrering av Manningsvärden gjordes att skillnaderna i maximalt översvämningsdjup inte förändrades nämnvärt. Skillnaderna uppstod i vilken tidpunkt det maximala flödet sker men sett över hela simuleringen var skillnaderna inte stora (Gao et al. 2021).

En faktor är detaljeringsnivån i höjddata. Särskilt när modellering sker över urbana områden är det viktigt med högupplöst höjddata då vattnets rinnvägar påverkas av mindre detaljer så som utformning av vägar och trottoarer. Zeiger & Hubbart (2021) nämner från resultat av deras studie att upplösningen på höjddata bör vara mindre än 1x1 m (Zeiger & Hubbart 2021). Högre upplösning på terrängdata fanns inte att tillgå för detta projekt för att undersöka hur mycket detta påverkar resultaten.

En aspekt som påverkar vattendjupet i HEC-RAS är att vattendjupen intill byggnader blir högre än förväntat. Byggnaderna är representerade genom att de höjts upp i terrängen för att vatten inte ska rinna över byggnaderna. Det medför att byggnaderna måste vara tillräckligt höga för att vara över vattendjupet i modellen. Den plötsliga höjningen tolkas av HEC-RAS som om det är ett dike och cellerna intill fasaden blir vattenfyllda. Detta är en svaghet i programmet som är svår att komma till rätta med.

I modellen har två stora kulvertar lagts till som i verkligheten tar emot stora delar av flödet norr om Kopparlunden. Dock är det inte mycket vatten som kommer till dessa genom ytlig avrinning utan genom dagvattensystemet. Därför tar kulvertarna i modellen inte hand om lika mycket vatten som de gör i verkligheten. Detta kan vara en faktor som ger mer vatten nedströms i avrinningsområdet som går igenom Kopparlunden. Detta skulle behöva undersökas vidare genom en fördjupad analys där modellen kopplas till ledningsnätet för dagvatten.

I HEC-RAS modellen har ett regn lagts på hela modellområdet. Regnet har korrigerats genom avdrag via det tillagda infiltrationslagret där avdrag också sker för hårdgjorda ytor genom att lägga infiltration även där. En risk med att göra avdrag för ledningsnätet är att vatten försvinner från modellen som i verkligheten skulle kunna komma tillbaka till markytan via uppdämning från ledningssystemet. Andra metoder finns för att implementera schablonavdrag där ett alternativ är att göra ett konstant avdrag på själva regnet istället för att implementera en infiltrationsmodul (MSB 2023). Det kan dock riskeras att underskatta översvämning när modellområdet består av stora delar icke exploaterad mark. Att inte ha med en uppskattning

av ledningsnätets kapacitet innebär dock att översvämningens storlek kan överskattas (Anni et al. 2020). Dessa aspekter är en svaghet hos detaljerad analys jämfört med fördjupad analys.

Att endast ett regn läggs på hela modellområdet är också ett orealistiskt scenario. Skyfall är i regel korta och intensiva men över en begränsad yta (Olsson et al. 2017), därför är det inte troligt att lika mycket regn faller över ett helt avrinningsområde samtidigt. Hur stor påverkan detta har och hur man kan ta hänsyn till detta har inte undersökts i denna studie men är något som skulle kunna undersökas vidare.

Beräkningsnätets upplösning i HEC-RAS modellen och dess påverkan skulle kunna undersökas vidare. Upplösningen på beräkningsnätet var 20x20 m i modellområdet och 2,2x2,2 m för det förfinade området över Kopparlunden. Med brytningslinjerna som förfinade beräkningsnätet med en storlek på 2,2x2,2 m utanför det förfinade området och 1,4x1,4 m innanför. Storleken på beräkningsnätet är större än det rekommenderade från handledningen av MSB (2023) där de rekommenderar en storlek på 7x7 m generellt utanför intresseområdet. Anledningen till att ett större beräkningsnät användes var för att få ner beräkningstiden. Eftersom terrängen inom en beräkningscell i HEC-RAS fortfarande kan representeras genom att cellkanterna skapar tvärsnitt av terrängen kan större beräkningsceller användas utan att försämra modellen (Brunner 2024). Terrängen i fallstudien är också relativt flackt. Vattendjupet i cellen beräknas i mittpunkten där vattnet sedan lägger sig i cellens lågpunkter. En enklare analys av beräkningsnätets påverkan på flödet vid profilinje 3 gjordes där de visades att flödet minskar när beräkningsnätet blir mindre (bilaga A). För vidare studier skulle ett mindre beräkningsnät kunna användas i modellen för att undersöka påverkan på översvämningen. Vid förändring av beräkningsnätets storlek kan beräkningssteget behöva minskas och simulering kommer ta längre tid att utföra.

Något som skulle kunna undersökas vidare i framtida studier är hur upplösningen på variabler som lagds i modellen påverkar modellen samt hur de påverkar varandra. I denna studie hade markhöjdmodellen en upplösning på 1x1 m, markanvändningen en upplösning på 4x4 m och beräkningsnätet ytterligare en annan upplösning. Hur detta påverkar modellen och hur stor påverkan de olika variablerna har på varandra har inte undersökts i denna studie.

4.3.2 Infiltration

I båda modellerna, SCALGO Live och HEC-RAS, används curve number för infiltrationen. Metoden är väl använd inom modellering för avrinning på grund av dess enkelhet då den beror på två parametrar som kan sökas upp som tabellvärden när jordarterna är kända (Garen

& Moore 2005; Scalgo 2023). Garen och Moore (2005) är dock kritiska till metoden och trycker på i sin artikel att resultaten inte blir precisa från modeller som har använt CN. På grund av att metoden är framtagen från empiriska studier på 1950-talet har förenklingar gjorts som ger stora osäkerheter. Osäkerheterna, säger Garen och Moore (2005), kan ge stor påverkan på vattnets utbredning i modellen. Andra metoder för infiltrationen har inte studerats i denna studie. I SCALGO Live går det inte att välja metod för infiltration, dock kan CN värden ändras manuellt (Scalgo u.å.b). I HEC-RAS finns två metoder att välja för infiltration *SCS curve number* och *Green-Ampt* (Brunner 2024).

4.3.3 Regn

De använda typregnen i studien utgick från formen av CDS-regn vilka är det vanligaste typregnet vid skyfallsanalys i Sverige. Fördelarna med CDS är att de är enkla att konstruera med hjälp av intensitets-varaktighetskurvor från framtagen regnstatistik. De innehåller intensiteten för en viss varaktighet utspridd över den totala varaktigheten. Hur regnets tidsvarians ser ut är justerbart vilket ger flexibilitet vid modellering av skyfall. Nackdelar med att använda en konstruerad form som typregn är att de inte representerar en riktig regnhändelse (Muhandes et al. 2023). Ytterligare kalibrering av framför allt HEC-RAS modellen med avseende på verkliga regnhändelser skulle kunna validera skyfallsanalysen. Resultat av Krvavica och Rubinić (2020) visar på andra typregn som var mer representativa vid jämförelse mot verkliga regnhändelser i deras fallstudie. Resultaten från fallstudier blir dock platsspecifika och kommer troligtvis inte ge samma resultat i en annan fallstudie.

För dimensionering av dagvattenanläggningar används oftast regn framtagna med Dahlström (2010). Eftersom Dahlström regnen får större regnmängder säkrar de upp så att dagvattenanläggningar har rätt kapacitet. Statistiken är dock endast framtagen för återkomsttider upp till 10 år och från nederbörd i sydvästra Sverige. Även fast den använts för längre återkomsttider ger extrapoleringen av intensitet-varaktighets sambandet en osäkerhet. Därför är möjligen regnstatistiken från SMHI av Olsson et al. (2017) mer passande för skyfallsanalyser som visar på god trovärdighet för längre återkomsttider. Statistiken från SMHI är också framtagen av nederbördsdata från och anpassad för olika regioner i Sverige. Mer forskning och rekommendationer skulle behöva tas fram för hur och vilken regnstatistik som bör användas i målet att ge mer likvärdiga skyfallsanalyser i Sverige.

5. SLUTSATS

Syfte var att finna vad det blir för skillnader mellan en förenklad och detaljerad analys med avseende på översvämningens utbredning och djup samt vad som medför dessa skillnader. Vidare skulle en känslighetsanalys utföras med avseende på tidsvariationen på val av regn samt vald regnstatistik.

Det har visat sig att de två typerna av analyser ger en skillnad i översvämningen.

Utbredningen blir större för den detaljerade analysen med 0,28 km² för 100-årsregnet och 0,33 km² för 200-årsregnet. Djupet av översvämningen blir relativt lika där den förenklade analysen i denna fallstudie får ett något mindre medeldjup. Medeldjupet för den förenklade analysen var 0,32 m och 0,33 m för 100-respektive 200-årsregnet och för den detaljerade analysen var medeldjupet 0,39 m och 0,35 m för 100- respektive 200-årsregnet. Anledningen till olikheterna mellan modellerna är att de beskriver vattnets rörelse över terrängen på olika sätt där den detaljerade analysen tar hänsyn till tidsförlopp. Den förenklade analysen i SCALGO Live är snabb och lämplig att använda i översiktliga karteringar och tidiga skeden för att identifiera riskområden. Den detaljerade analysen i HEC-RAS lämpar sig bättre för att studera flöden och översvämningsutbredning som ligger närmare verkligheten. Det innebär att val av metod för skyfallskartering bör utgå från vilken noggrannhet som önskas och vilka värden som ska undersökas i karteringen.

Regnets tidsvarians har betydelse vid översvämningens utbredning och storlek i detaljerade analysen. När intensitetsmaximum kommer i slutet av regnet blir översvämningen större. Regnen framtagna med Dahlström (2010) visar större regn, flöden och översvämningar vid samma återkomsttid än de från Olsson et al. (2017). Storleken på flödet av avrinningen beror av både regnets utformning och regnmängd där blockregn ger mindre flöden jämfört med CDS-regn. Resultaten av denna studie visar att för framtida utveckling av rekommendationer vid skyfallsanalyser bör nationella rekommendationer om nederbörd ges då val av typregn och regnstatistik har stor påverkan på resultaten.

Skyfallsanalyser är verktyg för att förutspå vilken påverkan ett skyfall kan ha och används för att öka beredskapen mot översvämningar. SCALGO Live och förenklade analyser är bra för översiktliga karteringar medan HEC-RAS och detaljerade analyser ger fler värden för avrinningen och översvämningar. Denna studie visar att val av analysmetod samt val av typregn och regnstatistik påverkar resultatet och vilka effekter som kan förväntas av skyfall.

6. REFERENSER

- Anni, A.H., Cohen, S. & Praskievicz, S. (2020). Sensitivity of urban flood simulations to stormwater infrastructure and soil infiltration. *Journal of Hydrology*, 588. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125028>
- Boverket (2022). *Bedömning av översvämningsrisk*. https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/planering/detaljplan/lansstyrelsens-tillsyn/tillsynsvagledning_naturolyckor/tillsynsvagledning-oversvamning/riskbedomning/bedomning-oversvamning/ [2024-01-18]
- Brunner, G.W. (2020). *HEC-RAS River Analysis System - Hydraulic Reference Manual*. US ARMY CORPS OF ENGINEERS. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/ras1dtechref/latest> [2024-05-31]
- Brunner, G.W. (2024). *HEC-RAS River Analysis System HEC-RAS 2D User's Manual*. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/r2dum/6.4/introduction> [2024-01-24]
- Chen, J., Li, Y. & Zhang, S. (2023). Impact of Different Design Rainfall Pattern Peak Factors on Urban Flooding. *Water (Switzerland)*, 15 (13). <https://doi.org/10.3390/w15132468>
- Dahlström, B. (2010). *Regnintensitet – en molnfysikalisk betraktelse*. Svenskt vatten AB. <https://vattenbokhandeln.svensktvatten.se/produkt/regnintensitet-en-molnfysikalisk-betraktelse/> [2024-01-31]
- David, A. & Schmalz, B. (2020). Flood hazard analysis in small catchments: Comparison of hydrological and hydrodynamic approaches by the use of direct rainfall., december 1 2020. Blackwell Publishing Inc. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12639>
- Ennouini, W., Fenocchi, A., Petaccia, G., Persi, E. & Sibilla, S. (2024). A complete methodology to assess hydraulic risk in small ungauged catchments based on HEC-RAS 2D Rain-On-Grid simulations. *Natural Hazards*,. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06515-2>
- esri (u.å.). *Flow Direction (Raster Analysis)*. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/raster-analysis/flow-direction.htm> [2024-05-28]

- Gao, P., Gao, W. & Ke, N. (2021). Assessing the impact of flood inundation dynamics on an urban environment. *Natural Hazards*, 109 (1), 1047–1072.
<https://doi.org/10.1007/s11069-021-04868-6>
- Garen, D.C. & Moore, D.S. (2005). CURVE NUMBER HYDROLOGY IN WATER QUALITY MODELING: USES, ABUSES, AND FUTURE DIRECTIONS. *JOURNAL OF THE AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION*, 377–388
- Hennlock, M., Ekholm Matschke, H., Karlsson, A. & Nilsson, Å. (2023). *Klimatanpassning 2023 Så långt har Sveriges kommuner kommit*. Rapportnummer: C765. IVL Svenska Miljöinstitutet.
<https://www.ivl.se/download/18.53d0007188a91f959e19ea/1686658428061/C765-Klimatanpassning2023.pdf> [2024-01-31]
- Krvavica, N. & Rubinić, J. (2020). Evaluation of design storms and critical rainfall durations for flood prediction in partially urbanized catchments. *Water (Switzerland)*, 12 (7).
<https://doi.org/10.3390/w12072044>
- MSB (2017). *Vägledning för skyfallskartering: tips för genomförande och exempel på användning*. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB).
<https://rib.msb.se/filer/pdf/28389.pdf> [2024-05-31]
- MSB (2023). *Metod för skyfallskartering av tätorter*. <https://rib.msb.se/filer/pdf/30510.pdf> [2024-01-15]
- Muhandes, S., Dobson, B. & Mijic, A. (2023). A method for adjusting design storm peakedness to reduce bias in hydraulic simulations. *PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS-WATER MANAGEMENT*, 176 (1), 1–13
- Mustafa, A. & Szydłowski, M. (2021). Application of different building representation techniques in HEC-RAS 2-D for urban flood modeling using the Toce River experimental case. *PeerJ*, 9. <https://doi.org/10.7717/peerj.11667>
- Nordlöf, B. (2021). *Skyfallsanalys Kopparlunden*. SWECO Sverige AB.
- Olsson, J., Berg, P., Eronn, A., Simonsson, L., Södling, J., Wern, L. & Yang, W. (2017). *Extremregn i nuvarande och framtida klimat Analyser av observationer och framtidsscenarier*. KLIMATOLOGI Nr 47. uppl. SMHI.

- <https://www.smhi.se/publikationer/publikationer/extremregn-i-nuvarande-och-framtida-klimat-analyser-av-observationer-och-framtidsscenarier-1.129407> [2024-01-30]
- Petersson, M. (2021). *Svartån-Västeråsfjärden 2021*. Mälarenergi AB.
<https://www.malarenergi.se/globalassets/dokument/miljorapporter/2021-arsrapport-svartan-vasterasfjarden.pdf> [2024-05-31]
- Salomonsson, M., Larsson, M., Karlsson, S., Alexandersson, H. & Andreasson, M. (2017). *Svenskt Vatten Utveckling Beredskapsplanering för skyfall*. Rapport Nr 2017-03. Svenskt vatten AB. https://vav.griffel.net/filer/SVU-rapport_2017-03.pdf [2024-05-31]
- Scalgo (2023). White Paper: The Rainfall-Runoff Model in the Flash Flood Map in SCALGO Live Sweden. (Version 1.1). <https://scalgo.com/uploads/documentation/Whitepaper-RRM-SE.pdf> [2024-05-31]
- Scalgo (u.å.a). *Analysis – Depression-Free Flow*. <https://scalgo.com/en-US/scalgo-live-documentation/analysis/depression-free-flow> [2024-03-01]
- Scalgo (u.å.b). *Analysis - Flash flood Map*. <https://scalgo.com/en-US/scalgo-live-documentation/analysis/flash-flood-map> [2024-02-19]
- Scalgo (u.å.c). *Country Specific – Sweden*. <https://scalgo.com/en-US/scalgo-live-documentation/country-specific/sweden> [2024-02-06]
- Scalgo (u.å.d). *Produkter*. <https://scalgo.com/sv/produkter> [2024-05-23]
- SMHI (2023a). *Fakta om Mälaren*. <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/de-stora-sjoarna/fakta-om-malaren-1.5089> [2024-03-11]
- SMHI (2023b). *Skyfall och rotblöta | SMHI*.
<https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/skyfall-och-hagel/skyfall-och-rotblota-1.17339> [2024-01-18]
- SMHI & Svenskt Vatten (2020). *Nederbördsstatistik för dimensionering av dagvattensystem- "State of the Art"*
- Spatial Reference (2024). *ESPG:3010 SWEREF99 16 30 . PROJ 9.3.1*.
<https://spatialreference.org/ref/epsg/3010/#> [2024-02-22]
- Svenskt Vatten (2011). *Nederbördsdata vid dimensionering och analys av avloppssystem*. Publikation P104. Svenskt vatten AB.

- Svenskt Vatten (2016). *Avledning av dag-, drän-och spillvatten*. Publikation P110. Svenskt vatten AB.
- US Army Corps of Engineers (u.å.). *HEC-RAS River Analysis System - HEC-RAS Mapper User's Manual*. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rmum/6.4> [2024-05-31]
- Västerås stad (u.å.). *Kopparlunden*. <https://www.vasteras.se/kommun-och-politik/vasteras-utvecklas/kopparlunden.html> [2024-02-19]
- Warzecha, B. & Dudek-Klimiuk, J. (2023). Stormwater runoff management in Sandomierz, as an example of medium-sized European city, using SCALGO Live. *Journal of Water and Land Development*, 59, 267–274. <https://doi.org/10.24425/jwld.2023.148451>
- Xing, Y., Shao, D., Ma, X., Zhang, S. & Jiang, G. (2021). Investigation of the importance of different factors of flood inundation modeling applied in urbanized area with variance-based global sensitivity analysis. *Science of The Total Environment*, 772, 145327. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.145327>
- Zeiger, S.J. & Hubbart, J.A. (2021). Measuring and modeling event-based environmental flows: An assessment of HEC-RAS 2D rain-on-grid simulations. *Journal of Environmental Management*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112125>

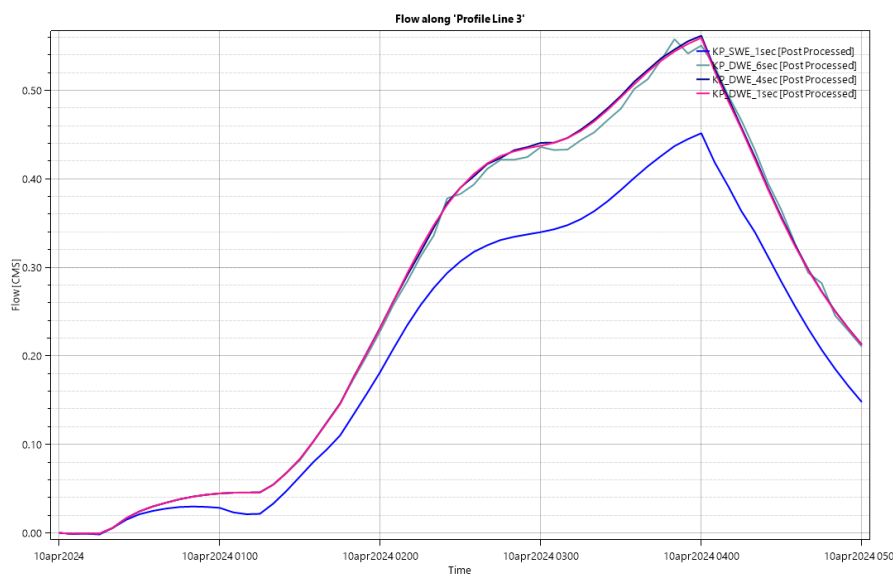
7. BILAGOR

A. MODELLBYGGE OCH VALIDERING AV MODELL

Formel för uträkning av ojämnt flöde

För modellen testades både SWE-ELM och DWE. Kan se att flödet blir mindre när SWE används vid jämförelse. Motsatta resultat från David och Schmalz (2020). De har då valt att använda SWE eftersom DWE visar på lägre flöden i hydrografen för utflödet i modellen. De säger att DWE underskattar flödet. Tiden för simuleringen ökar kraftigt vid byte av ekvation. Test från endast kopparlunden ger en simuleringstid med DWE på 9 min medan simulering med SWE tar upp till 40 min. Tidigare studie ger simuleringstid från 14,7 h med DWE och 24,4 h med SWE (David & Schmalz 2020)(David & Schmalz 2020).

Flödet från när simulering gjort över endast Kopparlunden visas i figur i). SWE ger mindre flöde än DWE. Tidssteget är 1 s för SWE och olika tidssteg för DWE. Ser att hydrografen blir jämnare när tidssteget minskar. Regnet är Dahlström (2010) blockregn med 100 år återkomsttid.



i) Flöde för modellområde över endast Kopparlunden. Tidssteget är 1 s för SWE och olika tidssteg för DWE. Regnet är Dahlström (2010) blockregn med 100 år återkomsttid.

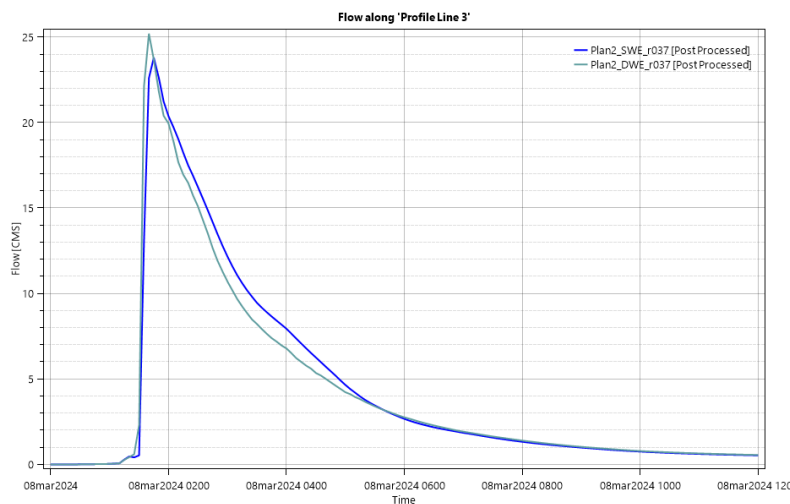
Felet för iterationerna blir mindre när DWE används jämfört med SWE. Samma tidssteg har använts på 1 s och samma regn Dahlström (2010) blockregn med 100 år återkomsttid.

Simulering över endast Kopparlunden.

KP_SWE_1sec error: 0.1341 Percent error: 0.3855

KP_DWE_1sec error: 0.007924 Percent error: 0.02278 %

Figur ii) visar flödet från simulering över totala modellområdet. Liknande flöde för både ekvationerna men SWE ger något mindre flöde. Samma tidssteg använt. Regnet är Dahlström (2010) CDS-regn med $r = 0,37$ 100 år återkomsttid.



ii) Flöde från hela modellområdet med SWE (mörkblå) och DWE (ljusblå). Regent Dahlström CDS med $r = 0,37$.

Tidssteg

Tidssteget i simuleringen valdes utefter hur flödes hydrograferna i Kopparlunden, profilinje 1 till 3, såg ut. När hydrografen blev spikig/ taggig avfärdades tidssteget. Tidssteget 6, 4 och 1 s testades över endast Kopparlunden. Hydrografen får en jämn kurva för DWE med tidssteg 4 s, se figur i).

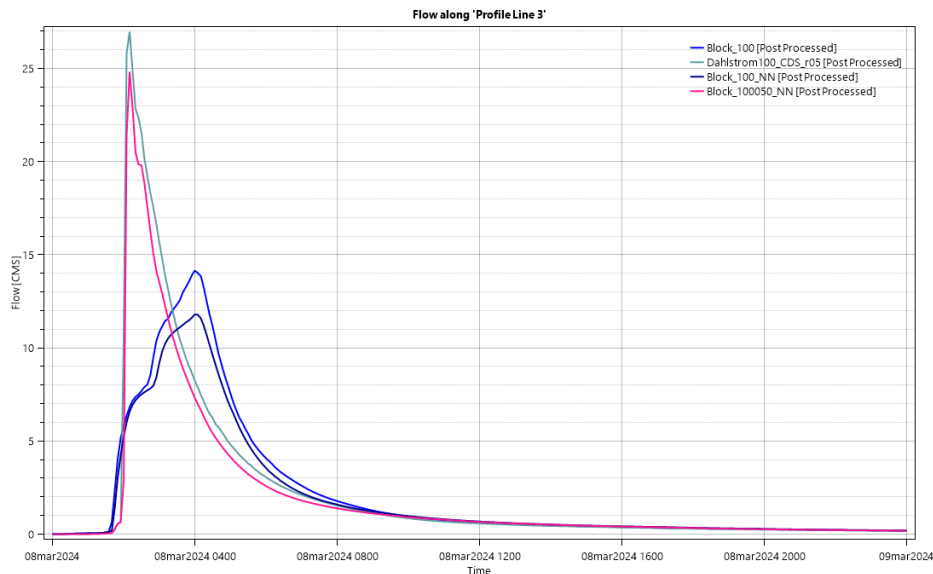
Beräkningsnät

Beräkningsnätet hade först en grov upplösning (50x50 utanför centrum, 5x5 inaför, break lines 5x5 och 2x2. Antal celler 195 958). Anledningen var att hålla nere simuleringstiden samt att området generellt är flack vilket tillåter ett större nät. En utgångspunkt för modellen var dock att följa handledningen från MSB för analysen. Beräkningsnätet förfinades då utefter rekommendationer från MSB. Undantaget var för beräkningsnätet utanför centrum.

Beräkningsnätet fick en upplösning på 20x20 m utanför centrum, där MSB rekommenderar en cellstorlek på 50 m². I centrum gavs dock beräkningsnätet den storlek MSB rekommenderar på 5 m², cellerna fick en upplösning på 2,2x2,2 m. Brytningslinjerna med storleken på 5 m² utanför centrum och 2 m² inom centrum följer rekommendationer från MSB. Det gav att den

genomsnittliga cellstorleken blev 44 m^2 , den största 961 m^2 och minsta 0 m^2 . En cell med storleken 0 är något underligt, kan vara en avrundning. Antalet celler var totalt 556 955.

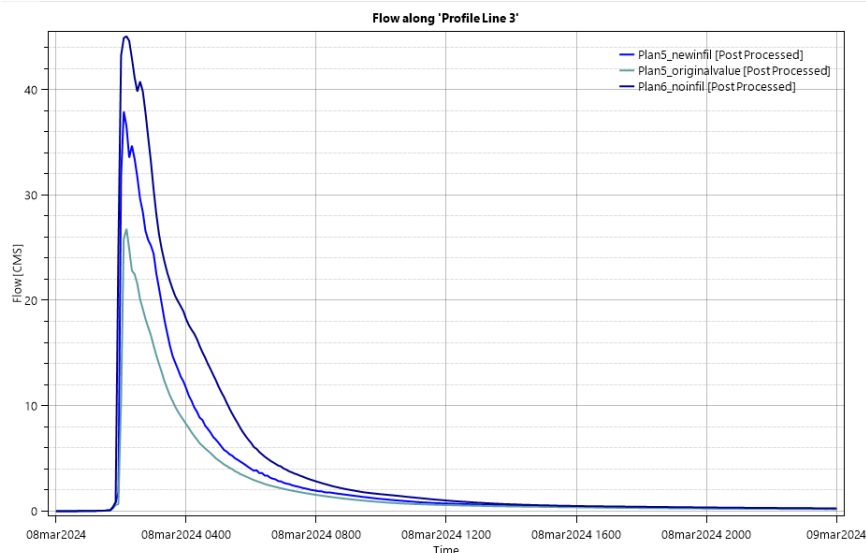
Skillnad i flöde när finare beräkningsnät och tidssteg används. Flödet minskar med de nya variablerna. Jämnheten på hydrograferna är liknade. Block_100 och Dahlström100_r05 har det grövre beräkningsnätet och tidssteg 10 s. Block_100_NN och Block_100050_NN finare beräkningsnät och tidssteg 4 s (figur iii).



iii) Flödet vid profillinje 3 för simuleringar med olika storlekar på beräkningsnätet och olika tidssteg vid körningarna. Båda regnen är Dahlström där ena är blockregn och de andra CDS med $r = 0,5$.

Infiltration

Infiltrationen är svår att validera. Förändring i infiltration påverkar inte simuleringstiden. En enklare jämförelse av hydrograferna gjordes med två olika infiltrationsscenario. De första var att använda CN-p från SCALGO och det andra var att uppskatta CN värden med hjälp av HEC-RAS 2D manualen. De olika värdena för infiltrationen påverkar flödet. Med CN från HEC-RAS ökar flödet, maxflödet med CN blir $37,9 \text{ m}^3/\text{s}$ och för CN-p $26,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Samma simulering gjordes utan någon infiltration vilket gav ett max flöde på $45 \text{ m}^3/\text{s}$ (figur iv). Eftersom det inte fanns några värden att kalibrera mot valdes CN-p som infiltrationsvärden. Detta med grund i att göra modellen mer lik den från SCALGO.



iv) Flöde vid profilinje 3 med olika värden för infiltrationen.

Byggnader

Granskning av resultaten av vattendjupet visar på skeptiska resultat runt byggnader.

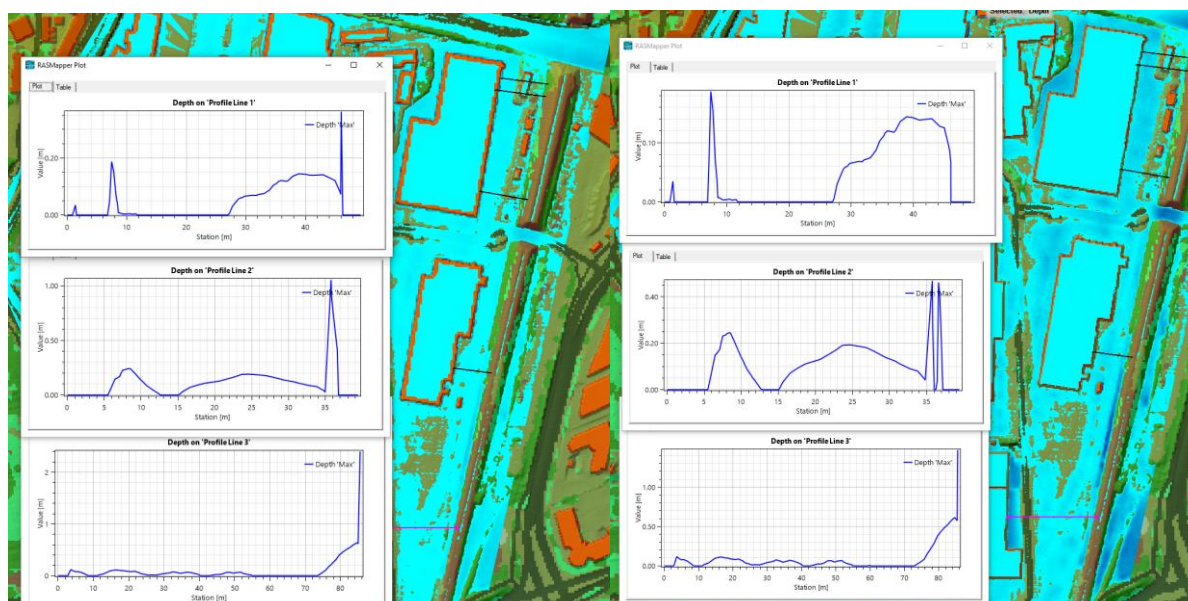
Vattendjupet blir högt intill fasaden av byggnaderna vilket rimligtvis inte är hur översvämningen beter sig i verkligheten. Tidigare studier har studerat representationen av byggnader där två alternativ kan nyttjas i HEC-RAS. Första är att höja upp byggnaderna i terrängmodellen och det andra är att inte ha med byggnaderna i terrängen och i stället lägga ett extremvärde för Mannings n över byggnader. Det andra alternativet ska ge en så pass hög skrovlighet vid platsen för byggnader att vattnet passerar runt byggnaden. Vid validering av strategierna kom en studie fram till att båda alternativen fungerar bra, alternativet med Mannings n ska vara särskilt bra när det inte finns en tillräckligt högupplöst terrängmodell att använda (Mustafa & Szydlowski 2021)(Mustafa & Szydlowski 2021). En annan studie beskriver att när alternativet med upphöjda byggnader används tolkar HEC-RAS att den snabba förändringen i terrängen som ett djupt dike och därför fylls beräkningscellerna intill byggnaden med ett extremt vattendjup. Därför rekommenderar författarna att använda metoden med Mannings n (David & Schmalz 2020)(David & Schmalz 2020).

Olika alternativ testades över ett mindre modellområde över endast Kopparlunden. Metod (1) med terrängdata där byggnader är upphöjda, (2) med samma terrängdata men med ett förfinat beräkningsnät över själva byggnaderna. Till sist (3) en annan terrängmodell där byggnaderna inte var upphöjda med ett Mannings n satt till 10 för områden med byggnader. Det blev inga nämnvärda skillnader mellan de två första metoderna. Vattendjupet var lägre intill en byggnad när det förfinade beräkningsnätet sattes över byggnaderna. Det var ingen trend för samtliga byggnader så resultatet kan varit slumpmässigt. När metoden med Mannings n användes

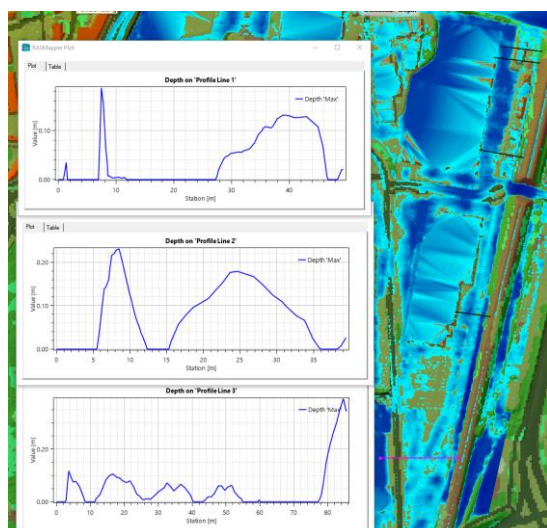
kunde en stor spridning av översvämningen ses över området för byggnaderna. Spridningen på översvämningen ansågs inte vara realistisk. Värdering av metoderna utifrån trolighet samt tid för sid för simulering. Med endast den upphöjda terrängmodellen fås ett inte troligt högt vattendjup vid kanten av byggnaderna. Med ett förfinat beräkningsnät över byggnaderna tar simuleringen längre tid samt längre tid att bygga, utan att ge nämnvärda skillnader i resultat. Med Mannings n blir utbredningen av översvämningen inte trolig jämfört med verkligheten, metoden påverkar inte simuleringstiden. Utifrån detta användes trots allt den förstnämnda metoden. Resultat för vattendjupen vid profilinjerna ses i figur v).

Metod 1 (upphöjda byggnader)

Metod 2 (finare bräkningsnät)

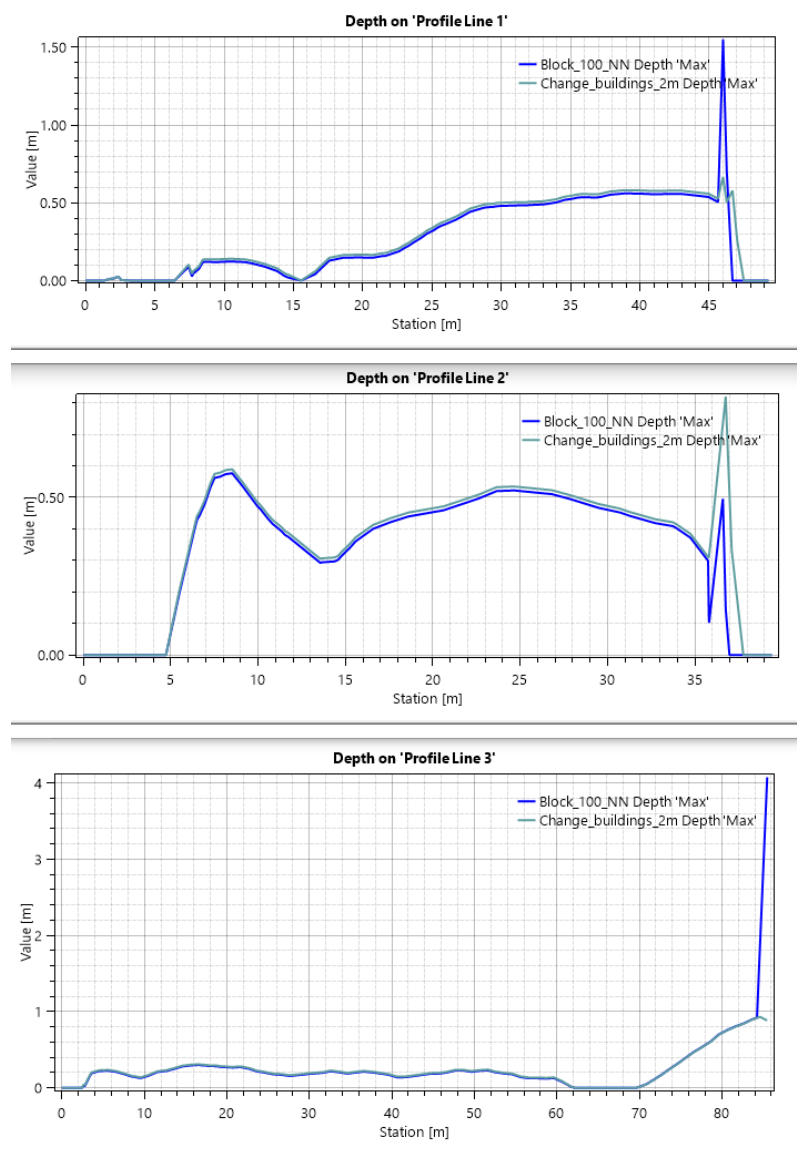


Metod 3 (inga byggnader)



v) Vattendjup vid profilinje 1,2 och 3 intill byggnader för de olika metoderna.

För att minska den drastiska skillnaden i terrängen gjordes terrängdata om där byggnaderna inte hade lika höga höjder. Istället för att vara upphöjda med 10 m ändrades det till 2 m. Gav en försändning i resultat där vattendjupet vid byggnaderna minskades något men viss ökning ses fortfarande.



vi) Skillnad i vattendjup intill byggnader när byggnaderna är upphöjda 10 m och 2 m.

B. INFILTARTION CN-p VÄRDEN

ID	Name	Packning	CN	λ	Minimum infiltration rate [mm/h]
0	NoData		0	0	0
1	NoData : Sandig moran		0	0	0
2	NoData : Urberg		0	0	0
3	NoData : Fyllning		0	0	0
4	NoData : Postglacial finsand		0	0	0
5	NoData : Isalvs sediment, sand		0	0	0
6	NoData : Postglacial grovlera		0	0	0
7	NoData : Glacial lera		0	0	0
8	NoData : Postglacial finlera		0	0	0
9	NoData : Karrtorv		0	0	0
10	NoData : Postglacial silt		0	0	0
11	NoData : Mossetorv		0	0	0
12	NoData : Vatten		0	0	0
13	NoData : Isalvs sediment		0	0	0
14	NoData : Postglacial sand		0	0	0
15	NoData : Svamsediment, ler--silt		0	0	0
16	Bare land : NoData	låg	0	0	0
17	Bare land : Sandig moran	låg	30	0.2	1000
18	Bare land : Urberg	låg	100	0.2	0
19	Bare land : Fyllning	låg	30	0.2	1000
20	Bare land : Postglacial finsand	låg	30	0.2	500
21	Bare land : Isalvs sediment, sand	låg	30	0.2	1000
22	Bare land : Postglacial grovlera	låg	77	0.3	30
23	Bare land : Glacial lera	låg	81	0.2	20
24	Bare land : Postglacial finlera	låg	97	0.4	2
25	Bare land : Karrtorv	låg	67	0.3	85
26	Bare land : Postglacial silt	låg	73	0.3	50
27	Bare land : Mossetorv	låg	77	0.3	30
28	Bare land : Vatten	låg	100	0.2	0
29	Bare land : Isalvs sediment	låg	30	0.2	1000
30	Bare land : Postglacial sand	låg	30	0.2	1000
31	Bare land : Svamsediment, ler--silt	låg	77	0.3	30
32	Water : NoData		100	0.2	0
33	Water : Sandig moran		100	0.2	0
34	Water : Urberg		100	0.2	0
35	Water : Fyllning		100	0.2	0
36	Water : Postglacial finsand		100	0.2	0
37	Water : Isalvs sediment, sand		100	0.2	0
38	Water : Postglacial grovlera		100	0.2	0
39	Water : Glacial lera		100	0.2	0
40	Water : Postglacial finlera		100	0.2	0
41	Water : Karrtorv		100	0.2	0

42	Water : Postglacial silt		100	0.2	0
43	Water : Mossetorv		100	0.2	0
44	Water : Vatten		100	0.2	0
45	Water : Isalvssediment		100	0.2	0
46	Water : Postglacial sand		100	0.2	0
47	Water : Svamsediment, ler--silt		100	0.2	0
48	Other paved : NoData	artificiell	73	0.1	0
49	Other paved : Sandig moran	artificiell	73	0.1	0
50	Other paved : Urberg	artificiell	73	0.1	0
51	Other paved : Fyllning	artificiell	73	0.1	0
52	Other paved : Postglacial finsand	artificiell	73	0.1	0
53	Other paved : Isalvssediment, sand	artificiell	73	0.1	0
54	Other paved : Postglacial grovlera	artificiell	73	0.1	0
55	Other paved : Glacial lera	artificiell	73	0.1	0
56	Other paved : Postglacial finlera	artificiell	73	0.1	0
57	Other paved : Karrtorv	artificiell	73	0.1	0
58	Other paved : Postglacial silt	artificiell	73	0.1	0
59	Other paved : Mossetorv	artificiell	73	0.1	0
60	Other paved : Vatten	artificiell	73	0.1	0
61	Other paved : Isalvssediment	artificiell	73	0.1	0
62	Other paved : Postglacial sand	artificiell	73	0.1	0
63	Other paved : Svamsediment, ler--silt	artificiell	73	0.1	0
64	Unpaved road : NoData	hög	0	0	0
65	Unpaved road : Sandig moran	hög	77	0.3	30
66	Unpaved road : Urberg	hög	100	0.2	0
67	Unpaved road : Fyllning	hög	77	0.2	30
68	Unpaved road : Postglacial finsand	hög	76	0.2	25
69	Unpaved road : Isalvssediment, sand	hög	77	0.2	30
70	Unpaved road : Postglacial grovlera	hög	85	0.2	12
71	Unpaved road : Glacial lera	hög	93	0.2	5
72	Unpaved road : Postglacial finlera	hög	99	0.2	0.5
73	Unpaved road : Karrtorv	hög	82	0.3	21
74	Unpaved road : Postglacial silt	hög	80	0.2	20
75	Unpaved road : Mossetorv	hög	82	0.3	21
76	Unpaved road : Vatten	hög	100	0.2	0
77	Unpaved road : Isalvssediment	hög	77	0.3	30
78	Unpaved road : Postglacial sand	hög	77	0.3	30
79	Unpaved road : Svamsediment, ler--silt	hög	85	0.2	12
80	Shallow vegetaion : NoData	låg	0	0	0
81	Shallow vegetaion : Sandig moran	låg	30	0.2	1000
82	Shallow vegetaion : Urberg	låg	100	0.2	0
83	Shallow vegetaion : Fyllning	låg	30	0.2	1000
84	Shallow vegetaion : Postglacial finsand	låg	30	0.2	500
85	Shallow vegetaion : Isalvssediment, sand	låg	30	0.2	1000
86	Shallow vegetaion : Postglacial grovlera	låg	77	0.3	30

87	Shallow vegetaion : Glacial lera	låg	81	0.2	20
88	Shallow vegetaion : Postglacial finlera	låg	97	0.4	2
89	Shallow vegetaion : Karrtorv	låg	67	0.3	85
90	Shallow vegetaion : Postglacial silt	låg	73	0.3	50
91	Shallow vegetaion : Mossetorv	låg	77	0.3	30
92	Shallow vegetaion : Vatten	låg	100	0.2	0
93	Shallow vegetaion : Isalvsediment	låg	30	0.2	1000
94	Shallow vegetaion : Postglacial sand	låg	30	0.2	1000
95	Shallow vegetaion : Svamsediment, ler--silt	låg	77	0.3	30
96	Dense vegetation : NoData	låg	0	0	0
97	Dense vegetation : Sandig moran	låg	30	0.2	1000
98	Dense vegetation : Urberg	låg	100	0.2	0
99	Dense vegetation : Fyllning	låg	30	0.2	1000
100	Dense vegetation : Postglacial finsand	låg	30	0.2	500
101	Dense vegetation : Isalvsediment, sand	låg	30	0.2	1000
102	Dense vegetation : Postglacial grovlera	låg	77	0.3	30
103	Dense vegetation : Glacial lera	låg	81	0.2	20
104	Dense vegetation : Postglacial finlera	låg	97	0.4	2
105	Dense vegetation : Karrtorv	låg	67	0.3	85
106	Dense vegetation : Postglacial silt	låg	73	0.3	50
107	Dense vegetation : Mossetorv	låg	77	0.3	30
108	Dense vegetation : Vatten	låg	100	0.2	0
109	Dense vegetation : Isalvsediment	låg	30	0.2	1000
110	Dense vegetation : Postglacial sand	låg	30	0.2	1000
111	Dense vegetation : Svamsediment, ler--silt	låg	77	0.3	30
112	Farmland : NoData	hög	0	0	0
113	Farmland : Sandig moran	hög	77	0.3	30
114	Farmland : Urberg	hög	100	0.2	0
115	Farmland : Fyllning	hög	77	0.2	30
116	Farmland : Postglacial finsand	hög	76	0.2	25
117	Farmland : Isalvsediment, sand	hög	77	0.2	30
118	Farmland : Postglacial grovlera	hög	85	0.2	12
119	Farmland : Glacial lera	hög	93	0.2	5
120	Farmland : Postglacial finlera	hög	99	0.2	0.5
121	Farmland : Karrtorv	hög	82	0.3	21
122	Farmland : Postglacial silt	hög	80	0.2	20
123	Farmland : Mossetorv	hög	82	0.3	21
124	Farmland : Vatten	hög	100	0.2	0
125	Farmland : Isalvsediment	hög	77	0.3	30
126	Farmland : Postglacial sand	hög	77	0.3	30
127	Farmland : Svamsediment, ler--silt	hög	85	0.2	12
128	Peved road : NoData	artificiell	73	0.1	0
129	Peved road : Sandig moran	artificiell	73	0.1	0
130	Peved road : Urberg	artificiell	73	0.1	0

131	Peved road : Fyllning	artificiell	73	0.1	0
132	Peved road : Postglacial finsand	artificiell	73	0.1	0
133	Peved road : Isalvssediment, sand	artificiell	73	0.1	0
134	Peved road : Postglacial grovlera	artificiell	73	0.1	0
135	Peved road : Glacial lera	artificiell	73	0.1	0
136	Peved road : Postglacial finlera	artificiell	73	0.1	0
137	Peved road : Karrtorv	artificiell	73	0.1	0
138	Peved road : Postglacial silt	artificiell	73	0.1	0
139	Peved road : Mossetorv	artificiell	73	0.1	0
140	Peved road : Vatten	artificiell	73	0.1	0
141	Peved road : Isalvssediment	artificiell	73	0.1	0
142	Peved road : Postglacial sand	artificiell	73	0.1	0
143	Peved road : Svamsediment, ler--silt	artificiell	73	0.1	0
144	Bare rock : NoData	hög	0	0	0
145	Bare rock : Sandig moran	hög	77	0.3	30
146	Bare rock : Urberg	hög	100	0.2	0
147	Bare rock : Fyllning	hög	77	0.2	30
148	Bare rock : Postglacial finsand	hög	76	0.2	25
149	Bare rock : Isalvssediment, sand	hög	77	0.2	30
150	Bare rock : Postglacial grovlera	hög	85	0.2	12
151	Bare rock : Glacial lera	hög	93	0.2	5
152	Bare rock : Postglacial finlera	hög	99	0.2	0.5
153	Bare rock : Karrtorv	hög	82	0.3	21
154	Bare rock : Postglacial silt	hög	80	0.2	20
155	Bare rock : Mossetorv	hög	82	0.3	21
156	Bare rock : Vatten	hög	100	0.2	0
157	Bare rock : Isalvssediment	hög	77	0.3	30
158	Bare rock : Postglacial sand	hög	77	0.3	30
159	Bare rock : Svamsediment, ler--silt	hög	85	0.2	12
160	Building : NoData	artificiell	73	0.1	0
161	Building : Sandig moran	artificiell	73	0.1	0
162	Building : Urberg	artificiell	73	0.1	0
163	Building : Fyllning	artificiell	73	0.1	0
164	Building : Postglacial finsand	artificiell	73	0.1	0
165	Building : Isalvssediment, sand	artificiell	73	0.1	0
166	Building : Postglacial grovlera	artificiell	73	0.1	0
167	Building : Glacial lera	artificiell	73	0.1	0
168	Building : Postglacial finlera	artificiell	73	0.1	0
169	Building : Karrtorv	artificiell	73	0.1	0
170	Building : Postglacial silt	artificiell	73	0.1	0
171	Building : Mossetorv	artificiell	73	0.1	0
172	Building: Vatten	artificiell	73	0.1	0
173	Building: Isalvsadimant	artificiell	73	0.1	0
174	Building: Postgalcial sand	artificiell	73	0.1	0
175	Building: Svamsediment, ler--silt	artificiell	73	0.1	0

C. EKVATIONER FÖR OJÄMT FLÖDE I HEC-RAS

Samtlig information i detta stycke är från *HEC-RAS Hydraulic Reference Manual* (Brunner 2020).

Bevarande av massa

Genom antagandet att flödet inte är komprimerbart kan bevarande av massan beskrivas med ekvation C1.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q \quad (C1)$$

Där:

h : vattendjupet [L]

t : tid [T]

u och v : komponenter för hastigheten för riktningarna i x - och y -led [L/T]

q : flödet [L^3/T]

Tecknet på flödet kan vara negativt eller positivt beroende på om det sänka respektive källa för flödet.

Samma ekvation kan beskrivas i vektorform vilket ger ekvation C2

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (h\mathbf{V}) = q \quad (C2)$$

Där

$\mathbf{V} = (u, v)^T$ är hastighetsvektorn [L/T]

∇ är gradienten given av och $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)^T$.

Genom att integrera ekvation C2 över en horisontell yta med normal vektorn $\mathbf{n}$ och använda sig av Gauss divergensteori vilket säger att summan av alla källor (eller sänkor vilket då är negativa) ger flödet från området ger då ekvation C3

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_A h dA + \iint_S (h\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) dS = Q \quad (C3)$$

Där

A : vätskans volym [L^3]

$\mathbf{n}$: enhetsvektorn normaliserad mot gränserna givan av S .

Från ekvation fås Q vilket är flödet [L^3/T] som korsar ytan så som infiltration, evaporation och regn. Den integrerade formen av massans bevarande ger att A kan beskriva en ändlig volym och integralen kan räknas ut med värden från höjddata.

Bevarande av rörelsemängd

Shallow Water equations (ekvation C4 och C5).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f_c v = -g \frac{\partial z_s}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{t,x} h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{t,y} h \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{b,x}}{\rho R} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho h} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} \quad (C4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f_c u = -g \frac{\partial z_s}{\partial y} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{t,x} h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{t,y} h \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{b,y}}{\rho R} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho h} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} \quad (C5)$$

Där:

u och v : hastighet i kartetiskt koordinatsystem [L/T]

g : gravitationskonstant [L/T²]

z_s : vattenytans höjd [L]

$v_{t,x}$ och $v_{t,y}$: horisontella eddy viskosity (turbolens) i x resp. y riktning [L²/T]

$\tau_{b,x}$ och $\tau_{b,y}$: botten skjuvspänning i x resp. y riktning [M/L/T²]

R : hydraulisk radie [L]

$\tau_{s,x}$ och $\tau_{s,y}$: Spänning på ytan orsakad av vind i x resp. y riktning [M/L/T²]

h : Vattendjup [L]

f_c : parameter för coriolis [1/T]

p_a : atmosfäriskt tryck [M/L/T²]

Ekvation C3 beskriver flöde i x-riktning och ekvation C4 beskriver flöde i y-riktning

I diffusionsvågsekvationen har förenklingar gjorts och där är accelerationstermerna borttagna vilket ger förenklingar vid beskrivning av bevarande av rörelsemängden, se ekvation C6

$$\frac{gn^2}{R^{4/3}} |\mathbf{V}| \mathbf{V} = -g \nabla z_s - \frac{1}{\rho} \nabla p_a + \frac{\tau_s}{\rho h} \quad (C6)$$

Där:

$\mathbf{V}$: Hastighetsvektor [L/T]

R : hydraulisk radie [L]

z_s : vattennivåns höjd [L]

n : Mannings n [T/L^{1/3}]

ρ : vattnets densitet [M/L³]

p_a : atmosfäriskt tryck [M/L/T²]

τ_s : vind-skjuvspänning [M/L/T²]

Bevarande av rörelsemängdens kan förenklas ytterligare genom antagande av trycket, hastigheten och friktionen vilket ger slutliga diffusionsvågsekvationen, ekvation C7.

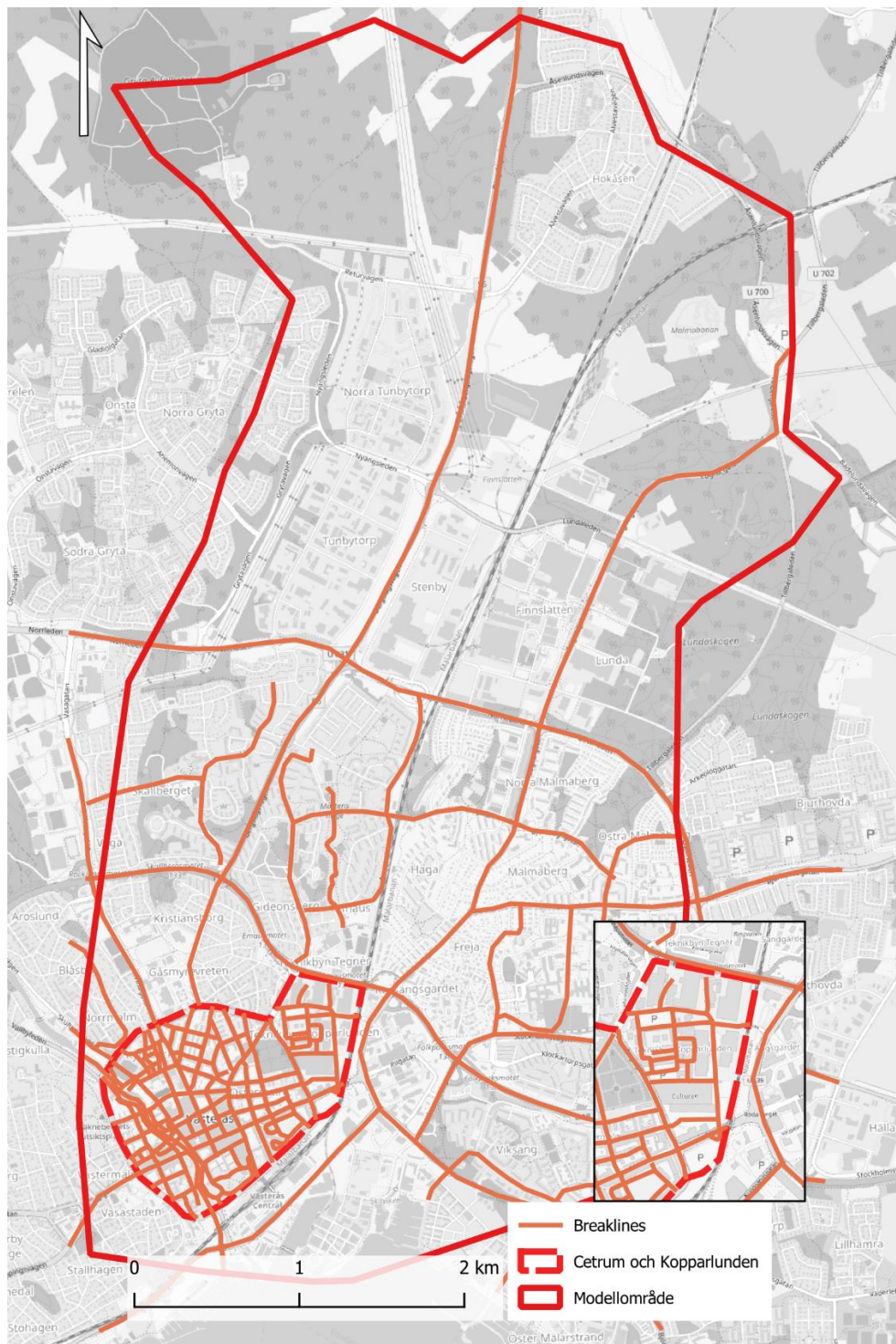
$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (\beta \nabla z_s) + S + q \quad (C7)$$

Där:

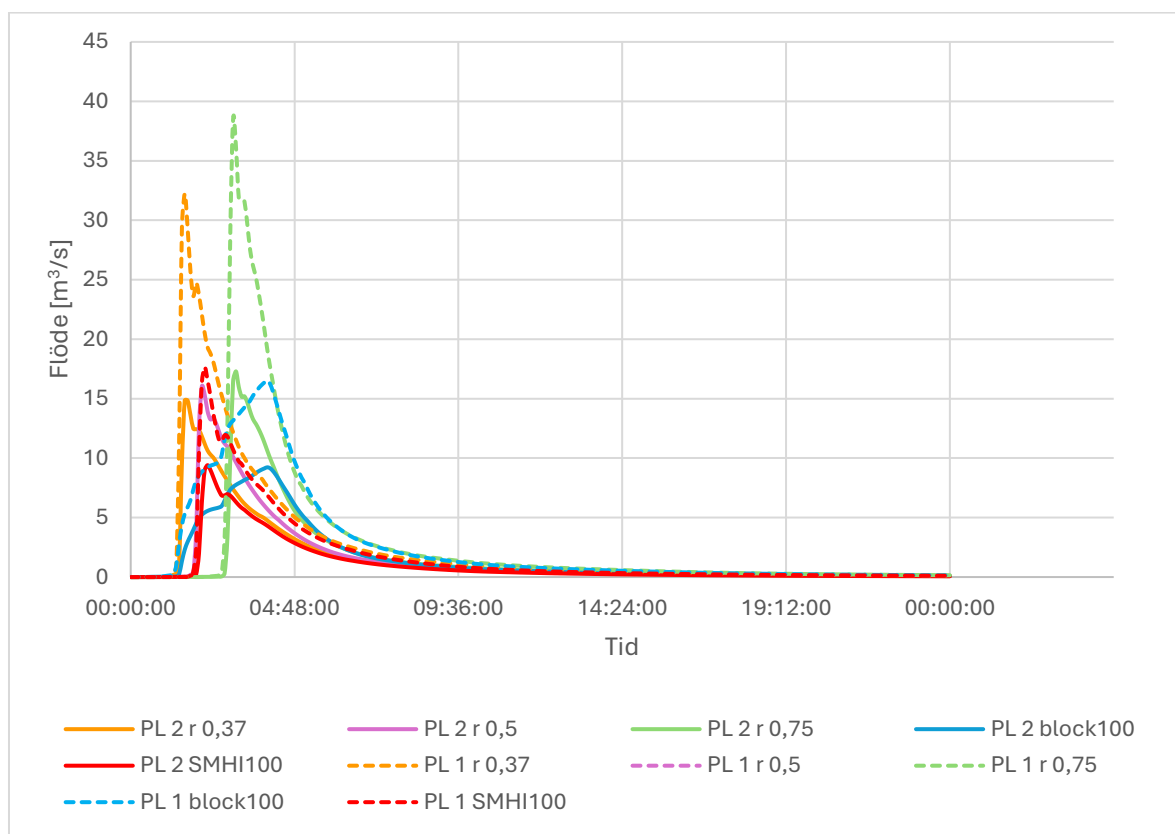
$$\beta = \frac{hR^{2/3}}{n} \left| \nabla z_s + \frac{1}{\rho g} \nabla p_a - \frac{\tau_s}{\rho g h} \right|^{-1/2}$$

$$S = \nabla \cdot \left[\beta \left(\frac{1}{\rho g} \nabla p_a - \frac{\tau_s}{\rho g h} \right) \right]$$

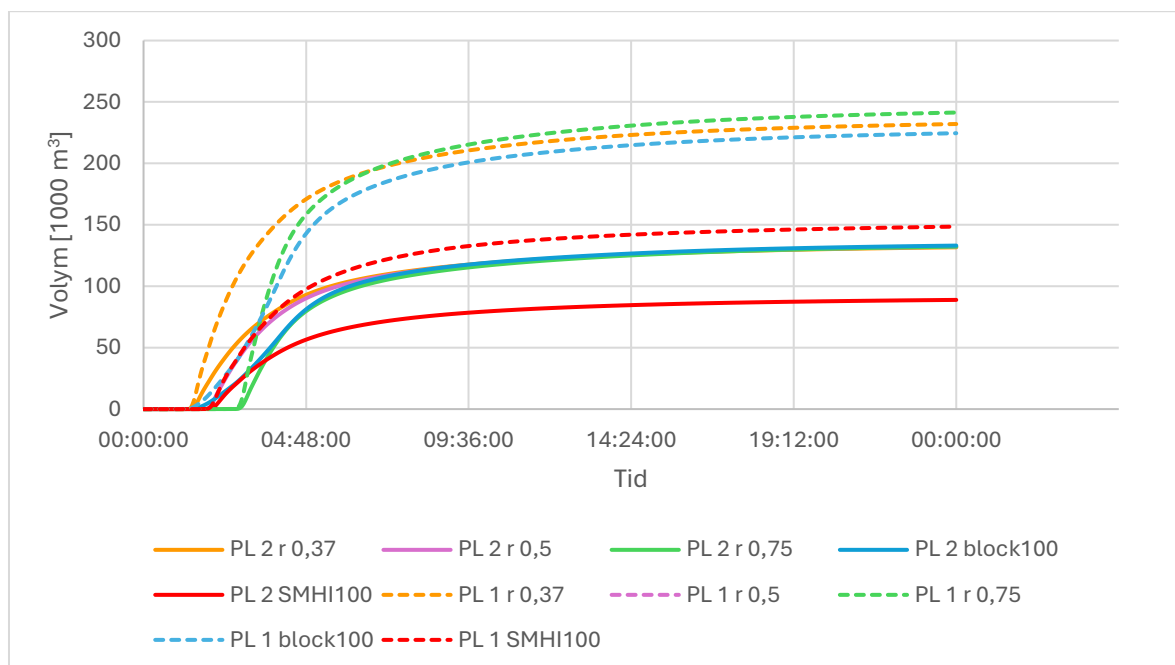
D. BREAKLINES



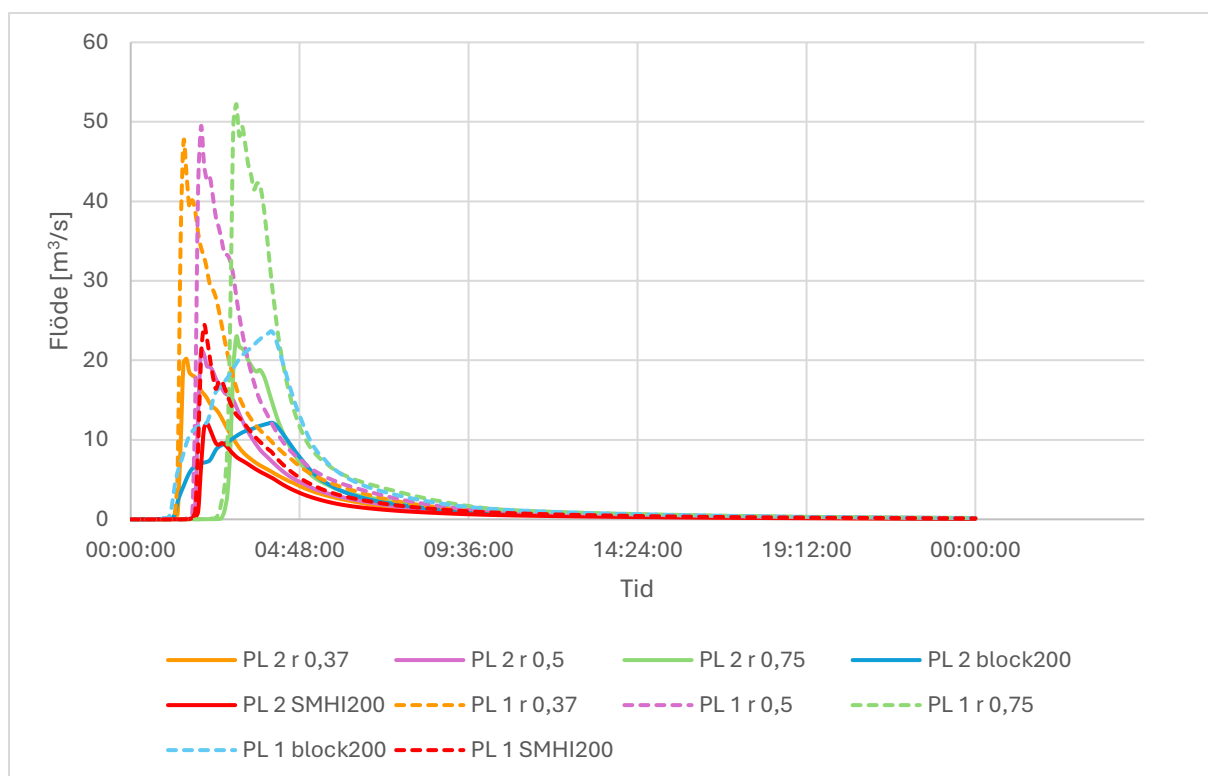
E. GRAFER FRÅN PROFILE LINE 1 OCH 2 KÄNSLIGHETSANALYS



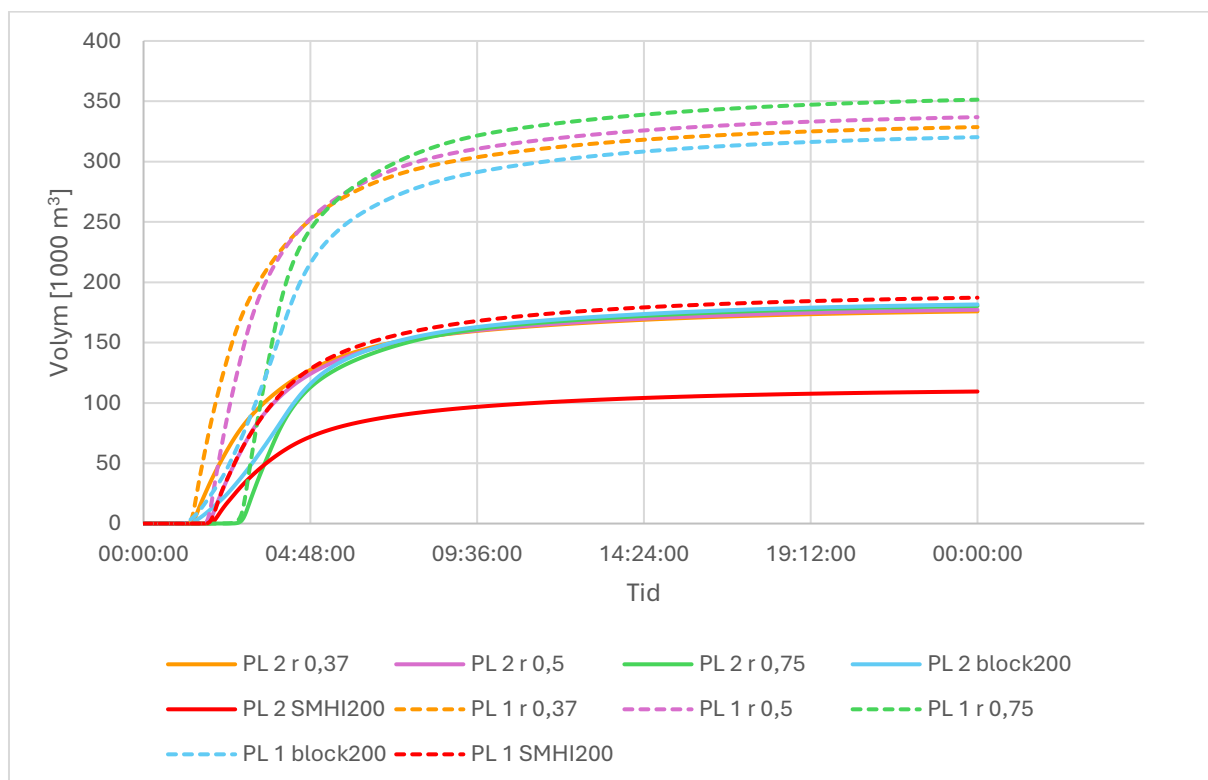
Flöde 100 års regn vid profilinje 1 och 2.



Akkumulerad volym av 100 års regn vid profilinje 1 och 2.



Flöde 200 års regn vid profilinje 1 och 2.



Akkumulerad volym av 200 års regn vid profilinje 1 och 2.