



UPPSALA  
UNIVERSITET



UPTEC W 20018

Examensarbete 30 hp  
Juli 2020

# Skyfallskartering och åtgärdsanalys för Akademiska sjukhuset i Uppsala

Hydraulisk modellering i MIKE 21 och  
känslighetsanalys

---

Alexi Lampinen

# Referat

## Skyfallskartering och åtgärdsanalys för Akademiska sjukhuset i Uppsala – Hydraulisk modellering i MIKE 21 och känslighetsanalys

*Alexi Lampinen*

Översvämningar till följd av skyfall har blivit allt vanligare och förväntas att öka i takt med klimatförändringarna. Översvämningar kan ställa till stora skador för ett samhälle, framförallt när de samhällsviktiga verksamheterna blir drabbade. För att undvika att detta sker bör samhället vara byggt för att tåla stora volymer vatten som faller vid ett skyfall. Ett steg för att nå dit är att göra en skyfallskartering där flödesvägar, vattenvolymer och översvämningens utbredning tas fram genom hydraulisk modellering. Utifrån skyfallskarteringen kan sårbara områden upptäckas och förebyggande åtgärder kan utföras för att minska översvämningens negativa påverkan.

Akademiska sjukhuset i Uppsala är en samhällsviktig verksamhet och har tidigare haft problem med översvämningar. I den här studien har en skyfallskartering utförts på Akademiska sjukhusets område för att ta reda på översvämningens utbredning vid ett skyfall och vilka åtgärder som lämpar sig för att förhindra översvämningar. Skyfallskarteringen utfördes i det tvådimensionella (2D) hydrauliska modelleringsprogrammet MIKE 21 Flow Model. Eftersom en skyfallskartering baseras på många generaliseringar finns det vissa osäkerheter kring valet av parametrar. Därför har även en känslighetsanalys utförts kring valet av regntyp (Chicago Design Storm (CDS) jämfört med ett blockregn), regnets varaktighet, grönyrtornas avrinningskoefficient och markens infiltrationshastighet.

Indata till modellen baserades på olika kartdata som bearbetades i GIS-programmet ArcMap. Flera olika regn med varierande återkomsttid simulerades. Resultaten visade att det blir översvämning inne på sjukhusområdet vid ett 100-årsregn som förvärras när återkomsttiden ökar. Åtgärdsanalysen utfördes genom att lägga in förändringar i höjdmodellen för att se hur det påverkar översvämningens utbredning. Analysen visade att åtgärder som jordvallar och höjdsättning av marken kan tillämpas på området för att minska översvämningsrisken.

Resultatet från känslighetsanalysen visade att ett CDS-regn ger större översvämningsekvenser i modelleringen än om ett blockregn av samma återkomsttid och varaktighet används. Känslighetsanalysen av varaktigheterna visade att en lång varaktighet kan leda till låga flödestoppar som inte representerar ett skyfall väl. En avrinningskoefficient på 0,4 beskriver infiltrationen i området väl och när en större avrinningskoefficient används tenderar översvämningen att bli större på grönyrtorna. Till sist visade resultatet att infiltrationshastigheten är en känslig parameter som bör väljas efter mer noggrann analys av marken i modelleringsområdet.

**Nyckelord:** Skyfallsanalys, pluvial översvämning, översvämningssåtgärder, skyfallshantering, GIS, SCALGO, samhällsviktig verksamhet.

*Institutionen för geovetenskaper, Luft- vatten och landskapslära, Uppsala universitet, Villavägen 16, SE-75236 Uppsala, Sverige. ISSN 1401-5765*

# Abstract

## **Cloudburst mapping and flood prevention analysis for Uppsala University Hospital – Hydraulic modelling in MIKE 21 and sensitivity analysis**

*Alexi Lampinen*

Flooding as a cause of cloudbursts have become more common and is expected to increase with climate change. Floods can cause substantial damage to a society, especially when the critical societal functions are affected. To avoid this the city should be built to tolerate large volumes of water from cloudbursts. As a step on the way to accomplish this, a cloudburst mapping could be made where flow paths, water volumes and the extent of the flooding are studied through hydraulic modelling. Through the cloudburst mapping, vulnerable areas can be spotted, and flood prevention measures can be taken to lessen the extent of the floods negative impact.

Uppsala University Hospital serves a critical societal function and has previously had problems with flooding. In this project a cloudburst mapping has been made in the two dimensional (2D) hydraulic modelling program, MIKE 21. This was done to find out the extent of a flood caused by a cloudburst event and what measures that can be taken to prevent floods. A cloudburst mapping is based off many generalized assumptions and there are some uncertainties when selecting the parameters. Because of this, a sensitivity analysis was performed on the selection of rain-type (Chicago Design Storm (CDS) vs. block-rain), rain duration, the runoff coefficient and the soil's infiltration capacity.

The inputs of the model were based off different geographic data and then constructed in the GIS-program ArcMap. Several different rain events with varying duration and return periods were simulated. The results showed that there is considerable flooding in the area after a rain with a 100-year return period and it gets worse when the return period increases. The flood prevention analysis was made by editing the terrain to mimic flood prevention measures and study how the extent of the flood responds to the edits. The analysis showed that measures like soil barriers and changes in elevation were effective in lessening the risk of flooding.

The results from the sensitivity analysis showed that a CDS-rain causes a more significant flooding compared to a block-rain of the same return period and duration. The sensitivity analysis of the rain duration proved that a long duration can lead to flat flow curves that doesn't resemble a flow curve from a cloudburst event. A runoff coefficient of 0.4 describes the infiltration in the area well and with a larger coefficient the flooding on greenery tend to grow. Lastly, the infiltration capacity proved to be a sensitive parameter that needs to be selected carefully, preferably after a thorough soil analysis.

**Key words:** Cloudburst analysis, pluvial flooding, urban flooding, flood control, GIS, SCALGO.

*Department of Earth Sciences, Program for Air, Water and Landscape Science, Uppsala university, Villavägen 16, SE-75236 Uppsala, Sverige. ISSN 1401-5765.*

# Förord

Det här examensarbetet avslutar mina fem år av studier på Civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet. Projektet var beställt och möjliggjordes av Marcus Nystrand på Region Uppsala. Projektet utfördes på WSP med handledning av Sofia Thurin. Ämnesgranskare var Ingrid Wesström vid Institutionen för mark och miljö på Sveriges lantbruksuniversitet.

Jag vill rikta tack till Kristina Wilén på WSP som gav mig möjligheten till det här intressanta examensarbetet, Sten Blomberg på DHI för att ha varit flexibel med licensen för MIKE 21, Hampus Åkerblom på SCALGO som hjälpte mig med licensen för SCALGO, Simon Rieger på WSP för snabb och pedagogisk hjälp med GIS och MIKE 21, Svenskt Vatten för tillåtelse att använda deras figur.

Självklart vill jag tacka min handledare Sofia Thurin som har väglett mig genom hela projektet och som har lärt mig otroligt mycket. Jag vill tacka Ingrid Wesström och Abraham Joel för stöttning och handledning i mitt arbete. Tack till Marcus Nystrand för ett roligt examensarbete och god lunch. Jag vill tacka min barndomsvän Robin Mattebo som har tagit sig tid att läsa igenom min rapport för att ge feedback. Tack till Maria Helin för att jag fick använda hennes L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X-mall.

Ett extra tack går till min klass och hela W-programmet. Jag känner mig lyckligt lottad som har fått lära känna så många underbara människor som förgyllt min studietid.

Till sist vill jag tacka min fina familj. Ni är bäst!

Uppsala, juni 2020

*Alexi Lampinen*

## Populärvetenskaplig sammanfattning

Klimatförändringen är ett faktum. Med sig för den ett varmare klimat som gör att luften kan innehålla mer vatten innan det faller som nederbörd. Detta kommer göra att kraftigare nederbördstillfällen, skyfall, kommer att bli vanligare. Vid riktigt stora skyfall hinner inte marken med att ta upp vattnet och det rinner istället av på ytan. Något som förvärrar situationen är att städerna växer och därmed även andelen asfalt, torg och andra hårda ytor där vatten inte kan tränga ner i jorden. Detta leder till ännu större vattenvolymer på markytan som ledningsnätet inte hinner ta hand om och risk för översvämning uppstår.

Översvämningar kan orsaka riktigt stora skador för samhället, som till exempel vid skyfallet i Köpenhamn sommaren 2011. På mindre än två timmar föll det 155 mm vatten, vilket ungefär motsvarar en badkarsvolym per kvadratmeter. Skadorna som skyfallet orsakade har uppskattats att kosta nästan tio miljarder svenska kronor. Många verksamheter i staden blev hårt drabbade och inte minst stadens sjukhus. Det var nära att sjukhusens reservkraft slogs ut och ett sjukhus utan elektricitet kan snabbt leda till allvarliga konsekvenser för patienterna.

Akademiska sjukhuset har också haft skador till följd av ett skyfall. Sommaren 2018 föll det ett skyfall över Uppsala och vatten trängde in i sterilcentralen på Akademiska sjukhuset. Det här ledde till att den sattes ur funktion och sterilisering fick göras på annan ort. Sjukhus är en av de viktigaste verksamheter ett samhälle har, en så kallad samhällsviktig verksamhet. De behöver skyddas från skador och störningar till följd av skyfall så att folk ska fortsatt kunna vårdas och ambulansernas utryckningsvägar hålls fria från stående vatten.

Syftet med den här studien har varit att hjälpa Region Uppsala med att utreda vad det finns för översvämningssrisk på sjukhusområdet och vad som kan göras på området för att undvika översvämning i framtiden. För att ta reda på det behöver en skyfallskartering göras. En skyfallskartering är en studie av hur vattnet flödar och vart det slutligen ansamlas vid ett skyfall. Den utfördes i det hydrauliska modelleringsprogrammet MIKE 21 Flow Model. Som indata till karteringen behövdes en beskrivning av terrängen och markanvändningen i Akademiska sjukhusets avrinningsområde. Vidare behövdes det information om regnets intensitet som skulle användas i modelleringen. Regnets intensitet beror av vilken återkomsttid och varaktighet det har. För en skyfallskartering behöver ett regn med en återkomsttid på minst 100 år användas. Det betyder att regnet har en sannolikhet att inträffa en gång vart 100:e år.

Resultatet från skyfallskarteringen visade att det finns några stora flödesvägar in i sjukhusområdet, men en stor andel av vattnet som ansamlas vid ett skyfall skapas på området. Det fanns några områden som var utpekade av Region Uppsala som extra intressanta där vatten ansamlas vid ett skyfall och kan påverka verksamheten. En utredning gjordes på vad för åtgärder som kan hjälpa för att lindra översvämningen i dessa områden. Den visade att åtgärder som jordvallar och höjdsättning av marken kan leda undan vatten från utsatta lågpunkter.

I en skyfallskartering behöver många generaliseringar om indata och parametrar göras. Därför kan det vara bra att utföra en känslighetsanalys på parametrarna för att veta vilka som ger en stor skillnad i resultatet om de ändras. Utöver skyfallskarteringen gjordes därför en känslighetsanalys på hur valet av regntyp, varaktighet på regnet, avrinningskoefficient och infiltrationshastighet i marken påverkade resultatet i form av flöden och översvämningens utbredning.

I regntypsanalysen jämfördes ett CDS-regn (Chicago Design Storm) med ett blockregn av samma återkomsttid och varaktighet. Ett CDS-regn har en varierande intensitet över regnets varaktighet, medans ett blockregn har en konstant intensitet. Resultatet visade att CDS-regnet ger en mycket större översvämning än ett blockregn av samma återkomsttid och varaktighet.

Vid analysen för val av varaktighet så testades olika varaktigheter i modellen. I resultatet sågs det att ju längre varaktigheter, desto större översvämning. Men samtidigt ger en för lång varaktighet en flödeskurva som är relativt platt och liknar därför inte ett skyfalls flödeskurva.

En avrinningskoefficient är ett sätt att beskriva hur mycket vatten som går förlorat genom bland annat infiltration, när vattnet rinner över en viss marktyp. I det här projektet testades det huruvida en avrinningskoefficient för de gröna ytorna i området kunde väljas för att beskriva infiltrationen. Det visades att en avrinningskoefficient på 0,4 fungerade väl. Vid högre avrinningskoefficienter ökar översvämningen och infiltrationen underskattas därför.

Till sist i analysen av infiltrationshastigheten i marken så visade resultatet att det är en känslig parameter som gav stora skillnader i resultatet när den ändrades. Därför bör valet av infiltrationshastighet till modellen väljas noggrant efter hur förhållandet ser ut i jorden där modelleringen ska utföras.

# Innehåll

|                                                            |            |
|------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Referat</b>                                             | <b>i</b>   |
| <b>Abstract</b>                                            | <b>ii</b>  |
| <b>Förord</b>                                              | <b>iii</b> |
| <b>Populärvetenskaplig sammanfattning</b>                  | <b>iv</b>  |
| <b>1 Introduktion</b>                                      | <b>1</b>   |
| 1.1 Syfte . . . . .                                        | 1          |
| 1.2 Frågeställningar . . . . .                             | 2          |
| 1.3 Avgränsningar . . . . .                                | 2          |
| <b>2 Teori</b>                                             | <b>3</b>   |
| 2.1 Nederbörd . . . . .                                    | 3          |
| 2.1.1 Blockregn . . . . .                                  | 3          |
| 2.1.2 Chicago Design Storm . . . . .                       | 4          |
| 2.1.3 Koncentrationstid . . . . .                          | 6          |
| 2.2 Dagvattenavrinning . . . . .                           | 6          |
| 2.2.1 Avrinningskoefficient . . . . .                      | 6          |
| 2.2.2 Markens råhet . . . . .                              | 7          |
| 2.2.3 Infiltration . . . . .                               | 7          |
| 2.3 Dagvattenhantering . . . . .                           | 7          |
| 2.3.1 Lokalt omhändertagande av dagvatten . . . . .        | 9          |
| 2.3.2 Fördröjning nära källan . . . . .                    | 9          |
| 2.3.3 Trög avledning . . . . .                             | 9          |
| 2.3.4 Samlad fördröjning . . . . .                         | 9          |
| 2.4 Klimatförändringar . . . . .                           | 9          |
| 2.5 Översvämningar . . . . .                               | 10         |
| 2.5.1 Köpenhamnsregnet 2011 . . . . .                      | 10         |
| 2.5.2 Skyfallet i Uppsala sommaren 2018 . . . . .          | 11         |
| 2.5.3 Fordons stabilitet vid höga flöden . . . . .         | 11         |
| 2.6 Samhällsviktig verksamhet . . . . .                    | 11         |
| 2.7 Skyfallskartering . . . . .                            | 12         |
| 2.7.1 Kartering av lågpunkter . . . . .                    | 12         |
| 2.7.2 Kartering av markavrinning . . . . .                 | 12         |
| 2.7.3 Kartering av markavrinning och ledningsnät . . . . . | 13         |
| 2.7.4 Rekommendationer kring skyfallskartering . . . . .   | 13         |
| 2.8 Skyfallsåtgärder . . . . .                             | 14         |
| <b>3 Hydraulisk modellering i MIKE 21 Flow Model</b>       | <b>15</b>  |
| 3.1 MIKE Zero . . . . .                                    | 15         |
| 3.2 Höjdmodell . . . . .                                   | 15         |
| 3.3 Modellgränser . . . . .                                | 16         |
| 3.4 Simuleringstid . . . . .                               | 16         |
| 3.5 Nederbörd . . . . .                                    | 16         |
| 3.6 Flooding and Drying . . . . .                          | 16         |

|          |                                              |           |
|----------|----------------------------------------------|-----------|
| 3.7      | Markens råhet . . . . .                      | 17        |
| 3.8      | Infiltrationsmodul . . . . .                 | 17        |
| 3.9      | Avrinningskoefficient . . . . .              | 18        |
| 3.10     | Eddy-viskositet . . . . .                    | 18        |
| 3.11     | Flödeskalkylator . . . . .                   | 19        |
| <b>4</b> | <b>Material och metod</b>                    | <b>19</b> |
| 4.1      | Områdesbeskrivning . . . . .                 | 19        |
| 4.2      | Förarbete i GIS . . . . .                    | 19        |
| 4.2.1    | Avrinningsområde . . . . .                   | 19        |
| 4.2.2    | Byggnader . . . . .                          | 20        |
| 4.2.3    | Höjdmodell . . . . .                         | 21        |
| 4.2.4    | Markanvändning . . . . .                     | 22        |
| 4.2.5    | Jordarter . . . . .                          | 22        |
| 4.3      | Beräkning av regn . . . . .                  | 23        |
| 4.3.1    | Beräkning av blockregn . . . . .             | 23        |
| 4.3.2    | Beräkning av CDS-regnet . . . . .            | 23        |
| 4.3.3    | Beräkning av Köpenhamnsregnet . . . . .      | 25        |
| 4.3.4    | Beräkning av Uppsalaregnet . . . . .         | 25        |
| 4.4      | Modelluppställning . . . . .                 | 25        |
| 4.4.1    | Höjdmodellen . . . . .                       | 25        |
| 4.4.2    | Nederbörden . . . . .                        | 26        |
| 4.4.3    | Infiltrationsmodulen . . . . .               | 27        |
| 4.4.4    | Markens råhet . . . . .                      | 28        |
| 4.4.5    | Övriga inställningar . . . . .               | 28        |
| 4.4.6    | Utdata från modellen . . . . .               | 29        |
| 4.4.7    | Val av simuleringar . . . . .                | 30        |
| 4.5      | Analys av resultaten . . . . .               | 31        |
| 4.5.1    | Utvalda områden . . . . .                    | 31        |
| 4.5.2    | Flöden . . . . .                             | 32        |
| 4.5.3    | Volymer . . . . .                            | 33        |
| 4.6      | Åtgärdsanalys . . . . .                      | 34        |
| 4.6.1    | SCALGO . . . . .                             | 34        |
| 4.6.2    | MIKE 21 . . . . .                            | 34        |
| 4.7      | Känslighetsanalys . . . . .                  | 34        |
| <b>5</b> | <b>Resultat</b>                              | <b>34</b> |
| 5.1      | Översvämningens utbredning . . . . .         | 35        |
| 5.2      | Åtgärder . . . . .                           | 40        |
| 5.2.1    | Barriär kring norra sjukhusområdet . . . . . | 40        |
| 5.2.2    | Åtgärder i SCALGO . . . . .                  | 43        |
| 5.3      | Känslighetsanalys . . . . .                  | 46        |
| 5.3.1    | CDS-regn . . . . .                           | 46        |
| 5.3.2    | Varaktighet . . . . .                        | 48        |
| 5.3.3    | Avrinningskoefficient . . . . .              | 50        |
| 5.3.4    | Infiltrationshastighet . . . . .             | 52        |

|          |                                     |           |
|----------|-------------------------------------|-----------|
| <b>6</b> | <b>Diskussion</b>                   | <b>56</b> |
| 6.1      | Åtgärder . . . . .                  | 56        |
| 6.1.1    | Område 1 . . . . .                  | 56        |
| 6.1.2    | Område 2 . . . . .                  | 57        |
| 6.1.3    | Område 3 . . . . .                  | 57        |
| 6.1.4    | Område 4 . . . . .                  | 58        |
| 6.1.5    | Område 5 . . . . .                  | 59        |
| 6.1.6    | Område 6 . . . . .                  | 59        |
| 6.1.7    | Område 7 . . . . .                  | 60        |
| 6.2      | Känslighetsanalys . . . . .         | 60        |
| 6.2.1    | CDS-regn . . . . .                  | 60        |
| 6.2.2    | Varaktighet . . . . .               | 61        |
| 6.2.3    | Avrinningskoefficient . . . . .     | 62        |
| 6.2.4    | Infiltrationshastighet . . . . .    | 63        |
| 6.3      | Metoddiskussion . . . . .           | 64        |
| 6.4      | Osäkerheter och felkällor . . . . . | 64        |
| 6.4.1    | Modellens uppbyggnad . . . . .      | 64        |
| 6.4.2    | Water level correction . . . . .    | 66        |
| 6.5      | Validering . . . . .                | 66        |
| 6.6      | Vidare studier . . . . .            | 66        |
| <b>7</b> | <b>Slutsatser</b>                   | <b>67</b> |
|          | <b>Referenser</b>                   | <b>69</b> |
|          | <b>Appendix</b>                     | <b>I</b>  |
| A        | Regnberäkningar . . . . .           | I         |
| A.1      | CDS-regnet . . . . .                | I         |
| A.2      | Köpenhamnsregnet . . . . .          | II        |
| A.3      | Uppsalaregnet . . . . .             | IV        |

# 1 Introduktion

På grund av klimatförändringen som sker kommer jordens medeltemperatur att öka. Det klimatscenario med lägst påverkan, RCP2.6, som är framtagen av Förenta nationernas klimatpanel (IPCC) förutspår ett varmare klimat (Stocker et al. 2013). Ett varmare klimat leder till en ökad avdunstning och att luften kan hålla mer vattenånga, vilket i sin tur leder till en ökad nederbörd. Men även frekvensen för de mer extrema väderhändelserna kommer att öka. Regnens intensitet och varaktighet kommer att öka vilket leder till att nederbörd i skyfalls-storlek (minst 50 mm/timme eller en mm/minut) kommer bli en vanligare företeelse i framtiden. Sverige ligger i den zon där störst ökning av den årliga medelnederbörden kommer att ske (Olsson et al. 2017, Stocker et al. 2013).

Det sker även en ökande urbanisering som för med sig fler hårdgjorda ytor som hindrar vatten från att infiltrera ner i marken och ökar vattnets hastighet (MSB 2017). Vid skyfall räcker inte dagvattenledningarna till för att hantera ytvattenavrinningens stora volymer och avrinningen sker istället på ytan. När vattnet inte har någonstans att ta vägen hamnar det till slut i lågpunkter där stora vattendjup ibland kan uppnås och översvämningen är ett faktum.

Mer frekventa skyfall i kombination med en ökande urbanisering kommer att leda till att översvämningar blir vanligare. Det är därför viktigt att ta hänsyn till detta i samhällsplaneringen. Efter en ökning av översvämningar i Europa under 2007 tog EU fram ett nytt direktiv (2007/60/EG) för att öka översvämningsberedskapen i samhället. Direktivet råder medlemsländerna till att ta fram en gemensam strategi och regler kring att hantera översvämningar. I Sverige togs då förordningen (2009:956) om översvämningsrisker fram. I den står det att Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) har i uppgift att kartlägga översvämningsrisken i samtliga vattendistrikt (SFS 2009:956 2009). För att hjälpa kommunernas arbete med skyfallshantering tog MSB fram en vägledning för skyfallskartering (MSB 2017).

En skyfallskartering är ett bra steg i att försöka förutse vilka flödesvägar vattnet tar och var det ansamlas vid ett skyfall. De kan utföras i hydrauliska modelleringsprogram, till exempel MIKE 21 (DHI 2017a). Med resultatet från skyfallskarteringen kan det vidare undersökas vilka åtgärder som kan tas och var de lämpar sig bäst att placeras för att undvika översvämningar. Det viktigaste att skydda mot översvämningar är de samhällsviktiga verksamheterna, så som sjukhus (Länsstyrelserna 2018).

Sommaren 2018 föll det ett skyfall över Uppsala som översvämmade Akademiska sjukhuset och slog sterilcentralen ur funktion (Dagens Medicin 2018). Region Uppsala vill nu kunna säkra Akademiska sjukhuset från att något liknande händer igen. De vill därför veta vilka områden som riskerar att översvämmas och vad för åtgärder som kan tas för att skydda verksamheten vid ett skyfall.

## 1.1 Syfte

Denna studie hade i syfte att genom modellering i MIKE 21 undersöka vilka flödesvägar vattnet tar och var det ansamlas vid ett skyfall på Akademiska sjukhusets område samt vilka eventuella åtgärder som kan tas och var de bör placeras för att undvika översvämning. Vidare skulle det genom en känslighetsanalys undersökas hur resultatet påverkas av att ändra olika parametrar i modellen.

## 1.2 Frågeställningar

1. Vilka flödesvägar tar vattnet och hur ser översvämningens utbredning ut vid ett skyfall på Akademiska sjukhusets område?
2. Vilka åtgärder kan göras och var bör de placeras för att undvika översvämning till följd av ett skyfall på särskilt utpekade områden inne på Akademiska sjukhusets område?
3. Känslighetsanalys
  - (a) Vad är skillnaden i flöden, slutvolym och översvämningens utbredning när ett CDS-regn används i simuleringen istället för ett blockregn?
  - (b) Vad är skillnaden i flöden, slutvolym och översvämningens utbredning när olika varaktigheter på regnet används i simuleringen?
  - (c) Kan en avrinningskoefficient väljas så att det återspeglar infiltrationen i området och hur påverkar valet slutvolymen och översvämningens utbredning?
  - (d) Vad är skillnaden i slutvolym och översvämningens utbredning när olika infiltrationshastigheter i marken används i simuleringen?

## 1.3 Avgränsningar

Den här studien tar endast hänsyn till de pluviala översvämningarna. Det vill säga de översvämningar som sker till följd av skyfall.

Följande avgränsningar har gjorts för att dra ner på arbetstiden så att det ryms inom tidsramen för examensarbetet:

- Dagvattenledningarna kommer inte att inkluderas i modellberäkningen. Istället kommer ett avdrag baserat på deras kapacitet göras på regnets intensitet under simuleringen. Detta på grund av att det är väldigt tidskrävande att sätta upp en modell för både ytaavrinningen och ledningsnätet. Enligt MSB (2017) erhålls ändå ett tillräckligt bra resultat eftersom ledningsnätet har en mindre inverkan på översvämningarnas slutresultat vid stora vattenvolymer (som vid ett skyfall).
- Taklutningarna läggs inte in i modellen. Byggnader läggs in genom att addera två meter på höjdmodellen där byggnaderna är lokaliserade och lutningarna på taken kommer därför att följa den underliggande höjdmodellen.
- Endast en åtgärd för skyfallshantering kommer att simuleras i MIKE. Resterande åtgärder kommer att testas i SCALGO eller diskuteras utifrån teori. Fokus på åtgärder läggs på områden av intresse för Region Uppsala.

## 2 Teori

### 2.1 Nederbörd

För Sverige finns det nederbördsdata så långt tillbaka som 1860. Nederbörden mäts vanligtvis i millimeter och syftar då till hur många millimeter över markytan vattnet skulle nå om det inte kunde sjunka undan (SMHI 2018). När det istället rör sig om nederbördens intensitet anges den oftast i liter per sekund och hektar eller millimeter per timme. Nederbördens intensitet är ett mått på hur mycket nederbörd som faller under en viss tidsperiod och är en viktig aspekt att ta hänsyn till vid skyfall. En hög intensitet innebär att mycket vatten faller under en kort tid och då hinner inte vattnet rinna undan utan ansamlas på ytan vilket leder till översvämningar (Svenskt Vatten 2011a).

Ett regn kan ansättas en viss återkomsttid. Återkomsttiden kan ses som ett mått på sannolikheten för att ett visst regn ska inträffa. Det betyder att en viss regnvolym faller eller överskrider i genomsnitt en gång under återkomsttiden. Återkomsttiden grundas på historisk data över de högsta regnvolymerna uppmätta varje år och är statistiskt uträknade (SMHI 2020a). För Sverige har högupplöst data från 32 stationer använts för att ta fram ett förhållande mellan återkomsttid, intensitet och varaktighet (Dahlström 2006).

Återkomsttider används vid dimensionering av olika vattenbyggnader, så som ledningsnät och dammar. Återkomsttiden kan ses som säkerhetsnivån på byggnaden. Enligt Svenskt vatten (Svenskt Vatten 2011b) bör säkerhetsnivån på samhället vara satt till 100 år.

Den maximala medelintensiteten för ett regn med en viss varaktighet och återkomsttid kan för Sverige beräknas med hjälp av ekvation 1. Den kallas Dahlström (2010) är baserad på historisk regndata i Sverige (Svenskt Vatten 2011a).

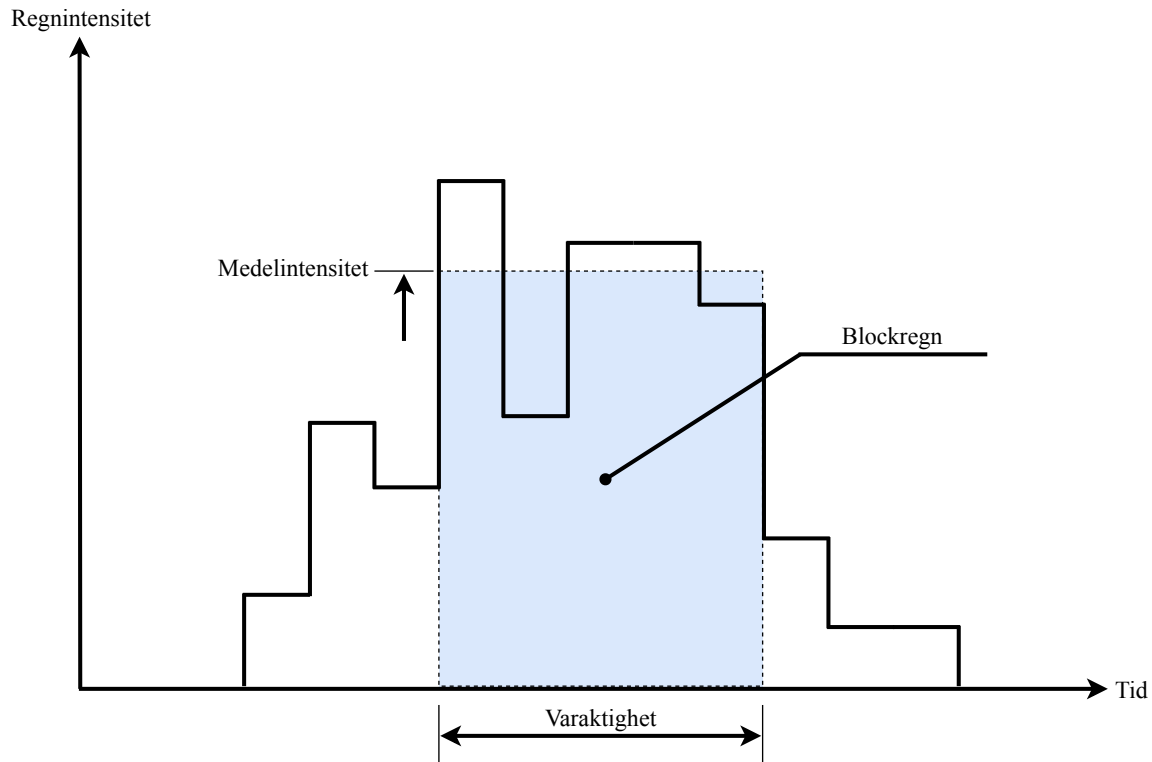
$$i_T = 190 \cdot \sqrt[3]{T} \cdot \frac{\ln t_v}{t_v^{0,98}} + 2 \quad (1)$$

Där  $i_T$  är intensiteten i liter per sekund och hektar,  $T$  är återkomsttiden i månader och  $t_v$  är varaktigheten i minuter. Ekvationen gäller så länge varaktigheten på regnet är mindre än ett dygn (Svenskt Vatten 2016).

Riktig kraftig nederbörd kallas skyfall. SMHIs definition av skyfall är att det ska falla minst 50 mm nederbörd på en timme eller en mm på en minut. Det förs dock en diskussion om en ny definition som är närmre kopplad till återkomsttiden ska användas för att få en mer entydig tolkning av vad ett skyfall är (Olsson et al. 2017).

#### 2.1.1 Blockregn

Intensiteten på regnet vid ett nederbördstillfälle varierar mycket över tid. För att illustrera detta används ofta en hyetograf (figur 1), där regnets intensitet är på y-axeln och tiden på x-axeln. När beräkningar med regn ska utföras behövs ett enkelt sätt att kvantifiera regnets volym för en viss varaktighet. Detta görs genom att ta medelintensiteten för en given varaktighet och där varaktigheten helst väljs efter den mest intensiva perioden av regnet. Detta kallas för ett blockregn och illustreras i figur 1, där det kan ses att intensiteten är konstant över hela varaktigheten (Svenskt Vatten 2011a).



**Figur 1:** Illustration av hur ett blockregn är framtaget. Inspirerad av Figur 1.13 i Svenskt Vatten (2011a)

Regn som beräknas med ekvation 1 får den här formen och kan användas vid skyfallskartering och dimensionering av vattenbyggnader.

### 2.1.2 Chicago Design Storm

Eftersom inget regn har en uniform intensitet genom hela varaktigheten så representerar ett blockregn inte verkligheten så bra. För att få ett regn som återspeglar verkligheten bättre går det att använda Chicago Design Storm (CDS-regn) som är framtagen av Keifer et al. (1957). Till att börja med finns ekvation 2 som beskriver förhållandet mellan medelintensitet och varaktighet oberoende av återkomsttid.

$$i_m = \frac{a}{(b + t_v)^c} \quad (2)$$

Där  $i_m$  är medelintensiteten på regnet,  $t_v$  är varaktigheten och  $a$ ,  $b$  och  $c$  är konstanter. Den totala nederbördsvolymen,  $P$ , för ett regn med en viss varaktighet fås då genom att multiplicera medelintensiteten med varaktigheten, vilket beskrivs i ekvation 3.

$$P = i_m t_v = \frac{a t_v}{(b + t_v)^c} \quad (3)$$

Derivatan av ekvation 3 ger ekvation 4 där regnintensiteten,  $i_t$ , för en viss tid,  $t$ , erhålls.

$$i_t = \frac{dP}{dt} = \frac{a((1 - c)t + b)}{(b + t)^{c+1}} \quad (4)$$

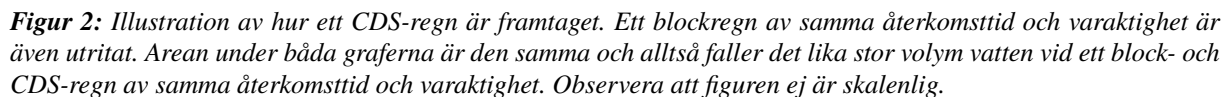
Denna ekvation ger en hyetograf med högst intensitet i början av regnet när  $t = 0$  och som klingar av ju längre tiden går. Detta är inte realistiskt, så för CDS-regn anpassas hyetografen så att intensitetstoppen kommer efter en viss andel,  $r$ , av varaktigheten,  $t_v$ , och bestämmer skevheten

$$t_v = t_f + t_e = \frac{t_f}{r} = \frac{t_e}{1-r}, 0 < r < 1 \quad (5)$$

$$t_v = t_f + t_e = \frac{t_f}{r} = \frac{t_e}{1-r}, 0 < r < 1 \quad (5)$$

$$i_f = \frac{a \left( (1-c) \frac{t_f}{r} + b \right)}{\left( b + \frac{t_f}{r} \right)^{c+1}} \quad (6)$$

$$i_e = \frac{a \left( (1-c) \frac{t_e}{1-r} + b \right)}{\left( b + \frac{t_e}{1-r} \right)^{c+1}} \quad (7)$$



Arean under graferna i figur 2 representerar den totala volymen som faller under respektive regn. Som figuren visar så är arean under graferna lika stora. Det vill säga att det faller en lika stor volym vatten vid ett regn av samma återkomsttid och varaktighet oberoende av om det är av block- eller CDS-typ. Skillnaden är att intensiteten varierar stort i ett CDS-regn och fördelen att

studera effekterna av ett CDS-regn är att de stora intensitetstopparna som vanligtvis förekommer vid skyfall är med. För längre varaktigheter än två timmar finns det en risk att den här metoden att ta fram CDS-regn underskattar vattenvolymer (Svenskt Vatten 2011a).

Det finns en enklare metod för att ta fram ett CDS-regn som är beskriven av Svenskt Vatten (ibid.). I den metoden används en hjälptabell som innehåller intensiteterna för olika blockregn med olika varaktigheter. Dessa blockregn används för att konstruera ett CDS-regn med en topp kring skevhetsfaktorn  $r$ .

### 2.1.3 Koncentrationstid

Koncentrationstiden är rinntiden för den längsta vägen inom ett delavrinningsområde och beräknas med ekvation 8.

$$t_c = \frac{L_1}{v_1} + \frac{L_2}{v_2} \dots + \frac{L_n}{v_n} \quad (8)$$

Där  $L$  är längden av färdväg på en specifik marktyp och  $v$  är vattenhastigheten på en specifik marktyp. Samtliga marktypers rinntider summeras till en koncentrationstid för avrinningsområdet. För att beräkna  $v$  kan Mannings formel användas, ekvation 9.

$$v = M \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Där  $M$  är Mannings tal ( $\text{m}^{\frac{1}{3}}/\text{s}$ ) för en specifik marktyp,  $R$  är vattendjupet (m) och  $S$  är lutningen angivet i andelar per längdenhet (Svenskt Vatten 2016).

Med koncentrationstiden kan en lämplig varaktighet på ett CDS-regn för ett visst avrinningsområde tas fram. Vid skyfall blir dock vattenhastigheterna väldigt höga och det uppstår osäkerheter kring vad för vattenhastighet som ska användas vid beräkning av koncentrationstiden (Svenskt Vatten 2011a). I detta projekt användes koncentrationstiden endast till att uppskatta en varaktighet till CDS-regnet och osäkerheterna kring beräkningen spelar därför mindre roll.

## 2.2 Dagvattenavrinning

Dagvatten är det vatten som rinner av på markytan. Hur mycket som rinner av beror av regnintensiteten, markytans area och avrinningskoefficienten (Svenskt Vatten 2016).

### 2.2.1 Avrinningskoefficient

Avrinningskoefficienten är ett sätt att beskriva hur mycket som förloras av det vatten som rinner över en viss marktyp. Den beror bland annat av avdunstning, infiltration, absorption av växtligheten och markens råhet. Ett högt värde på en marktyps avrinningskoefficient betyder att mycket vatten rinner av på den marktypen. Eftersom avrinningskoefficienten beror av infiltrationen påverkas den av regnets intensitet och markens lutning. Vid höga regnintensiteter och branta lutningar hinner inte lika mycket vatten infiltrera i marken och avrinningskoefficienten ökar, men den kan aldrig bli större än 1 (ibid.).

Vid beräkningarna av olika ytors bidrag till avrinningen vid ett regn kan ytornas avrinningskoefficient multipliceras med regnintensiteten enligt ekvation 10.

$$i_{red} = \varphi \cdot i \quad (10)$$

Där  $\varphi$  är markytans avrinningskoefficient,  $i$  är intensiteten på regnet och det ger en reducerad intensitet,  $i_{red}$ , som sedan kan användas vid vidare beräkningar.

### 2.2.2 Markens råhet

Markens råhet påverkar ytavrinningens hastighet och kan beskrivas med Mannings tal. Ju skrovligare markytan är, desto lägre Mannings tal har den. Hårdgjorda ytor har ett högre Mannings tal än grönytor och flödet längs med dessa ytor blir därför stort. På grönytor med ett lågt Mannings tal bromsas ytavrinningen upp mer och en större volym har chans att infiltrera.

Vägverket (2008) rekommenderar att värden från tabell 1 används vid beskrivning av motståndet på markytor.

*Tabell 1: Mannings tal som rekommenderas av Vägverket (2008) att användas vid olika marktyper.*

| Markanvändning               | Mannings tal [ $\text{m}^{\frac{1}{3}}/\text{s}$ ] |
|------------------------------|----------------------------------------------------|
| Slät asfalt/betongbeläggning | 80-85                                              |
| Grov asfalt/betongbeläggning | 70-75                                              |
| Grusyta                      | 40-50                                              |
| Kort gräs                    | 30-35                                              |
| Långt gräs                   | 25-30                                              |

### 2.2.3 Infiltration

Infiltrationskapaciteten hos marken bestämmer hur mycket vatten per tidsenhet som den kan ta emot. Det är en viktig variabel vid ytavrinning och den beror av jordens egenskaper så som porositet och struktur. Jordarter med hög porositet så som grus och åsmaterial har en hög infiltrationskapacitet.

Matjord i städer är ofta utblandad med fyllnadsmaterial och packningsgraden kan variera vilket leder till att det är svårt att sätta en infiltrationshastighet för grönytorerna. Men MSB (2014) anser att ett värde på  $10^{-5}$  m/s (36 mm/h) är rimligt. Om regnintensiteten är högre än infiltrationshastigheten kan jordens magasineringskapacitet snabbt uppnås och ytavrinning sker.

Utöver jordens egenskaper bestäms infiltrationskapaciteten av de hydrologiska förhållandena. På sommaren när grundvattennivåerna vanligtvis är lägre har marken en större infiltrationskapacitet eftersom de övre jordlagren är omättade (MSB 2017).

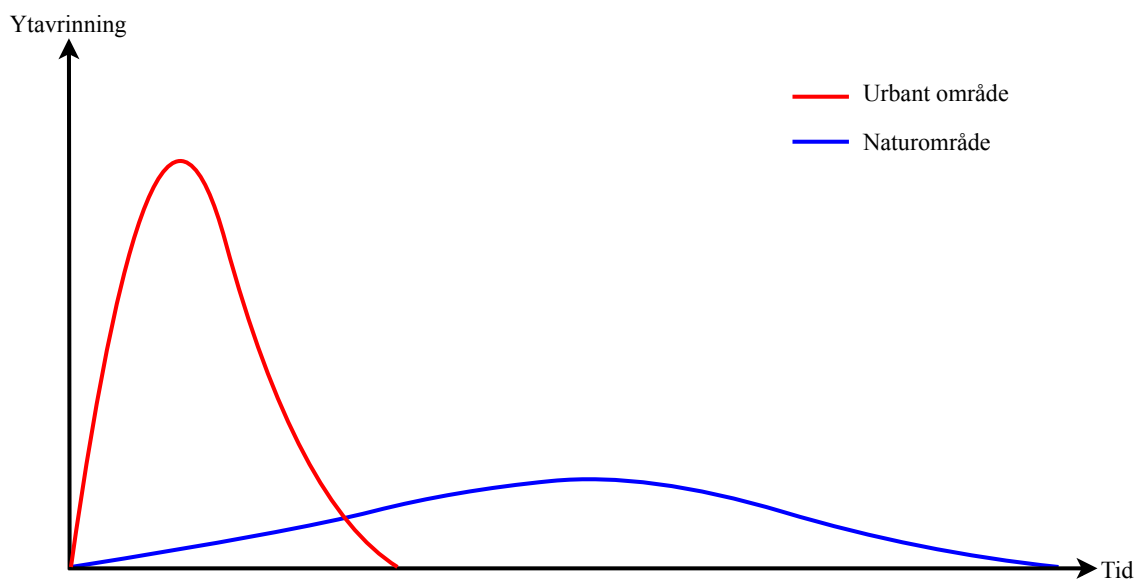
## 2.3 Dagvattenhantering

Det är viktigt med en bra dagvattenhantering för att skydda infrastruktur från skador till följd av nederbörd. Idag finns det även fokus på att dagvattenhanteringen ska rena dagvattnet innan det släpps ut till recipienten för att minska föroreningsspridning från städerna (Svenskt Vatten 2011b).

Dagvattenhantering kan ske genom dagvattenavledning i rör eller diken. Rörens dimensioner är ofta anpassade efter ett regn med en viss återkomsttid. Det är VA-huvudmannen i kommunen som ansvarar för dagvattenhanteringen och har enligt praxis ett ansvar att minst leda undan

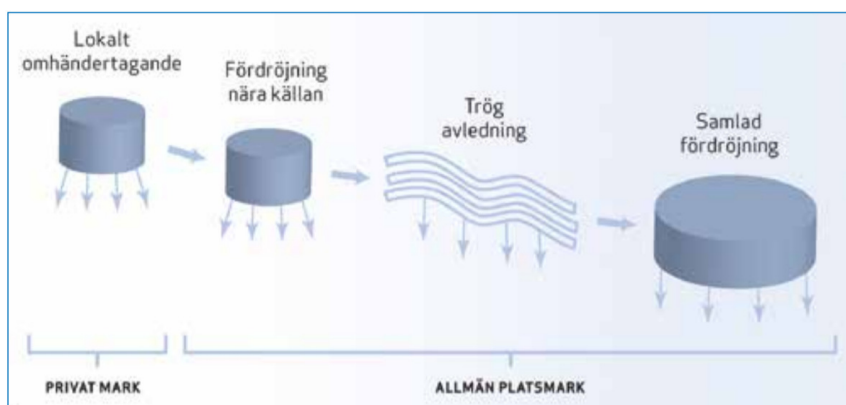
vatten från ett regn med 10 års återkomsttid. Dagvattenledningarna bör därför vara dimensionerade efter detta (SOU 2017). Vid dimensioneringen bör även den just då rekommenderade klimatfaktorn tas med i beräkningarna för att ta höjd för klimatförändringarna (Svenskt Vatten 2016).

Utöver ledningsnätet finns det en så kallad hållbar dagvattenhantering där syftet är att förändra avrinningsförloppet så att kurvan för urbana områden i figur 3 får ett lägre toppflöde och blir mer lik den för naturområden. Det hela går ut på att fördröja vattnets framfart i urbana miljöer och ska ses som ett komplement till dagvattenavledningen (Svenskt Vatten 2011b).



**Figur 3:** Skiljningen i avrinningsförlopp mellan urbana områden och naturområden. Inspirerad av Figur 1.5 i Svenskt Vatten (2011b) P105.

Hållbar dagvattenhantering kan kategoriseras enligt figur 4 och ser ut på många olika sätt. Det är viktigt att utreda hur dagvattenlösningarna bör utformas och dimensioneras för just det område som ska avlastas. Förutsättningarna varierar mycket från område till område och beror på områdets geohydrologiska parametrar (ibid.). I kommande avsnitt tas några exempel upp för respektive kategori.



**Figur 4:** Illustration av olika kategorier av öppna dagvattenlösningar. Bild tagen med tillstånd från Svenskt Vatten (2016) P110, Figur 1.19.

### **2.3.1 Lokalt omhändertagande av dagvatten**

En effektiv metod att skydda byggnader från dagvatten är genom höjdsättning. Genom att skapa en höjdskillnad kring byggnaden tas vattnets flödesväg effektivt bort.

Fördröjning på tak kan åstadkommas genom att anlägga gröna tak eller tak med ett grusmagasin där vattnet får infiltrera och tillfälligt magasineras. Dessa typer av lösningar kan endast hantera avrinningen från små regnskurar. Vid kraftigare nederbördstillfällen gör de ingen större skillnad på avrinningen eftersom de snabbt blir mättade.

När vatten leds av från byggnader via exempelvis stuprännor kan de ledas vidare bort från husgrunden via infiltrationsstråk eller rännor som mynnar ut i dagvattensystemet. Det är viktigt att vattnet leds bort från byggnaden för att minska påfrestningen på byggnadens dräneringssystem (Svenskt Vatten 2011b).

### **2.3.2 Fördröjning nära källan**

För att minska de hårdgjorda ytorna kan genomsläppliga beläggningar användas där vattnet kan infiltrera. Exempel på sådana beläggningar är hålad marksten eller permeabel asfalt. Hålen i markstenen kan antingen beväxas med gräs eller fyllas med grus. Dessa ytor kan med tiden beläggas med smuts och kommer att behöva underhåll för att upprätthålla genomsläppligheten. Viktigt att tänka på vid anläggning av dessa på en parkering är att det finns stor risk för att olja och andra giftiga ämnen följer med vattnet ner i marken. Därför behövs en genomtänkt reningsplan för vattnet från dessa ytor (ibid.).

### **2.3.3 Trög avledning**

Ett svackdike är ett grunt öppet dike med svagt sluttande kanter. Svackdiken är till för att leda undan vatten som inte hinner infiltrera eller tas hand om av ledningsnätet. Beroende på hur de är utformade kan de avleda stora volymer vatten. Ju bredare diket är, desto mer vatten kan det avleda. Växtligheten och lutningen kan anpassas för att justera reningen och fördröjningen av vattnet. Om lutningen på marken där diket anläggs är väldigt brant kan diket behöva sektioneras upp så en önskvärd lutning fortfarande erhålls (ibid.).

### **2.3.4 Samlad fördröjning**

För att ta hand om stora volymer dagvatten kan ovanjordiska fördröjningsmagasin användas. Vid platsbrist kan de anläggas på ytor som har andra funktioner, till exempel en parkeringsplats. Principen är att ytan antingen sänks ner eller förses med kanter så att vatten kan ansamlas. På det sättet kan stora vattenmassor fångas upp på en kontrollerad plats och påfrestningar på dagvattenledningarna förmildras. Utloppen från magasinet kan vara kontrollerbara så de kan stängas vid kraftig nederbörd, för att sedan öppnas när magasineringen inte längre behövs (ibid.).

## **2.4 Klimatförändringar**

För att ta hänsyn till klimatförändringarna och att det kommer bli vanligare med kraftigare nederbörd i framtiden kan nederbördens intensitet (ekvation 1) multipliceras med en klimatkfaktor. För regn med en återkomsttid på 100 år eller mer bör klimatkfaktorn sättas till ett värde mellan

1,2–1,5 (MSB 2013a, MSB 2017). Värdet kan förväntas ligga i den högre delen av det spannet i slutet av århundradet om utgångsläget är det värsta klimatscenariot, RCP8,5 (Olsson et al. 2017). Enligt Svenskt Vatten (2016) ska klimatfaktorn som minst väljas till 1,25 för nederbörd med en timmes varaktighet eller mindre. För Uppsala län finns det studier som visar på att kraftig nederbörd med kort varaktighet i Uppsala län kommer att öka med upp till 30 % (Sjökvist et al. 2015).

Klimatfaktorn som Svenskt Vatten (2016) rekommenderar har SMHI tagit fram för nederbörd med återkomsttid på 10 år. Vid längre återkomsttider (till exempel 100 år) ökar klimatfaktorn något. Men det är ändå rekommenderat att använda samma klimatfaktor för längre återkomsttider eftersom skillnaden är så pass liten.

## **2.5 Översvämningar**

Översvämningar kan antingen klassas som fluviala eller pluviala. En fluvial översvämning är då vattendrags vattennivå ökar och tränger upp på land, medans en pluvial översvämning är till följd av nederbörd (MSB 2013a). Det här projektet har fokus på de pluviala översvämningarna.

Vid stora skyfall hinner inte vattnet infiltrera eller ledas undan av ledningsnätet och överskottsvatten rinner av på ytan. Eftersom stora volymer vatten faller under en väldigt kort tid skapas det stora flöden med höga hastigheter som kan orsaka skada på infrastruktur och samhällsviktiga verksamheter, de kan även orsaka personskador. Om detta vatten inte leds undan kan det ansamlas i lågpunkter och kan då även orsaka översvämningssproblematik genom att vatten tränger in på oönskade ställen. Med den ökade urbaniseringen så ökar även de hårdgjorda ytorna och vattnet kan inte infiltrera i marken över huvud taget. Detta leder till att samhällen utsätts för en större risk för översvämningar (MSB 2017).

Utöver de ökade hårdgjorda ytorna så bidrar klimatförändringarna till att översvämningar kommer att bli allt vanligare i framtiden. Översvämningar beror till stor del av nederbördens intensitet och ett regn med hög intensitet ger en stor volym vatten under en kort tid som leder till att vattnet inte hinner rinna undan. Eftersom intensiteten förväntas öka i framtiden, kommer även risken för översvämningar att öka (Olsson et al. 2017).

Rekommendationen är att ny bebyggelse planeras så att de inte tar skada av ett 100-årsregn med klimatfaktor. En skyfallskartering där minst ett 100-årsregn studeras ska utföras i samband med detaljplaneringen så att risken för översvämning kan tas hänsyn till. Verksamheter som klassas som samhällsviktiga bör ha en högre säkerhetsnivå. Därför kan även ett regn med en längre återkomsttid än 100 år studeras i skyfallskarteringen för att få en uppfattning om hur ett extremare regn kan påverka verksamheten. Viktigt att ta i beaktning är även framkomligheten till verksamheten. För ett sjukhus är det viktigt med framkomlighet till akutmottagningen och att ambulansernas utryckningsvägar säkerställs från hinder (Länsstyrelserna 2018).

### **2.5.1 Köpenhamnsregnet 2011**

Den 2:a juli 2011 föll det under den mest intensiva perioden ungefär 155 mm vatten på två timmar över Köpenhamn. Detta motsvarar ett regn med en återkomsttid på över 1400 år och är det största skyfallet observerat i Sveriges klimatzon (MSB 2013a, MSB 2017). Det ledde till översvämningar som orsakade stora skador på samhället (MSB 2013a).

Det blev störningar i trafiken när vägar blockerades av vattenmassor i viadukter och andra sänkor. Översvämmade räls, ledningar och tekniska anläggningar gjorde så att tågtrafiken fick ställas in. Källaröversvämningar slog ut IT och tele som påverkade kommunikationen för bland annat brandförsvaret, polisen och Banedanmark (danska motsvarigheten till Trafikverket). Vissa av ambulansernas färdvägar var blockerade så alternativa vägar för patienttransporter behövde tas. På de två stora sjukhusen i staden blev intensivvårdsavdelningarna och operationssalarna påverkade av översvämningar och en del patienter behövde förflyttas. På Rigshospitalet blev även sterilcentralen och e-postsystemet drabbat (Institut för Beredskabsbevakning 2012). På bägge sjukhusen var det risk för strömavbrott och det var nära att reservkraften inte klarades. Vid ett strömavbrott skulle många patienter behöva evakueras (BT 2011). De totala kostnaderna för skadorna beräknades av de danska försäkringsbolagen att uppgå till 9,4 miljarder SEK (Carlander 2016).

### **2.5.2 Skyfallet i Uppsala sommaren 2018**

Vid skyfallet den 29:e juli 2018 i Uppsala föll det 61 mm på två timmar, vilket motsvarar ett regn med återkomsttid på 90 år (SMHI 2020b). Det orsakade översvämningsskador som kostade kommunen miljoner (Leijonhufvud 2018). På Akademiska sjukhusets område trängde vatten in i sterilcentralen och satte den ur funktion (Dagens Medicin 2018).

### **2.5.3 Fordons stabilitet vid höga flöden**

En viktig del av en fungerande sjukvård är att patienter som behöver akutvård får det så snabbt som möjligt. För att det ska fungera behöver utryckningsfordonen ha god framkomlighet. Vid översvämningar kan färdvägar vara oframkomliga för fordon och kan då påverka ambulansernas responstid.

Ett fordon's stabilitet vid kontakt med vattenflöden beror av ett samband mellan vattendjup, vattenhastighet samt fordonets friktion, höjd över marken och vikt. Australian Rainfall & Runoff (AR&R) har genom en studie tagit fram ett samband för små personbilar, stora personbilar och stora fyrhjulsdrivna fordon. Denna studie är den senaste och mest detaljerade som även fyller tidigare luckor i kunskapen inom området, resultatet är därför i dagsläget det mest tillförlitliga. De svenska ambulanserna passar bäst in på kategorin "stora fyrhjulsdrivna fordon" och kan därför enligt AR&Rs studie klara ett maximalt vattendjup på 0,4 m och en maximal vattenhastighet på 3,0 m/s (Martínez-Gomariz et al. 2018).

## **2.6 Samhällsviktig verksamhet**

För att samhället ska fungera väl är vissa verksamheter extra viktiga. Sådana verksamheter kallas samhällsviktiga verksamheter. Enligt MSB (2019) är en verksamhet samhällsviktig om den uppfyller minst ett av följande kriterier:

- Ett bortfall av, eller en svår störning i verksamheten som ensamt eller tillsammans med motsvarande händelser i andra verksamheter på kort tid kan leda till att en allvarlig kris inträffar i samhället.
- Verksamheten är nödvändig eller mycket väsentlig för att en redan inträffad kris i samhället ska kunna hanteras så att skadeverkningarna blir så små som möjligt.

Om sjukvården slås ut skulle många liv plötsligt sväva i fara och det är extra viktigt att ha en fungerande sjukvård vid en kris. Därför uppfyller sjukvården båda kriterierna för vad som klassas som en samhällsviktig verksamhet.

Det är svårt att skydda verksamheter från oväntade händelser. Samhället utvecklas och riskbilden förändras, vilket ställer nya krav på de samhällsviktiga verksamheterna. För att följa med i förändringarna behövs ett systematiskt säkerhetsarbete som går ut på att jobba med riskhantering, kontinuitetshantering och hantering av inträffade händelser. Riskhantering är identifiering, hantering och kontrollering av risker. Kontinuitetshantering går ut på att planera för att verksamheten kan upprätthålla funktionaliteten oavsett vad som händer. Planering kring hantering av inträffade händelser, som till exempel krishantering, syftar till att ge verksamheten beredskap när händelsen väl inträffar (MSB 2013b). Vid riskhanteringen kommer skyfallskartering in.

## **2.7 Skyfallskartering**

Skyfallskartering är en studie där det reds ut vilka områden som kan komma att översvämmas vid extrema nederbördstillfällen. Kommunerna ansvarar för att ta fram en detaljplan som beskriver hur marken i kommunen ska nyttjas. För att kunna säkra samhället från översvämningar bör även en skyfallskartering utföras i samband med framtagandet av detaljplanen (SOU 2017). Enligt MSB (2017) finns det tre metoder av skyfallskartering som kan göras.

### **2.7.1 Kartering av lågpunkter**

Den enklaste är en kartering av lågpunkter där GIS används för att ta fram lågpunkter och flödesvägar med hjälp av de inbyggda verktygen i GIS-programvaran och höjdmodellen över området som ska studeras. Resultatet blir en karta som visar områdets lågpunkter. Eftersom den här metoden inte är bunden till ett regn med en viss återkomsttid, erhålls inte en sannolikhet för att översvämningen ska inträffa. Den tar heller inte hänsyn till markens råhet och infiltration eller hur vattendjupet varierar över tid. Den här analysen kan dock vara fördelaktig att göra när man vill få en snabb överblick över vilka områden som ligger i riskzonen för översvämning (ibid.).

### **2.7.2 Kartering av markavrinning**

En markavrinningskartering ger en mer detaljerad och verklighetstrogen bild över skyfallets påverkan på översvämningens utbredning. I den metoden tas det hänsyn till markanvändning eftersom markens råhet och infiltration finns med i modellen. De olika markanvändningarna som finns i området får ett givet Mannings tal som påverkar hur snabbt vattnet flödar fram längst med marken. Infiltrationen beror av infiltrations- och läckagehastigheten, vattenlagringskapaciteten samt grundvattennivån. Dessa beror i sin tur av markanvändningen, porositeten hos marklagret, vattenmättnaden samt den underliggande jordarten. Regn av olika återkomsttider, intensiteter och varaktigheter kan studeras med den här metoden (ibid.).

Metoden tar även hänsyn till det befintliga dagvattensystemet i området genom att dra av ett schablonvärde på regnet som faller i de områden som är uppkopplade till ett ledningsnät. Värdet som dras av är baserat på vad dagvattensystemet har för kapacitet. Metoden fungerar bra så länge det simulerade regnets storlek är mycket större än dagvattensystemets kapacitet. Det rekommenderas att använda metoden vid 100-årsregn och uppåt. Modellen byggs vanligtvis upp i GIS för att sedan läggas in i ett hydrauliskt 2D-modelleringsprogram, till exempel MIKE 21 (ibid.).

### 2.7.3 Kartering av markavrinning och ledningsnät

Den sista metoden är liknande som markavrinningskarteringen fast en modell av ledningsnätet används istället för ett schablonvärde. Då kopplas en uppbyggd modell av ledningsnätet till den hydrauliska 2D-modellen. Detta ger en bild av hur ledningsnätet påverkas vid skyfall som inte fås med när endast ett schablonvärde dras av. Fördämningar i ledningsnätet till följd av höga vattennivåer och vattenuppträngning ur brunnar på oväntade ställen är exempel på vad som kan fångas upp med denna metod (MSB 2017).

I det här projektet användes kartering av markavrinning utan ledningsnät. Modelleringen utfördes i MIKE 21 Flow Model som är det program som används av WSP vid skyfallskarteringar (Thurin 2018).

### 2.7.4 Rekommendationer kring skyfallskartering

För att få ett så noggrant resultat som möjligt bör upplösningen på höjdmodellen vara hög. När stora områden ska modelleras så kan simuleringstiden bli väldigt lång om upplösningen är för hög. En avvägning av tid mot detaljrikedom bör göras vid val av upplösning, men den bör inte vara lägre än  $5 \times 5$  meter. Lantmäteriet har höjddata med upplösningen  $2 \times 2$  meter för nästan hela Sverige (MSB 2017).

Korrigeringar i höjdmodellen är ofta nödvändiga. För att få med byggnaderna som finns i modelleringsområdet kan höjdmodellen höjas upp några meter där byggnaderna är placerade. Ibland kan det även vara nödvändigt att öppna upp viadukter eller broar för att möjliggöra flödesvägar för vattnet (ibid.).

Information om markanvändningen behövs för att kunna bestämma vilka ytor som är genomsläppliga och vilken råhet marken har. De genomsläppliga ytorna kan ges en infiltrationskapacitet beroende på hur det övre jordlagret ser ut och kan bestämmas efter jordartskartor från SGU (Sveriges Geologiska Undersökning). Känslighetsanalyser på infiltrationskapaciteten bör utföras när området innehåller jordarter som har samma storleksordning på infiltrationskapaciteten som regnets intensitet. I dessa fall kan en ändring i infiltrationen ha stora konsekvenser för resultatet i översvämningens utbredning. För ett 100-årsregn är det matjord, morän och fyllnad som har liknande storleksordning på hastigheten (ibid.).

Rekommendationen vid val av avrinningskoefficient i modellen varierar beroende på hur kraftigt regnet är som ska simuleras. För ett 100-årsregn rekommenderar MSB (ibid.) en avrinningskoefficient på 0,75 för grönytor.

Som nämnts så bestäms markens råhet av Mannings tal och det bör åtminstone göras en differentiering mellan hårdgjorda ytor och grönytor. En mer detaljerad studie i skillnader i Mannings tal vid olika markanvändningar är att föredra för att få ett mer riktigt resultat. Detta är dock tidskrävande och bör vägas mot nytta (MSB 2014).

Det är rekommenderat att använda CDS-regn i simuleringen och utöver ett regn med återkomsttid på 100 år bör minst ett till regn simuleras med längre återkomsttid. Detta ger en uppfattning om hur stor skillnad ett kraftigare regn skulle ge på översvämningens utbredning (MSB 2017).

## 2.8 Skyfallsåtgärder

Idag i Sverige finns det ingen lagstiftning som stödjer vem som bär ansvar för översvämningar till följd av skyfall och vad som ska göras för att undvika dessa. VA-huvudmannen har endast ansvar för att leda bort regn med 10-års återkomsttid, vilket inte täcker in skyfallen (Göteborgs Stad 2019). Det är istället upp till vardera kommun att ta fram en skyfallsplan där det står specificerat vad för åtgärder som ska tas för att undvika översvämningar (Malmö stad 2017). Länsstyrelserna (2018) rekommenderar dock att ny bebyggelse ska byggas så att det klarar av minst ett 100-årsregn.

Uppsala kommun har ännu inte tagit fram en skyfallsplan, men i skrivande stund är den under bearbetning (Uppsala kommun 2019). Det kan förväntas att Uppsala kommun går efter länsstyrelsernas rekommendationer och eftersträvar att skydda staden mot åtminstone ett 100-årsregn. De har dock specificerat att de för ett aktivt arbete för att motverka översvämningar. Detta gör de bland annat genom implementering av grönytor för fördröjning, markhöjning för att kontrollera vattnets väg genom samhället och multifunktionella ytor som kan ta hand om vatten (Uppsala kommun 2018).

En hel stad kan inte säkras mot ett 100-årsregn på en och samma gång, utan prioriteringar måste göras om var omställningen ska börja. Den högsta prioriteringen bör ligga vid att säkra de samhällsviktiga verksamheterna samt de platser där ett skyfall kan kosta liv (Malmö stad 2017).

Som tidigare nämnts är dagvattenledningar oftast designade att maximalt kunna hantera flöden från ett 10-årsregn och räcker alltså inte till vid ett skyfall. Att utveckla det underjordiska dagvattensystemet med större rör för att kunna hantera ett skyfall är väldigt kostsamt och ibland även omöjligt. Marken är på många platser i en stad redan fullt utbyggd med olika typer av ledningar (Göteborgs Stad 2019). Istället kan andra fysiska åtgärder sättas i bruk och de kan delas in i storskaliga och småskaliga lösningar.

Småskaliga lösningar kan vara att fördröjningsytor och alternativa flödesvägar byggs ut på kvarternivå så att dagvattensystemet hinner med att hantera större volymer vatten vid ett skyfall. Det kan vara gröna tak, regnbäddar längst med gator eller andra dagvattenlösningar (se avsnitt 2.3 om dagvattenhantering). Det viktiga är att de implementeras uppströms ett område som ligger i riskzonen för översvämningar. Detta för att minska flödestopparna vid ett skyfall så att de regnmängder som når riskzonen lättare kan tas hand om (Malmö stad 2017).

De storskaliga lösningarna kategoriseras av Göteborgs Stad (2019) på följande sätt:

- **Skyfallsled** - ett stråk som är utsedd till att leda undan vatten vid skyfall.
- **Skyfallsyta** - en yta som är utsedd till att tillfälligt magasinera vatten vid skyfall.
- **Styrning** - en höjning av markytan för att styra vatten vid skyfall.

Dessa åtgärder kan även användas i kombination med varandra, där man till exempel styr vatten med en jordvall till en skyfallsyta. Vattnet kan även ledas direkt ner i vattendrag, med den medförda risken att vattnet inte hinner renas på vägen och föroreningar sköljs direkt ner i recipienten (The city of Copenhagen 2012).

Det bästa är att kombinera en ökad dagvattenhantering med de specifika fysiska åtgärderna för skyfall som är mest kostnads- och platseffektiva. Det kan dock ibland vara svårt att i en tätbebyggd stad hitta skyfallsytor eller att kunna sätta in andra åtgärder när det redan finns bebyggelse på platsen (The city of Copenhagen 2012). Det är viktigt att kommunernas detaljplanering innehåller riktlinjer för hur ny bebyggelse ska byggas för att ha med översvämningsfrågan från början.

### 3 Hydraulisk modellering i MIKE 21 Flow Model

MIKE 21 är ett 2D-modelleringsprogram utvecklat av DHI som kan användas för simulering av flöden och transporter i vatten. Den är främst ämnad åt att simulera flöden i hav, sjöar och floder, men fungerar även för att simulera flöden på torra land. Det finns flera olika moduler som kan användas beroende på vad man ska simulera. För det här arbetet simuleras endast flöden och den hydrodynamiska (HD) modulen. För att beskriva vattenflödet används ekvationerna för bevarandet av massa och rörelsemängd integrerad i vertikalled (DHI 2017a).

Följande avsnitt beskriver översiktligt olika funktioner i modellen samt vilken indata som behövs och hur de sätts upp.

#### 3.1 MIKE Zero

MIKE Zero är den mjukvara som används vid behandling av indata till MIKE 21. I den finns ett verktyg som heter *Grd2Mike* där filer i ASCII-format kan konverteras till en rasterfil som går att öppna och editeras i MIKE Zero. Rasterfilerna består av ett 2D-raster med x- och y-koordinater där varje cell i rastret innehåller ett värde beroende på vilken data som har importerats. Här kan data i rastret ändras och beroende på vad rastret ska vara för indata till MIKE 21, kan det ansättas ett visst *objekt* (engelska: *item*). Regnfilen blir till exempel ansatt objektet *regnintensitet* (engelska: *rainfall rate*) och får då även en enhet angiven (mm/dag). Värdena i cellerna motsvarar då regnintensiteten i vardera cell med enheten mm/dag.

För indata som kräver mer information än bara ett objekt kan flera lager skapas med olika objekt ansatt till vardera lager av raster. Tidsserier kan även skapas där antalet tidssteg och tidsstegsintervall behöver väljas och sedan kan ett unikt raster för varje tidssteg läggas in. Detta utnyttjas när regnfilen skapas för att få en förändring i intensitet över tid.

Resultatet från simuleringarna i MIKE 21 kan öppnas och studeras i detalj i MIKE Zero. För att exportera rastret till en GIS-programvara kan verktyget *Mike2Grd* användas, som fungerar omvänt det verktyget beskrivet ovan.

#### 3.2 Höjdmodell

För att beskriva topografin i modelleringsområdet behövs en höjdmodell importeras till MIKE Zero. Som indata till MIKE 21 behöver topografin vara angiven som objektet *batymetri* (engelska: *bathymetry*) eftersom MIKE 21 vanligtvis används vid modellering av vattendrag, värdet i cellerna motsvarar då höjden i meter. Ett *landvärde* (engelska: *land value*) behöver även tillsättas. Det bestämmer vad som är den lägsta höjden för marken och bör sättas till ett värde som är högre än den högsta punkten i batymetrin (DHI 2017b). Celler som har värden högre än landvärdet blir aldrig aktiverade och är därför inte med i flödesberäkningarna (DHI u.å.).

Vattennivån vid simuleringens start behöver även bestämmas och vid skyfallskarteringar så simuleras regn på torra land och vattennivån är därför noll. Som indata till ytnivån kan därför samma fil som beskriver batymetrin användas.

### 3.3 Modellgränser

Eftersom MIKE 21 använder differentialekvationer i beräkningarna av flödet i horisontalld behövs det finnas randvillkor i modelleringsområdets yttre gränser. Gränserna kan antingen vara öppna eller stängda. En öppen gräns behöver antingen en bestämd vattennivå eller ett bestämt in-/utflöde för alla tidssteg under simuleringen (DHI 2017b). För att skapa en stängd gräns kan marknivån höjas upp till ett värde över landvärdet. En stängd gräns kan användas för att undvika oönskade utflöden ur modellen vid skyfallskartering. För att undvika artificiellt bakvatten bör området av intresse (till exempel avrinningsområdet) vara lokaliserat en bra bit ifrån de stängda gränserna (DHI u.å.).

### 3.4 Simuleringstid

Simuleringstiden vid skyfallskartering bör bestämmas utefter regnets varaktighet för att få med tillräckligt mycket simuleringstid efter regnets slut så att alla flöden har upphört. Först väljs ett tidsstegsintervall och sedan anges antalet tidssteg för att nå upp i den önskvärda simuleringstiden. För en stabil modell ska ett tidsstegsintervall väljas så att *Courant talet* ( $C_r$ ) inte blir större än 1. Courant talet beräknas enligt ekvation 11 och är ett mått på antalet celler som vattnet flödar genom på ett tidssteg (DHI 2017b).

$$C_r = u_{max} \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (11)$$

Där  $u_{max}$  är maxhastigheten på flödet i modellen,  $\Delta t$  är tidsstegsintervallet och  $\Delta x$  är cellernas bredd. Med ett mindre tidsstegsintervall erhålls en stabilare modell, men beräkningstiden blir samtidigt längre, varför en avvägning måste göras vid valet av tidsstegsintervall.

### 3.5 Nederbörd

För att simulera nederbörd behövs en regnfil framtagen i MIKE Zero samt att *nederbörd på torra land* (engelska: *precipitation on dry land*) är aktiverat i MIKE 21. Regnfilen behöver regnintensitet som objekt och enheten mm/dag. Om filen baseras på ett markanvändningsraster kan differentiering av regnintensiteter mellan olika marktyper möjliggöras. Detta är viktigt för att kunna göra avdrag för dagvattensystemet och avrinningskoefficienter. Genom att skapa en tidsserie kan olika värden på intensiteten läggas in för varje tidssteg och på så vis få regnets intensitet att variera över tid (ibid.).

### 3.6 Flooding and Drying

I MIKE 21 används värden på parametrarna  $h_{flood}$  och  $h_{dry}$  som tröskelvärden för vattennivån som avgör när en cell ska genomgå en kontroll för om den ska klassas som våt (översvämmad) eller torr. En cell som har en vattennivå som ligger under värdet för torr visas i resultatet som en cell utan vatten, även fast den i praktiken alltid har vatten. På samma sätt visas de celler som har ett värde över tröskelvärdet för våt som översvämmade. Detta används för att notera när en cell går från torr till översvämmad och vice versa (DHI 2017a).

All extern vattentillförsel till cellerna sparas i parametrarna  $h$  (när cellen är våt) eller  $h_{flood\_dry}$  (när cellen är torr). Initialt är alla celler torra och värdet på  $h_{flood\_dry}$ -parametern är satt till den lägsta möjliga vattenmängden som en cell kan ha,  $EPSF$  (som standard satt till 0,0002 m). Om värdet på  $h_{flood\_dry}$  skulle sjunka under  $EPSF$  så sätts värdet automatiskt tillbaka till  $EPSF$ -värdet. I dessa fall läggs vatten till artificiellt till cellen och strider mot massbalansen, detta kallas *water level correction* (WLC). Den totala volymen WLC som läggs till presenteras i *volymbalanssummeringen* efter simuleringen (DHI 2017a).

När det ackumulerade vattnet i en torr cells  $h_{flood\_dry}$ -parameter överstiger tröskelvärdet  $h_{flood}$  så övergår cellen till att vara våt och värdet på  $h_{flood\_dry}$  kopieras över till  $h$ . Nya förändringar i vattennivån läggs då till i  $h$  eftersom cellen nu klassas som våt (ibid.). En våt cell kan göra angränsande torra celler till våta om förhållandet i ekvation 12 är uppfyllt.

$$\eta \geq h_{flood} + batymetri_{dry} \quad (12)$$

Programmet verifierar om den våta cellens vattennivå,  $\eta$ , är högre än summan av  $h_{flood}$ -parametern och den angränsande cellens batymetri. Om så är fallet så sätts den angränsande cellen som våt och cellens värde på  $h_{flood\_dry}$  kopieras över till  $h$  (ibid.).

När en våt cell övergår till att vara torr använder sig programmet av två parametrar,  $h_{dry}$  och  $EPSH$  (som standard satt till 0,0001 m). När värdet på  $h$  i en våt cell är lika med eller under tröskelvärdet för torka,  $h_{dry}$ , börjar programmet genomföra vissa kontroller. Den första kontrollen som utförs är om  $h$  är över  $EPSH$ . Om så är fallet kontrollerar den om någon av de angränsande cellerna har en tillräckligt hög vattennivå, se ekvation 12. Cellen förblir våt om åtminstone en cell har tillräckligt hög vattennivå, annars sätts den till torr och  $h$  kopieras till  $h_{flood\_dry}$ . Om värdet på  $h$  går under  $EPSH$  så sätts cellen till torr trots att den har angränsande celler med tillräckligt hög vattennivå (ibid.).

### 3.7 Markens råhet

Markens råhet kan beskrivas i modellen med Mannings tal ( $m^{1/3}/s$ ) och bör baseras på ett markanvändningsraster för att kunna göra skillnad på olika marktypers råhet. För att undvika höga flödes hastigheter som leder till instabiliteter (se avsnitt 3.4 om Courant talet) kan branta sluttningar i modelleringsområdet få ett lågt Mannings tal. Detta ökar markens motstånd och sänker flödes hastigheterna (DHI 2017b).

### 3.8 Infiltrationsmodul

För att hantera infiltration i systemet finns det två olika *infiltrationsmoduler* som kan användas i MIKE 21. I den första modulen används en netto infiltrationshastighet. Den fungerar som en sänka i varje cell där en vattennivå räknas ut genom att subtrahera volymen vatten som cellen slukar vid varje tidssteg. Om en cell är torr sker det ingen infiltration (DHI 2017a).

För att återspegla verkligheten bättre tar den andra modulen hänsyn till att marken har en viss infiltrationskapacitet och läckagehastighet. I en förenklad modell beskriver den hur vatten infiltrerar från markytan ner i en infiltrationszon och samtidigt sker ett läckage ut från infiltrationszonen ner till en mättad zon. Det är denna modul som har använts i det här projektet. Infiltrationszonen har en viss vattenlagringskapacitet ( $SC$ ) som beräknas med ekvation 13 (ibid.).

$$SC = Z \cdot A \cdot \gamma \quad (13)$$

Där  $Z$  är infiltrationszonens djup,  $A$  är cellens area och  $\gamma$  är en angiven porositet i marken. För att beräkna den volym vatten som läcker ut ur infiltrationszonen ( $V_L$ ) används ekvation 14 (DHI 2017a).

$$V_L = Q_L \cdot \Delta t \cdot A \quad (14)$$

Där  $Q_L$  är den ansatta läckagehastigheten och  $\Delta t$  är tidssteget som används i simuleringen. Om  $V_L$  är större än volymen vatten som finns i infiltrationszonen ( $V_T$ ), så är det volymen  $V_T$  som läcker ut istället. Volymen i infiltrationszonen uppdateras sedan genom att subtrahera med den volym som läckt ut (ibid.).

$$V_I = Q_I \cdot \Delta t \cdot A \quad (15)$$

Där  $V_I$  är den volym vatten som infiltrerar in i infiltrationszonen och  $Q_I$  är den ansatta infiltrationshastigheten. Om  $V_I$  är större än den volym som finns ledig i infiltrationszonen, så är det resultatet av  $SC - V_T$  som är den volym som infiltrerar. Om det istället är så att  $V_I$  är större än den volym vatten som finns på ytan, är det istället denna volym som infiltrerar (givet att det finns plats i infiltrationszonen) (ibid.).

Ett nytt vattendjup på ytan beräknas genom att subtrahera den volym som infiltrerats. Om cellen blir torr så kan det fortfarande ske läckage, men infiltrationen upphör tills cellen blir våt igen. Likväl så upphör infiltrationen om infiltrationszonen är mättad (ibid.).

En infiltrationsmodulsfil behöver information om infiltrationskapaciteten (mm/h), läckagehastigheten (mm/h), porositeten (enhetslös), matjordens mäktighet (m) samt vattenmättnaden i jorden (enhetslös) och behöver därför fem olika lager av information.

### 3.9 Avrinningskoefficient

När förluster av vattenvolymer representeras av avrinningskoefficienter ska ingen infiltrationsmodul användas. Istället kan förlusterna beräknas direkt på regnintensiteten enligt avsnitt 2.2.1 med ekvation 10 och sedan läggas in på respektive markanvändningstyp enligt avsnitt 3.5.

### 3.10 Eddy-viskositet

*Eddy-viskositet* (engelska: *eddy viscosity*) är ett sätt att beskriva turbulent flöde. I MIKE 21 är det rekommenderat att använda en konstant eddy-viskositet för att undvika instabiliteter och en ökad frekvens av flooding and drying. Vidare rekommenderas att den är flödesbaserad eftersom hastighetsbaserad eddy-viskositet kan ge instabiliteter. Den konstanta eddy-viskositeten kan estimeras med ekvation 16 (DHI u.å.).

$$E = \frac{0,02\Delta x\Delta y}{\Delta t} \quad (16)$$

Där  $\Delta x$  och  $\Delta y$  är cellernas storlek i meter i x- och y-led,  $\Delta t$  är simuleringens tidsstegsintervall. Enheten på eddy-viskositeten blir då  $m^2/s$ .

### 3.11 Flödeskalkylator

*Flödeskalkylatorn* (engelska: *discharge calculator*) är ett verktyg i MIKE 21 som används för att beräkna flöden i en simulering. Minst två koordinater behöver anges för att bilda ett tvärsnitt över vilket flödet sedan kan beräknas. Som indata behövs vattendjup och flöden från en hydrodynamisk simulering. Som resultat ges en tidsseriefil med det momentana flödet, den ackumulerade volymen i vardera riktning över tvärsnittet och tvärsnittets area för varje tidssteg (DHI 2017b).

## 4 Material och metod

### 4.1 Områdesbeskrivning

Akademiska sjukhuset är beläget centralt i Uppsala. Den dominerande jordarten under sjukhusområdet är isälvsediment med hög genomsläpplighet, men det finns även lera i området, se figur 7. Avrinningsområdet har en area på 1,374 km<sup>2</sup> och sträcker sig ända upp i Stadsskogen, se figur 5. Andelen grönytor och hårdgjorda ytor i avrinningsområdet är beräknade till 51% respektive 49%. Den största andelen hårdgjord yta ligger i sjukhusområdet.

Akademiska sjukhuset är det största sjukhuset i Uppsala län och har anor till 1300-talet. Sjukhuset har 8500 anställda, 850 vårdplatser och årligen vårdas omkring 900 000 patienter från hela östra mellansverige på Akademiska (Akademiska sjukhuset 2020). Det är ett krigssjukhus, vilket innebär att det ska ha beredskap för att kunna vårda patienter i krig. Sjukhuset har mycket specialistvård som till exempel BRIVA (brännskadevård), neonatalvård (förtidigt födda) och en framstående cancerbehandling (Nystrand 2020).

Området ligger på Uppsalaåsen vilket är dricksvattenkällan till 85 % av Uppsala kommuns befolkning (Uppsala kommun 2016). Enligt en utredning som Geosigma har gjort ligger Akademiska sjukhuset i ett högt/extremt känsligt område när det kommer till tillrinning. Rekommendationen av Geosigma är att inget vatten som har risk att innehålla föroreningar bör perkolera ner i åsmaterialet. På grund av detta finns det vissa begränsningar när det kommer till dagvattenhantering i området (Gustafsson et al. 2018).

### 4.2 Förarbete i GIS

Innan modelleringen i MIKE 21 kan starta behövs indata till modellen i form av kartraster som innehåller information om till exempel topografin och markanvändning. Arbetet började därför i GIS-programmet *ArcMap* och data hämtades från SLUs geodatabas Zeus samt från SCALGO. Samtliga kartdata är framtagna av Lantmäteriet förutom jordartskartan som är framtaget av SGU. Samtliga kartor hade referenssystemet SWEREF99 TM.

#### 4.2.1 Avrinningsområde

Först och främst togs ett avrinningsområde fram för att veta hur stort område som skulle modelleras. Framställningen av avrinningsområdet följde guiden som Länsstyrelsen i Jönköpings län (2015) har tagit fram. För att få med både det norra och södra sjukhusområdet i avrinningsområdet sattes utloppspunkten långt ner i Stadsparken vid ett flödesstråk som båda områdena är kopplade till. Det resulterande avrinningsområdet kan ses i figur 5.

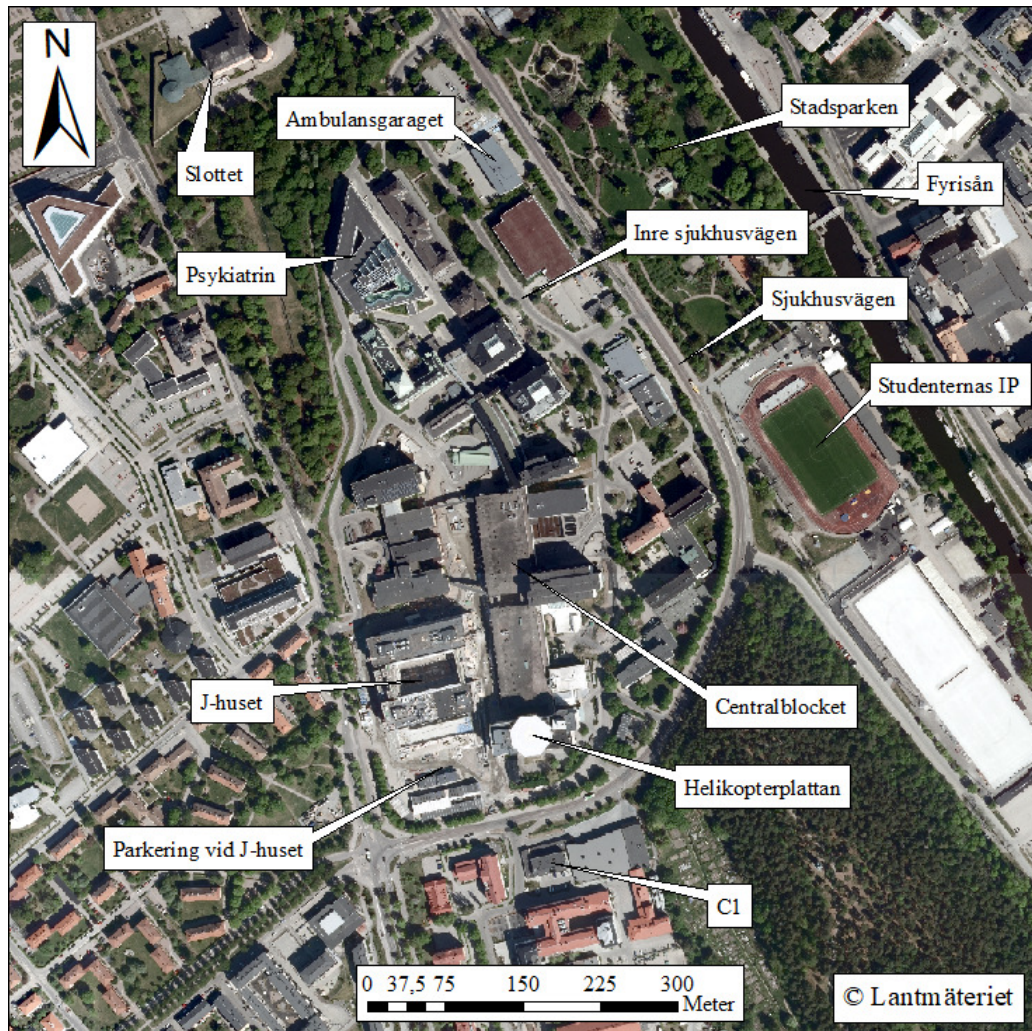


**Figur 5:** Avrinningsområdet med tillhörande utflödespunkt, norra och södra sjukhusområdet utmarkerade. Bakgrundskarta: GSD-Ortofot RGB 0,25 m (2020), © Lantmäteriet

#### 4.2.2 Byggnader

Eftersom det skett ombyggnationer på sjukhusområdet sedan ortofotot och fastighetskartan (som innehåller byggnadspolygonerna) framställdes behövde vissa korrigeringar göras. Detta gjordes genom att en ritning över området lades in över ortofotot i ArcMap. Sedan undersöktes det i ArcMap och genom platsbesök vilka skillnader som fanns och korrigeringar i polygonlagret

från fastighetskartan gjordes. Största korrigeringen var tillägget av J-huset, se figur 6. Alla polygoner som endast var tak (alltså inte en byggnad) togs bort eftersom vatten kan flöda under taket. Med hjälp av ritningarna på ett planerat produktionskök som ska byggas på området lades även detta in på samma sätt som ovan. Taken skildes åt utefter om de var gröna tak eller ej.



**Figur 6:** Objekt som nämns i den här rapporten utpekade på en karta. Bakgrundskarta: GSD-Ortofoto RGB 0,25 m (2020) © Lantmäteriet

### 4.2.3 Höjdmodell

För höjddata användes höjdmodellen från Lantmäteriet utan byggnader med upplösning  $2 \times 2$  meter. Byggnaderna lades in genom att använda *rasterkalkylatorn* (engelska: *raster calculator*) i ArcMap och addera två meter på höjdrastret där de modifierade byggnadspolygonerna återfinns. Endast två meter användes för att inte få för skarpa höjdskillnader i modellen vilket kan leda till instabiliteter. En övrig korrigering gjordes i höjdrastret, vilket var en viadukt som fanns inom modelleringsområdet. Den öppnades upp genom att sänka marken ovanför viadukten.

En bra bit in i projektet blev en nyare höjdmodell från 2019 tillgänglig via SCALGO. Den gamla höjdmodellen var från 2017 och bland annat så var inte förändringarna kring J-huset med i denna. På grund av detta kördes några simuleringar om med den nya höjdmodellen eftersom ändringarna ansågs som tillräckligt stora och viktiga att ha med i simuleringen. Körningarna med

olika infiltrationshastigheter kördes inte om och resultatet från dessa är alltså med höjdmodellen från 2017.

#### 4.2.4 Markanvändning

Markanvändningskartorna som fanns tillgängliga var inte tillräckligt detaljerade, så egna markanvändningskartor togs fram med hjälp av Lantmäteriets infraröda (IR) ortofoto och verktyget *bildanalys* (engelska: *image analysis*) i ArcMap. I bildanalysen användes funktionen *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*) som tar fram ett lager som mestadels representerar grönskan. Detta gör den genom att utnyttja grönskans höga absorption av rött ljus och dess höga reflektion i det nära-infraröda spektrumet. I resultatet får alla celler ett värde baserat på grönskan i den cellen. Negativa eller värden nära noll innehåller ingen grönska, låga värden är gräs eller buskar och generellt så representerar de höga värdena träd och skog. Med verktyget *omklassificering* (engelska: *reclassify*) i ArcMap sattes en gräns på vilka värden som bäst representerar grönska i detta ortofoto och ett raster skapades utefter det. På grund av att ortofotot tagits under en torr period är några gräsmattor bruna och klassades därför inte som grönska. Hål från bruna gräsmattor täcktes med hjälp av polygoner i ArcMap.

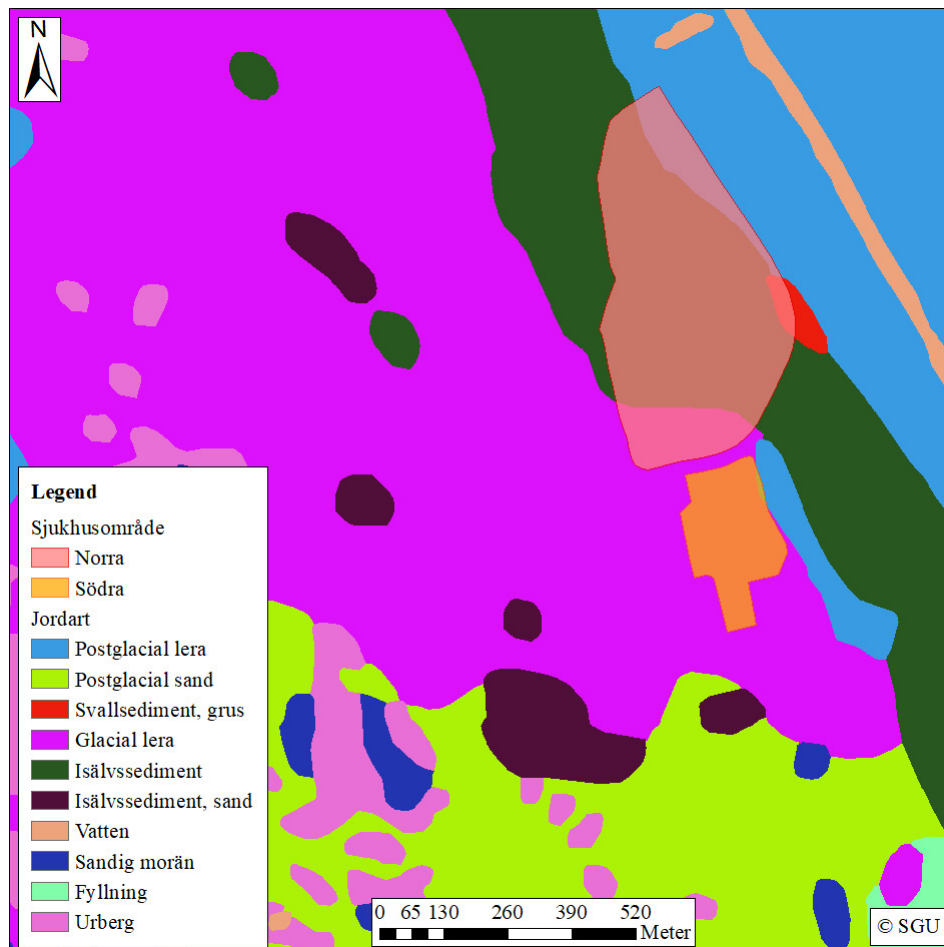
En nackdel med det här verktyget är att skuggor ofta blir klassade som grönska. Skuggorna faller mestadels över vägar och därför kunde väglagret från fastighetskartan användas för att klippa bort skuggorna ur grönyterastret. Vägarna som finns i fastighetskartan är dock inlagda som linjer och har ingen bredd. En buffertzon sattes därför runt samtliga vägar med *buffert*-verktyget (engelska: *buffer*) i ArcMap. Bredden som sattes var baserad på dokumentationen som tillhör fastighetskartan där vägnas bredd står angivna och korrigerades om de inte tycktes stämma med ortofotot (Lantmäteriet 2017).

Markanvändningsrastret som sedan skapades delades in i vatten, tak, gröna tak, grönytor, grusbela ytor och hårdgjorda ytor. Vatten fanns i fastighetskartan från lantmäteriet. Tak, gröna tak och grönytor togs fram efter ovan beskrivna metoder. De grusbela ytor var endast två områden som upptäcktes inne på sjukhusområdet vid platsbesök. De lades in som två polygoner men klassades i slutändan som grönytor (se diskussionsavsnittet 6.4.1). Resterande ytor klassades sedan som hårdgjorda.

Ett sekundärt markanvändningsraster skapades där alla lutningar som är brantare än 45 grader fick en egen klassificering, i övrigt såg det likadant ut som det första markanvändningsrastret. För att få fram lutningen på alla celler användes *sluttnings*-verktyget (engelska: *slope*) i ArcMap på höjdrastret med byggnaderna inlagda. Sedan användes omklassificeringen för att endast få de celler med tillräckligt brant lutning.

#### 4.2.5 Jordarter

Det sista rastret som skapades var jordartsrastret. Inga modifieringar gjordes på detta utan det som levererades av SGU kunde användas direkt, se figur 7.



**Figur 7:** Jordartskarta över modelleringsområdet. Data: Jordarter 1:25 000-1:100 000 (2020), © SGU

## 4.3 Beräkning av regn

### 4.3.1 Beräkning av blockregn

En klimatfaktor på 1,25 användes för samtliga beräkningar. Ekvation 1 multiplicerades med klimatfaktorn för beräkningarna av intensiteten vid de olika återkomsttiderna och varaktigheterna.

För dagvattenssystemet sattes återkomsttiden på regnet till 10 år och varaktigheten sattes till samma som det simulerade regnet. Intensiteten som beräknades för dagvattenssystemets kapacitet drogs av från den totala intensiteten för de ytor som var kopplade till dagvattenssystemet (hårdgjorda ytor, tak och gröna tak).

För simuleringarna med avrinningskoefficient såg beräkningarna ut som ovan med den enda skillnaden att grön-, grus- och vattenytorna multiplicerades med avrinningskoefficienten.

### 4.3.2 Beräkning av CDS-regnet

Varaktigheten på CDS-regnet togs fram genom att beräkna koncentrationstiden för avrinningsområdet enligt avsnitt 2.1.3. Färdvägarna för vattnet mättes upp i ArcMap och sedan användes ekvation 8 för att få koncentrationstiden. Varaktigheten på regnet sattes sedan till samma som tid koncentrationstiden.

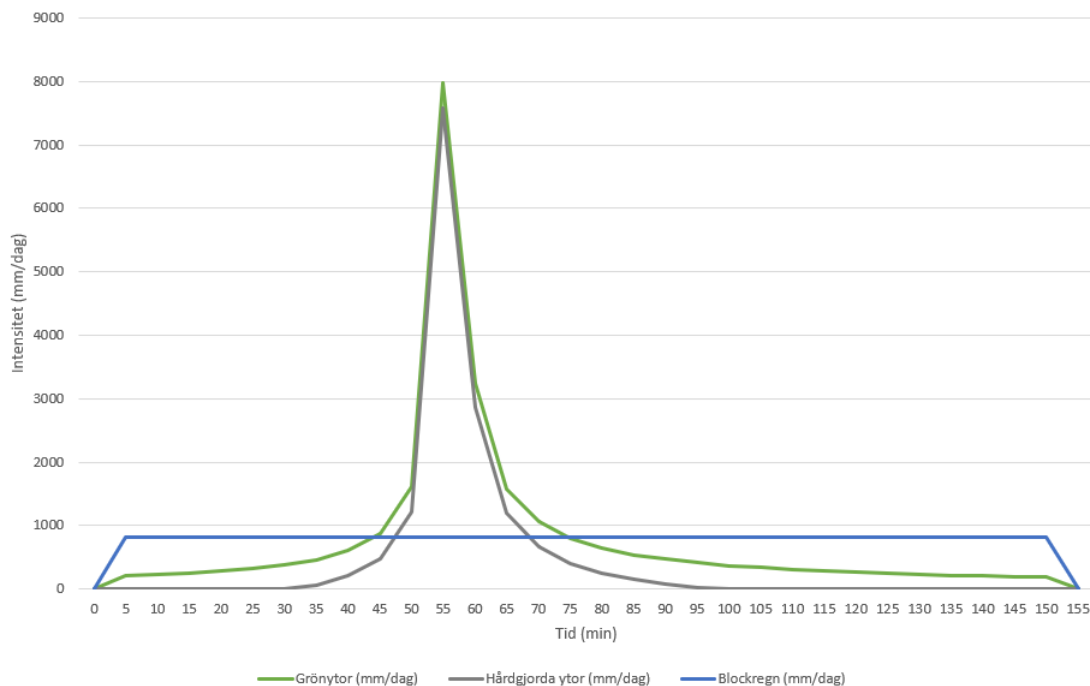
För att beskriva intensiteten på regnet sattes ekvation 1 in i ekvation 3 och deriverades sedan enligt ekvation 4. Detta gav ekvation 17 som är funktionen för intensiteten innan toppen och ekvation 18 som är funktionen för intensiteten efter toppen.

$$i_f = \frac{\sqrt[3]{T} \left( 3,8 \log \left( \frac{t_f}{r} \right) + 190 \right)}{\left( \frac{t_f}{r} \right)^{0,98}} + 2 \quad (17)$$

$$i_e = \frac{\sqrt[3]{T} \left( 3,8 \log \left( \frac{t_e}{1-r} \right) + 190 \right)}{\left( \frac{t_e}{1-r} \right)^{0,98}} + 2 \quad (18)$$

Där  $t_v$  har bytts ut mot  $\frac{t_f}{r}$  och  $\frac{t_e}{1-r}$  för ekvationen innan toppen respektive ekvationen efter toppen.  $T$  är återkomsttiden i månader,  $t_f$  är tiden i minuter innan toppen räknad från toppen och mot regnets start,  $t_e$  är tiden i minuter efter toppen räknad från toppen och framåt,  $r$  är skevhetskoefficienten som sattes till 0,37.

Med de här två funktionerna kunde ekvidistanta regndata beräknas. Tidsintervallen valdes så att en topp inte hamnar för nära ett tidssteg för att undvika att det tidssteget får en alldeles för hög intensitet. Toppen av regnet justerades för att den totala regnvolymen skulle stämma överens med volymen från ett blockregn av samma återkomsttid och varaktighet. Toppen hamnade vid 55 minuter och intensiteten justerades till 739 l/s ha vilket blev 923,75 l/s ha efter att ha multiplicerats med klimataktorn. Den totala volymen på regnet blev 86,10 mm vilket är samma volym som ett blockregn av samma återkomsttid och varaktighet. Figur 8 visar CDS-regnets form i en intensitets-tid-graf jämfört med blockregnet av samma återkomsttid och varaktighet. Här ses även att ett avdrag har gjorts på de hårdgjorda ytorna. Eftersom intensiteten inte kan bli negativ sattes värdet på intensiteten till 0 där schablonavdraget var större än regnets intensitet. Se appendix A.1 för resultatet av beräkningarna.



**Figur 8:** CDS- och blockregn illustrerat i en intensitets-tid-graf. Den gröna linjen är CDS-regnets intensitet på grönytor, den gråa linjen är CDS-regnets intensitet på de hårdgjorda ytorna och den blåa linjen är blockregnets intensitet på grönytor. Återkomsttid: 100 år. Varaktighet: 150 minuter.

Den enklare metoden att ta fram ett CDS-regn som finns beskriven av Svenskt Vatten (2011a) och som kort togs upp i avsnitt 2.1.2 ger ett regn som inte har ekvidistanta tidssteg och korrigeringar behöver göras för att det ska gå att använda i MIKE 21.

#### **4.3.3 Beräkning av Köpenhamnsregnet**

Nederbördsdatan från DMI (2012) var uppmätt med 15-minutersintervall därför gjordes simuleringen med blockregn med 15 minuters varaktighet. Simuleringsstegen som användes i MIKE 21 var fem minuter långa och varje block varade tre tidssteg. Se appendix A.2 för att se regnets intensitets-tid-graf samt data som den är beräknad på.

Den totala volymen som simuleras blev 155,55 mm vilket ungefär motsvarar ett regn med 120 minuters varaktighet och en återkomsttid på 1400 år (155,22 mm) räknat med ekvation 1. Ett schablonavdrag gjordes på de hårdgjorda ytorna motsvarande ett 10-årsregn med varaktighet 120 minuter och klimatfaktor 1,25.

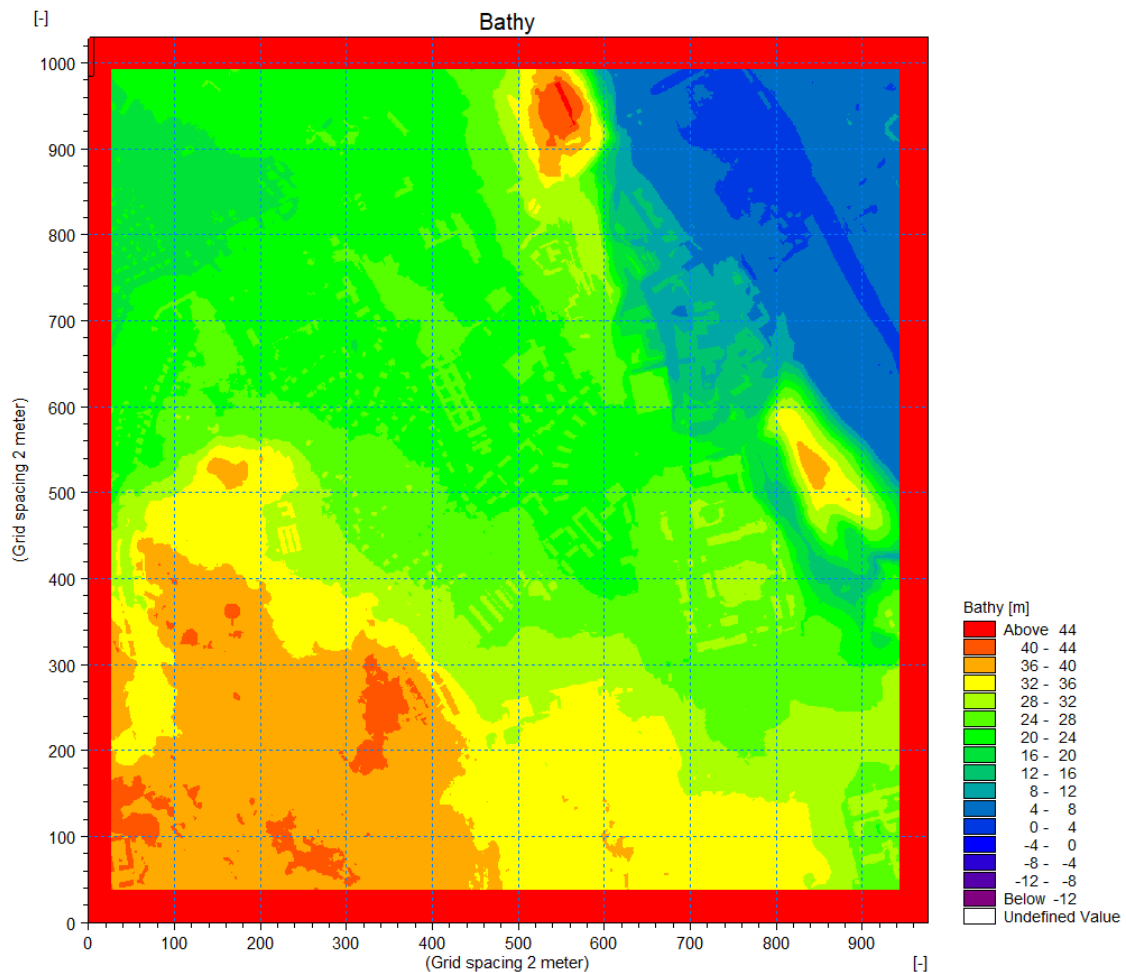
#### **4.3.4 Beräkning av Uppsalaregnet**

Data från skyfallet i Uppsala 2018-07-29 finns bara i entimmesintervall och därför blir det ingen detaljerad simulering av det regnet. De två timmar med högst intensitet delas in i femminutersintervall och ett schablonavdrag på ett 10-årsregn med två timmars varaktighet och klimatfaktor dras av från de hårdgjorda ytorna. Regnets intensitetskurva kan ses i appendix A.3.

### **4.4 Modelluppställning**

#### **4.4.1 Höjdmodellen**

Med det importerade höjdrastret från ArcMap skapades batymetrin för modellen. Landvärdet sattes till någon meter över det högsta värdet på batymetrin. För att ha ett stängt modelleringsområde höjdes nivån upp till över landvärdet i en ram runt avrinningsområdet, se figur 9. För startnivån på vattnet i simuleringen skapades en kopia av batymetrifilen och den sparades som en ytnivåfil.

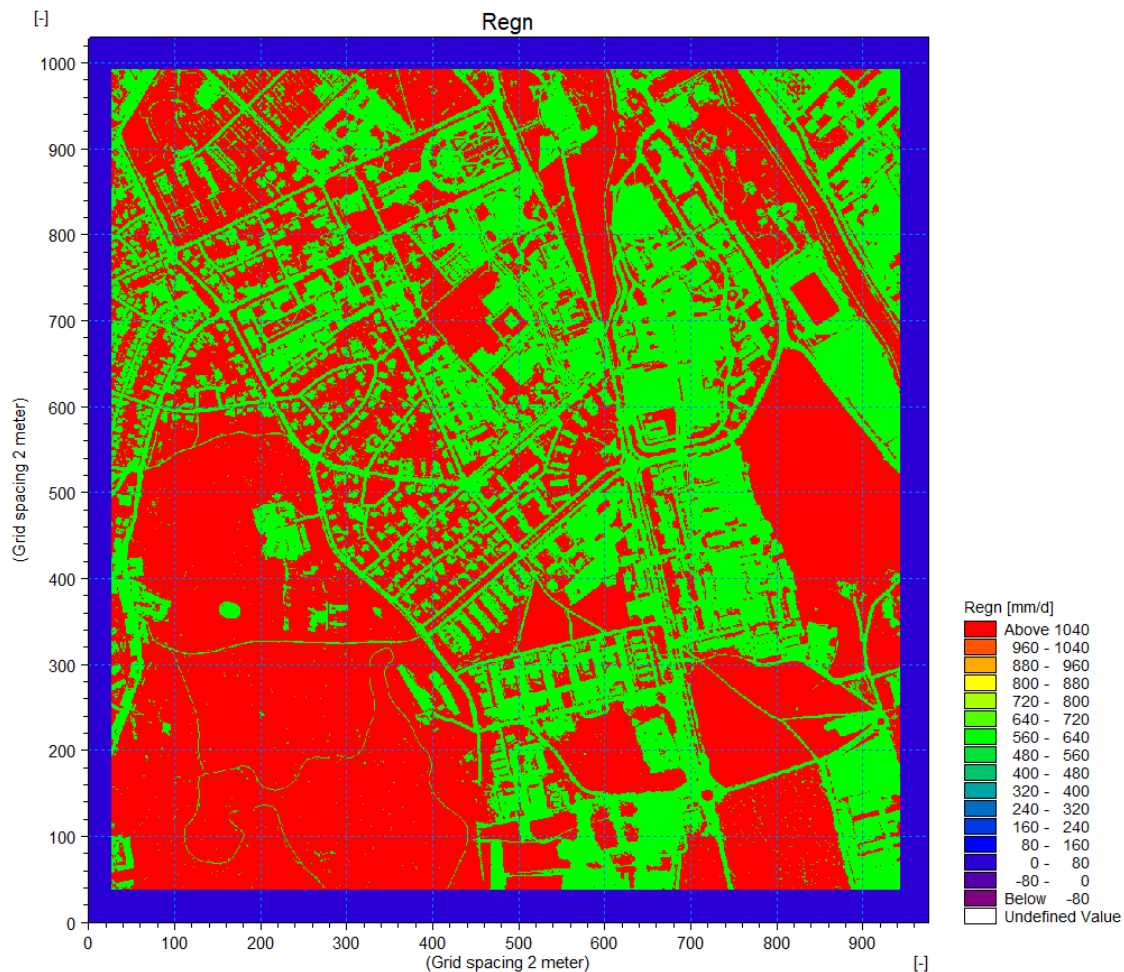


**Figur 9:** Batymetrin baserad på höjdmodellen importerad från ArcMap med inlagd barriär runt simuleringsområdet. Cellerna får olika färger baserade på höjden i Ursprungsdata: GSD-Höjddata, grid 2+ (2020) och GSD-Fastighetskartan (2020), © Lantmäteriet.

#### 4.4.2 Nederbörden

Regnfilen skapades enligt avsnitt 3.5 och baserades på markanvändningsrastret. Markanvändningen delades in i två grupper. Första gruppen innehöll de ytor som är kopplade till dagvattenssystemet (hårdgjorda ytor, tak och gröna tak) och den andra gruppen innehöll de som inte var kopplade till dagvattenssystemet (grönytor, grus och vatten).

En tidsserie upprättades där tidsseriens längd och steglängden varierade beroende på vilket regn som simulerades. Första tidssteget sattes alltid till att ha regnintensiteten 0 mm/dag över hela området. På nästa tidssteg startade regnet och hur länge det varade berodde på regnets varaktighet. Beroende på vilken grupp cellerna tillhörde fick de en regnintensitet (mm/dag) tilldelad över hela varaktigheten inom simuleringsområdet (ej ramen). Se avsnitt 4.3 för utförligare beskrivning av hur värden på regnintensiteterna togs fram. Tidsstegen efter regnets varaktighet sattes till 0 mm/dag tills simuleringens slut. Generellt så gavs minst tre timmar simuleringstid efter regnets slut. I figur 10 ses ett exempel på ett tidssteg i regnfilen.



**Figur 10:** Tidssteg i regnfilen baserad på markanvändningsrastret importerad från ArcMap med inlagd barriär runt simuleringsområdet. Regnet som illustreras är ett tidssteg i Uppsalaregnet. Ursprungsdata: GSD-Fastighetskartan (2020), GSD-Ortofoto RGB 0,25 m (2020) och GSD-Ortofoto IRF 0,25 m (2020), © Lantmäteriet.

#### 4.4.3 Infiltrationsmodulen

Infiltrationen angavs som konstant över tid men varierande i rum och skapades enligt avsnitt 3.8. Värden till infiltrationsmodulen hämtades från WSPs skyfallskartering av Stockholms stad (Thurin 2018). Infiltrationen baserades på markanvändningsrastret utan sluttningarna. Grönytor, grusbelagda ytor och gröna tak grupperades ihop och fick en konstant infiltrationshastighet. Resterande celler fick noll infiltration.

Läckaget skapades från jordartsrastret där varje jordart fick en läckagehastighet utifrån tabell 2.

**Tabell 2:** Läckagehastigheterna som användes i infiltrationsmodulen. Baserad på skyfallskarteringen för Stockholms stad (Thurin 2018).

| Jordart              | Läckagehastighet [mm/h] |
|----------------------|-------------------------|
| Grus/sand/åsmaterial | 360                     |
| Morän/växellagring   | 36                      |
| Organisk jord        | 3,6                     |
| Silt/lera            | 0,36                    |
| Berg i dagen/vatten  | 0                       |

Porositeten och mäktigheten sattes till ett konstant värde för hela simuleringsområdet. Dessa värden sattes till 0,4 för porositeten och 0,3 meter för mäktigheten.

Det sista lagret i infiltrationsmodulen, vattenmättnaden, baserades på jordartsrastret. Värdena var tagna från skyfallskarteringen för Stockholms stad och multiplicerades med porositeten för att få rätt enhet, se tabell 3.

**Tabell 3:** Vattenmättnaden som användes i infiltrationsmodulen. Baserad på skyfallskarteringen för Stockholms stad (Thurin 2018).

| Jordart              | Vattenmättnad [-] |
|----------------------|-------------------|
| Grus/sand/åsmaterial | 0,16              |
| Morän/växellagring   | 0,20              |
| Organisk jord        | 0,24              |
| Silt/lera            | 0,26              |
| Berg i dagen         | 0,20              |
| Vatten               | 0                 |

Vid simuleringar med avrinningskoefficient inaktiverades infiltrationsmodulen och regnet som simulerades på grönytorna fick istället ett avdrag baserat på avrinningskoefficienten, se avsnitt 4.3.1.

#### 4.4.4 Markens råhet

För att beskriva markens råhet användes markanvändningsrastret med lutningarna större än 45 grader inlagda. Varje cell fick ett Mannings tal ( $m^{1/3}/s$ ) utifrån tabell 4. Dessa värden är tagna från Stockholms stads skyfallskartering och överskattar markens skrovlighet något, om de jämförs med vägverkets rekommendationer i tabell 1 (Thurin 2018).

**Tabell 4:** Mannings tal som angavs till olika markanvändningar i modellen. Baserad på skyfallskarteringen för Stockholms stad (Thurin 2018).

| Markanvändning                 | Mannings tal [ $m^{1/3}/s$ ] |
|--------------------------------|------------------------------|
| Ytor med större lutning än 45° | 2                            |
| Tak                            | 10                           |
| Hårdgjorda ytor                | 70                           |
| Grönytor/grus/gröna tak        | 5                            |
| Vatten                         | 15                           |

#### 4.4.5 Övriga inställningar

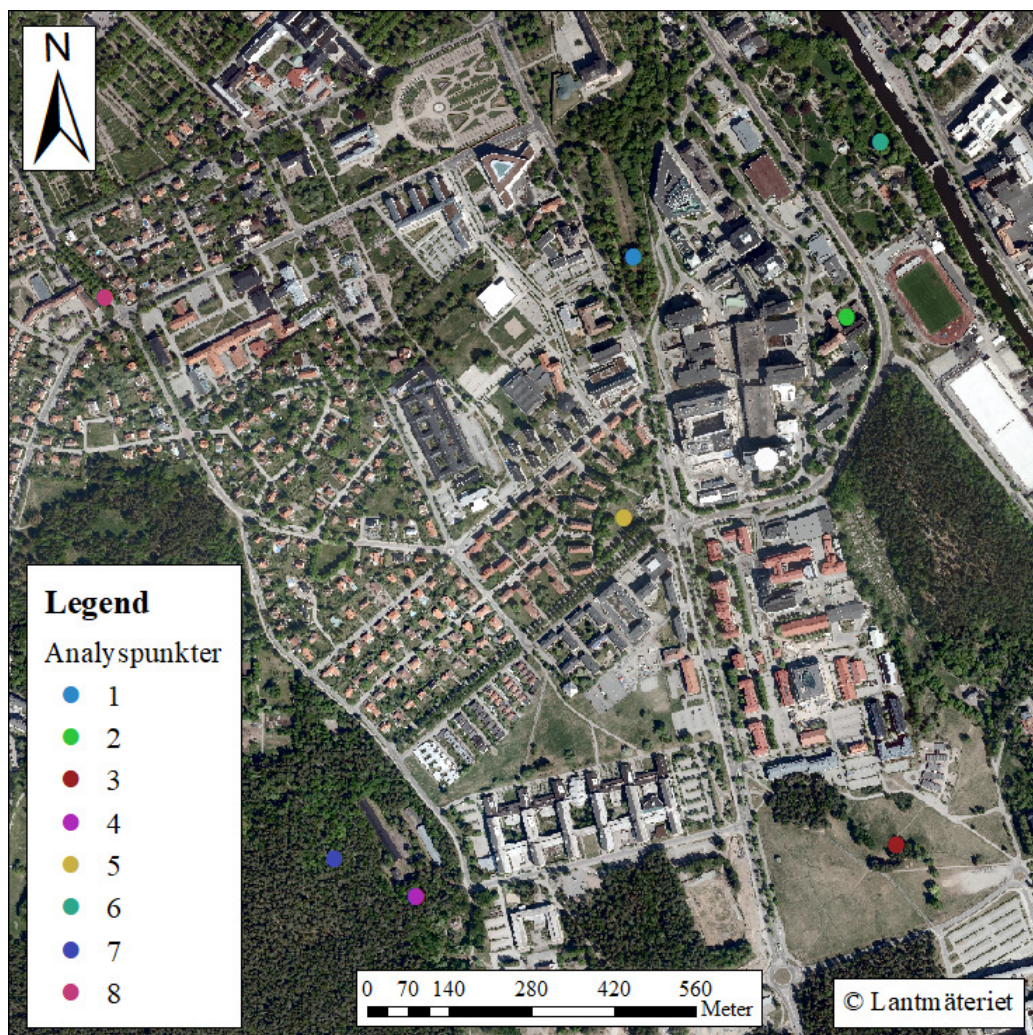
Den hydrodynamiska modellen användes och *marköversvämning* (engelska: *inland flooding*) var aktiverad för samtliga körningar. Simuleringstiden var antingen fyra eller sex timmar beroende på varaktigheten på regnet som simulerades. Tidsstegsintervallet sattes till 0,2 sekunder och gav 72000 tidssteg för simuleringarna som var fyra timmar och 108000 tidssteg för simuleringarna på sex timmar. Flooding and drying var aktiverat. Gränsen för  $h_{dry}$  sattes till 0,001 meter och  $h_{flood}$  sattes till 0,002 meter, se avsnitt 3.6. Eddy-viskositeten var konstant, flödesbaserad och

beräknades med ekvation 16 där  $\Delta x$  och  $\Delta y$  sattes till två meter och  $\Delta t$  sattes till 0,5 sekunder och gav ett värde på 0,16 m<sup>2</sup>/s. Det här värdet användes i samtliga simuleringar.

#### 4.4.6 Utdata från modellen

Som utdata från modellen valdes vattendjupet, flödet, ytnivån, hastigheten och flödesriktningen över hela simuleringstiden och hela simuleringsområdet. För körningar med infiltrationsmodul redovisades även vattenmättnaden och infiltrerad volym.

Vattendjupet, flödet, vattenmättnaden och infiltrerade volymen för några specifikt utvalda punkter togs även fram. Punkterna valdes utefter vilken den underliggande jordarten var för att kunna studera skillnader i läckagehastigheten. Samtliga analyspunkter var placerade på grönytor för att det skulle ske någon infiltration. Det eftersträvades att placera dem där det inte var så stor lutning för att vattnet skulle ha större möjlighet till att infiltrera. Punkternas placering kan ses i figur 11. Punkt 1 och 2 var placerade i isälvsediment, 3 och 4 var placerade i morän, 5 och 6 var placerade i silt/lera och punkt 7 och 8 var placerade i urberg.



**Figur 11:** De åtta analyspunkterna som användes i känslighetsanalysen. Bakgrundskarta: GSD-Ortofoto RGB 0,25 m (2020), © Lantmäteriet.

Med *beräkning av översvämningsstatistik* (engelska: *calculation of inundation statistics*) valt i modellen så gavs resultat i form av raster med maximalt vattendjup, flöde, hastighet för varje cell över hela körningen samt vid vilken tid i simuleringen de inträffar.

Utöver dessa resultat så gavs även en volymbalanssummering vid körningarnas slut där bland annat totala nederbörden, WLC, infiltrationen och volymen som är kvar i modellen redovisas.

#### 4.4.7 Val av simuleringar

Samtliga simuleringar som utförts finns listade i tabell 5 med lite kort beskrivande information om vad som skiljer dem åt. Blockregn 1 (Blk1) var standardregnet som användes vid de flesta beräkningar och som användes som referens i känslighetsanalysen. Simuleringen med barriär (Bar1) är exakt likadan som Blk1 förutom att en barriär kring norra sjukhusområdet är inlagd i höjdrastret, se figur 18 i resultat samt avsnitt 4.6.2 för hur den lades in. För att studera hur översvämningen i området ser ut vid kraftigare skyfall simulerades även ett blockregn med 500 års återkomsttid (Blk5) och Köpenhamnsregnet (Kph1). Blk5 har samma inställningar som Blk1 förutom att återkomsttiden är längre och Kph1 är framtagen från uppmätta regnintensiteter i samband med Köpenhamnsregnet 2011, se avsnitt 4.3.3 för mer detaljer. Uppsalaregnet (Upp1) baseras på uppmätta regnvolymer i samband med skyfallet över Uppsala sommaren 2018. Det är ett regn som faktiskt har fallit över det område som modelleras och resultatet från den simuleringen kunde eventuellt användas för att validera modellen.

**Tabell 5:** Samtliga simuleringar som körts. Simuleringens namn, vilken typ av regn som använts, återkomsttiden ( $T$ ) och varaktigheten ( $t_v$ ) på regnet, om infiltrationsmodul eller avrinningskoefficient ( $\varphi$ ) använts, totala volymen ( $V$ ) som simulerats, vilken höjdmodell (DEM) som använts och simuleringstiden redovisas i denna tabell.

| Namn | Regntyp    | $T$ [år] | $t_v$ [min] | Infilt.        | $V$ [mm] | DEM  | Sim.tid |
|------|------------|----------|-------------|----------------|----------|------|---------|
| Blk1 | Block      | 100      | 30          | 36 mm/h        | 51,9     | Båda | 4 h     |
| Bar1 | Block      | 100      | 30          | 36 mm/h        | 51,9     | 2019 | 4 h     |
| Blk5 | Block      | 500      | 30          | 36 mm/h        | 88,4     | 2019 | 4 h     |
| Kph1 | Historiskt | 1400     | 120         | 36 mm/h        | 155,6    | 2019 | 6 h     |
| Upp1 | Historiskt | 90       | 120         | 36 mm/h        | 61,0     | 2019 | 6 h     |
| Cds1 | CDS        | 100      | 150         | 36 mm/h        | 86,1     | 2019 | 6 h     |
| Blk4 | Block      | 100      | 150         | 36 mm/h        | 86,1     | 2019 | 6 h     |
| Blk2 | Block      | 100      | 10          | 36 mm/h        | 29,3     | 2019 | 4 h     |
| Blk3 | Block      | 100      | 60          | 36 mm/h        | 68,2     | 2019 | 4 h     |
| Avr1 | Block      | 100      | 30          | $\varphi$ 0,4  | 51,9     | 2019 | 4 h     |
| Avr2 | Block      | 100      | 30          | $\varphi$ 0,75 | 51,9     | 2019 | 4 h     |
| Inf1 | Block      | 100      | 30          | 3,6 mm/h       | 51,9     | 2017 | 4 h     |
| Inf2 | Block      | 100      | 30          | 0,36 mm/h      | 51,9     | 2017 | 4 h     |
| Inf3 | Block      | 100      | 30          | 360 mm/h       | 51,9     | 2017 | 4 h     |

För känslighetsanalysen av CDS-regn simulerades ett CDS-regn (Cds1) som beräknades enligt avsnitt 4.3.2. Ett blockregn av samma återkomsttid och varaktighet simulerades för att ha som jämförelse (Blk4). Blk4 användes även till känslighetsanalysen av varaktigheten där den jämfördes med blockregn som hade varaktigheterna 10 minuter (Blk2), 30 minuter (Blk1) och 60 minuter (Blk3).

För känslighetsanalysen av avrinningskoefficienten kördes två simuleringar med avrinningskoefficient istället för en infiltrationsmodul. I ena simuleringen (Avr2) valdes avrinningskoefficienten efter MSBs rekommendation (se avsnitt 2.7.4) och sattes till 0,75. I den andra simuleringen (Avr1) valdes avrinningskoefficienten efter konsultation med handledare för projektet och sattes till 0,4. Avrinningskoefficienterna som användes sattes på grönytor, gröna tak och grusytorna, medans resterande ytor fick avrinningskoefficienten 1. För att jämföra med en körning med infiltrationsmodul användes Blk1.

Till sist så kördes fyra simuleringar med varierande infiltrationshastighet för känslighetsanalysen av infiltrationshastigheten. Infiltrationshastigheterna var 360 mm/h (Inf3), 36 mm/h (Blk1), 3,6 mm/h (Inf1) och 0,36 mm/h (Inf2). Dessa simulerades tidigt i projektet när den äldre höjdmodellen användes. Blk1 simulerades med båda höjdmodellerna och kunde därför ändå användas i denna känslighetsanalys.

## 4.5 Analys av resultaten

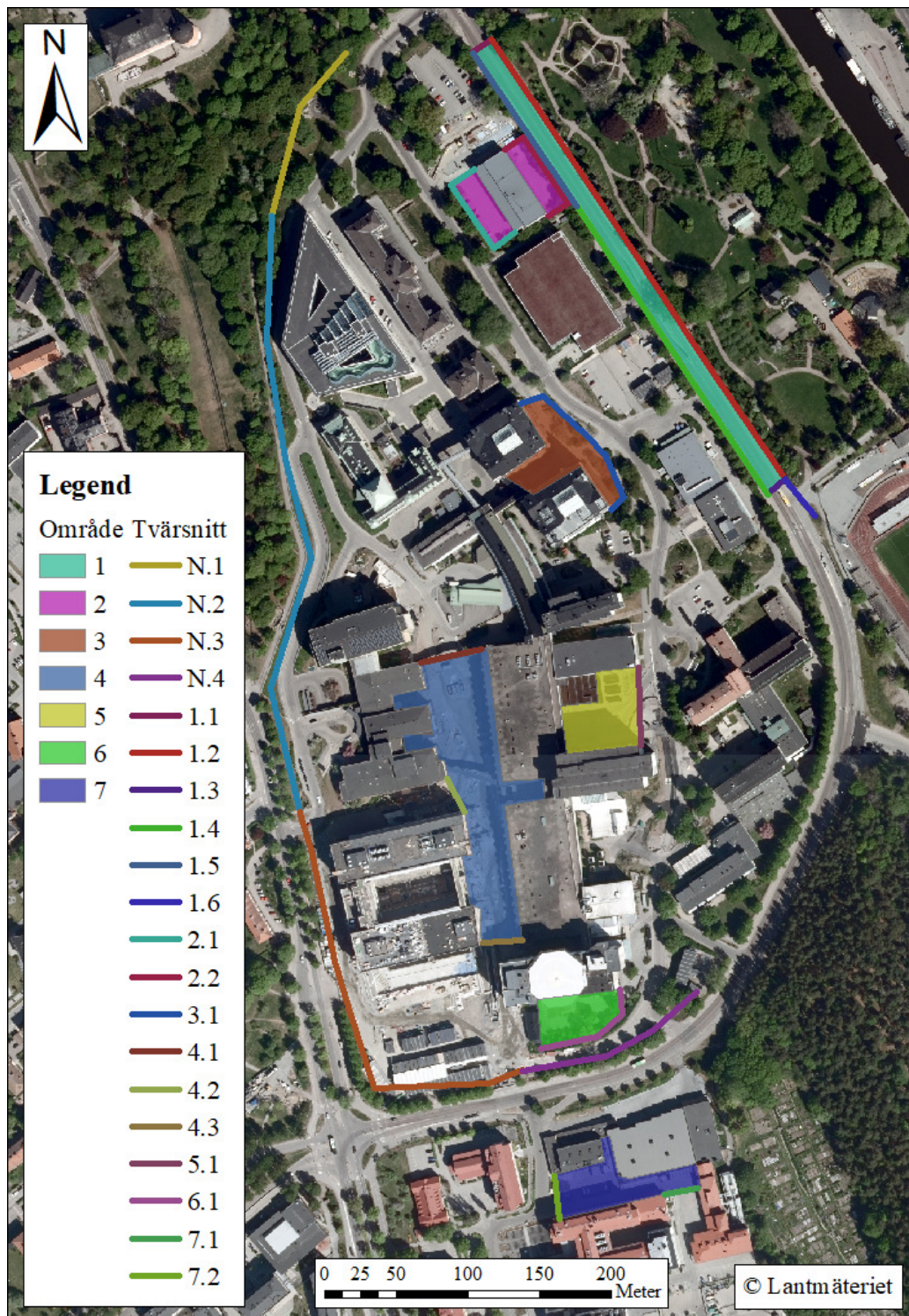
### 4.5.1 Utvalda områden

Särskilda områden inne på sjukhusområdet valdes ut för att studeras noggrannare, se figur 12. Den noggrannare studien gick ut på att beräkna flöden in och ut ur dessa områden samt hur stor volym som blir kvar efter simuleringarnas slut. I tabell 6 är arean för samtliga områden angiven samt vilken andel av arean som är grönytor respektive hårdgjorda ytor.

**Tabell 6:** *Arean och andelen grönyta respektive hårdgjord yta i de områden som var utpekade av Region Uppsala som särskilt intressanta.*

| Område | Area [m <sup>2</sup> ] | Grönytor [%] | Hårdgjorda ytor [%] |
|--------|------------------------|--------------|---------------------|
| 1      | 22500                  | 4,4          | 95,6                |
| 2      | 7500                   | 21,1         | 78,9                |
| 3      | 9330                   | 56,4         | 43,6                |
| 4      | 30400                  | 8,7          | 91,3                |
| 5      | 9180                   | 0,0          | 100,0               |
| 6      | 6780                   | 46,7         | 53,3                |
| 7      | 8420                   | 18,3         | 81,7                |

Område 1 valdes ut för att kunna studera hur framkomligheten längst med sjukhusvägen skulle påverkas av ett skyfall. Det är även en naturlig rinnväg för vattnet och en stor andel av vattnet som kommer från avrinningsområdet flödar via sjukhusvägen innan det når Stadsparken. Här kan flödet in i Stadsparken studeras. Efter preliminära resultat valde Region Uppsala ut de övriga områdena (2-7) som särskilt intressanta att studera närmre.



**Figur 12:** Områdena utpekade av Region Uppsala som särskilt intressanta samt tvärsnitten som användes vid flödesberäkningarna markerade och numrerade. Bakgrundskarta: GSD-Ortofoto RGB 0,25 m (2020), © Lantmäteriet.

#### 4.5.2 Flöden

För att ta reda på hur stora volymer som flödar in i olika områden användes MIKE 21s flödeskalkylator, se avsnitt 3.11. Koordinater till tvärsnitt togs fram genom att studera maxflödet och flödesriktningar för att upptäcka de största flödesvägarna. Generellt upprättades tvärsnitt kring

de intressanta områdena, längst med flödesvägarna in mot de intressanta områdena och runt det norra sjukhusområdet, se figur 12 och tabell 7. Tvärsnitt i anslutning till byggnaderna kring de intressanta områdena togs även fram för att se hur stor volym som kommer från taken. Det eftersträvades att lägga tvärsnitten vinkelrätt mot flödesriktningarna så att majoriteten av flödet flödar åt samma håll över tvärsnittet.

**Tabell 7:** Samtliga tvärsnitt som finns presenterade i figur 12 med beskrivande text om vart tvärsnittet är lokaliserat och vilket flöde som det avser att mäta.

| <b>Tvärsnitt</b> | <b>Beskrivning</b>                                                    |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| N.1              | Flöde in i norra delen av norra sjukhusområdet ner mot norra infarten |
| N.2              | Flöde in i norra sjukhusområdet förbi psykiatrien                     |
| N.3              | Flöde in i norra sjukhusområdet ner mot J-huset                       |
| N.4              | Flöde in i norra sjukhusområdet ner mot öster om centralblocket       |
| 1.1              | Flöde längst med Sjukhusvägen från norr                               |
| 1.2              | Flöde ner mot Stadsparken från Sjukhusvägen                           |
| 1.3              | Flöde längst med Sjukhusvägen från söder                              |
| 1.4              | Flöde från södra delen av norra sjukhusområdet ner mot Sjukhusvägen   |
| 1.5              | Flöde från norra delen av norra sjukhusområdet ner mot Sjukhusvägen   |
| 1.6              | Flöde ner mot Studenternas IP                                         |
| 2.1              | Flöde in i område 2 från väster                                       |
| 2.2              | Flöde in i område 2 från öster                                        |
| 3.1              | Flöde in i område 3                                                   |
| 4.1              | Flöde ut ur område 4 mot norr                                         |
| 4.2              | Flöde in i område 4 från väster                                       |
| 4.3              | Flöde in i område 4 från söder                                        |
| 5.1              | Flöde in i område 5                                                   |
| 6.1              | Flöde in i område 6                                                   |
| 7.1              | Flöde in i område 7 från söder                                        |
| 7.2              | Flöde in i område 7 från väst                                         |

### 4.5.3 Volymner

Slutvolymen i hela området erhöles från volymbalanssummeringen. Men för att beräkna volymen i de sju områdena av extra intresse användes *zonstatistik som tabell* (engelska: *zonal statistics as table*) i ArcMap. Polygonerna som är inlagda på de intressanta områdena användes som zonen som ska studeras och indata var raster med vattendjup exporterade från MIKE 21. Detta gav en tabell med olika statistiska data, bland annat totala vattendjupet för varje område. För att få detta i volym multiplicerades det med rastrets upplösning ( $2 \times 2 \text{ m}^2$ ).

För de totala slutvolymerna studerades summan av vattendjupet över hela området och multiplicerades med rastrets upplösning för att få det i volymner. Den här slutvolymen kom att skilja sig från slutvolymen som erhöles av volymbalanssummeringen eftersom vissa celler som innehåller vatten klassas som torra och vattendjupet redovisas då inte i rastret från MIKE, se avsnitt 3.6.

## **4.6 Åtgärdsanalys**

### **4.6.1 SCALGO**

SCALGO är ett online-program där snabba analyser kan göras på bland annat översvämningar och flödesvägar. Det kan liknas vid en lågpunktskartering som togs upp i avsnitt 2.7.1 eftersom det inte tar hänsyn till markens råhet och infiltration på samma sätt som MIKE 21 gör. Men SCALGO skiljs ändå från en vanlig lågpunktskartering eftersom det tar hänsyn till regnets storlek. Detta görs genom att användaren får ange den volym vatten som faller över området och SCALGO beräknar sedan översvämningens utbredning baserat på den volymen. Det smidiga med SCALGO är att en förändring i terrängen enkelt kan läggas in och sedan beräknas nya flödesvägar och lågpunkter snabbt fram. Höjdmodellen som används i SCALGO är tagen från Lantmäteriet (SCALGO 2020).

I det här projektet användes först SCALGO för att se hur stort avrinningsområdet var och var utflödespunkten behövde placeras för att båda sjukhusområdena skulle inkluderas i avrinningsområdet. Sedan användes det framförallt för att kunna se hur åtgärder på översvämningen skulle påverka resultatet. Innan barriären lades in i MIKE-simuleringen testades den i SCALGO för att se om den skulle ha någon effekt. En rad andra åtgärdsförslag testades i SCALGO för att få en uppfattning om hur väl de skulle fungera. SCALGO kan inte ersätta detaljnivån som finns i en simulering i MIKE 21, men det är ett bra komplement eftersom en simulering i MIKE 21 tar lång tid att utföra.

### **4.6.2 MIKE 21**

Efter undersökning i SCALGO valdes barriären runt det norra området ut för att läggas in i en simulering i MIKE 21. Detta gjordes i ArcMap genom att rita linjer där barriären är tänkt att anläggas. Sedan fick linjerna en buffert så de blev fyra meter breda. Dessa linjer med buffert användes sedan för att höja upp markytan i höjdrastret med en meter med hjälp av rasterkalkylatorn. För att beräkna hur stora volymer som fortfarande behövs ta hand om inne på sjukhusområdet efter barriärens installation användes flödeskalkylatorn i MIKE, som beskrivet i avsnitt 4.5.2.

## **4.7 Känslighetsanalys**

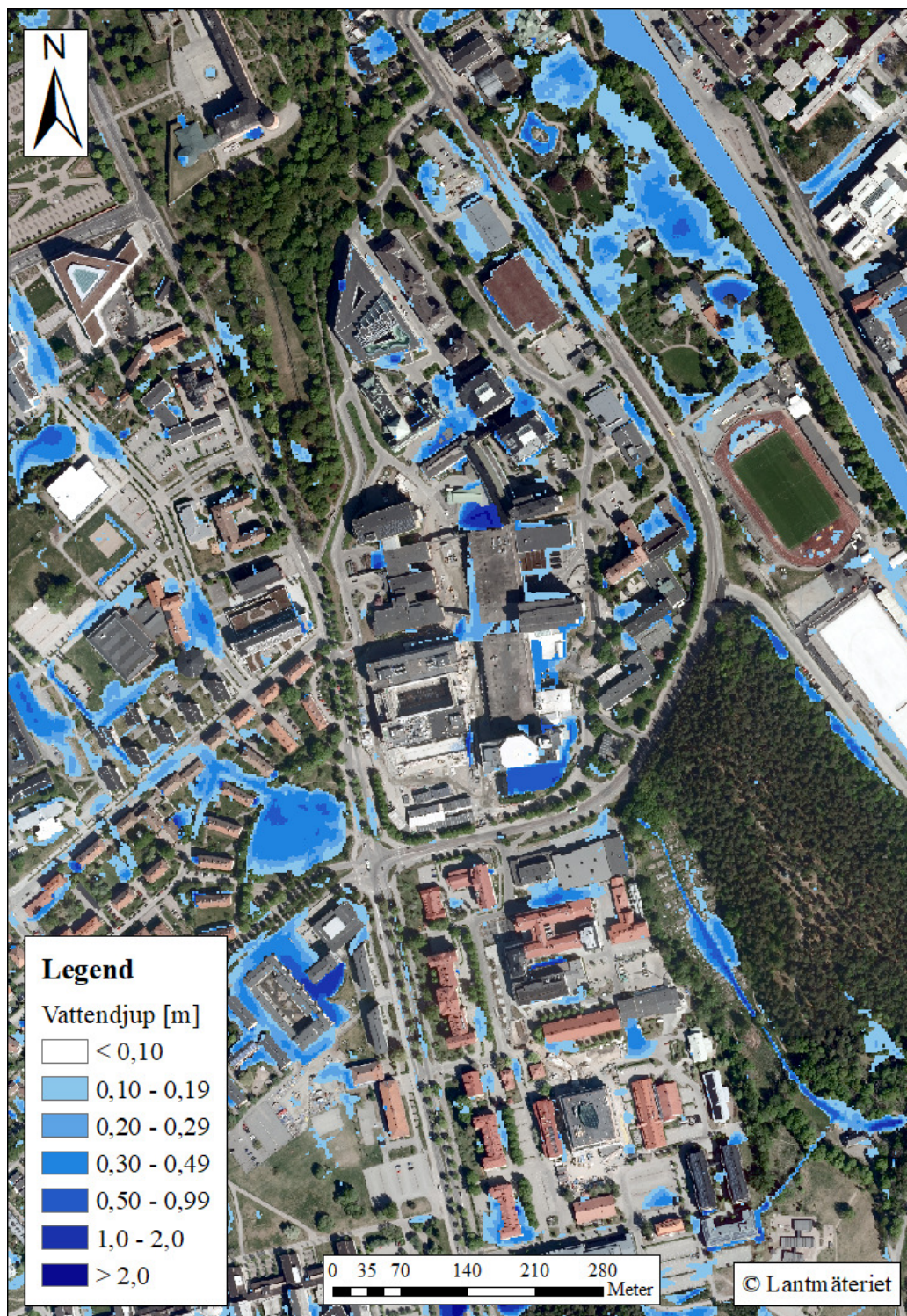
Generellt för känslighetsanalysen studerades kartor med vattendjup, volymbalanssummeringen från MIKE 21, vattendjup och infiltrerad volym i analyspunkterna (se figur 11), slutvolymen i de sju områdena och i hela området samt flödet över tid genom ett par tvärsnitt. Diskussionen utgick från jämförelser mellan simuleringarnas resultat.

## **5 Resultat**

I resultatet visas bland annat kartor med översvämningens utbredning i antingen maxvattendjup eller vattendjup vid simuleringens slut. Maxvattendjup är det största vattendjup varje cell når under en simulering och presenteras för att visa de mesta extrema förhållandena. Vattendjupet vid simuleringens slut presenteras för att visa hur mycket vatten som blir stående efter infiltration och att alla flöden har upphört.

## 5.1 Översvämningens utbredning

Maxvattendjupet från körningen med Blk1 (100-årsregn) visade att det fanns några lågpunkter inne på sjukhusområdet, se figur 13. Några av dessa ligger inom de sju utpekade områdena av Region Uppsala, se figur 12.



**Figur 13:** Maxvattendjupet från körning med blockregn (Blk1). Återkomsttid: 100 år. Varaktighet: 30 minuter. Bakgrundskarta: GSD-Ortofot RGB 0,25 m (2020), © Lantmäteriet.

I figur 14 presenteras översvämningens utbredning vid slutet av simuleringen med Blk1. Där ses det vilka områden som får problem med stående vatten och i jämförelse med figur 13 syns en tydlig skillnad i område 1 och 4.



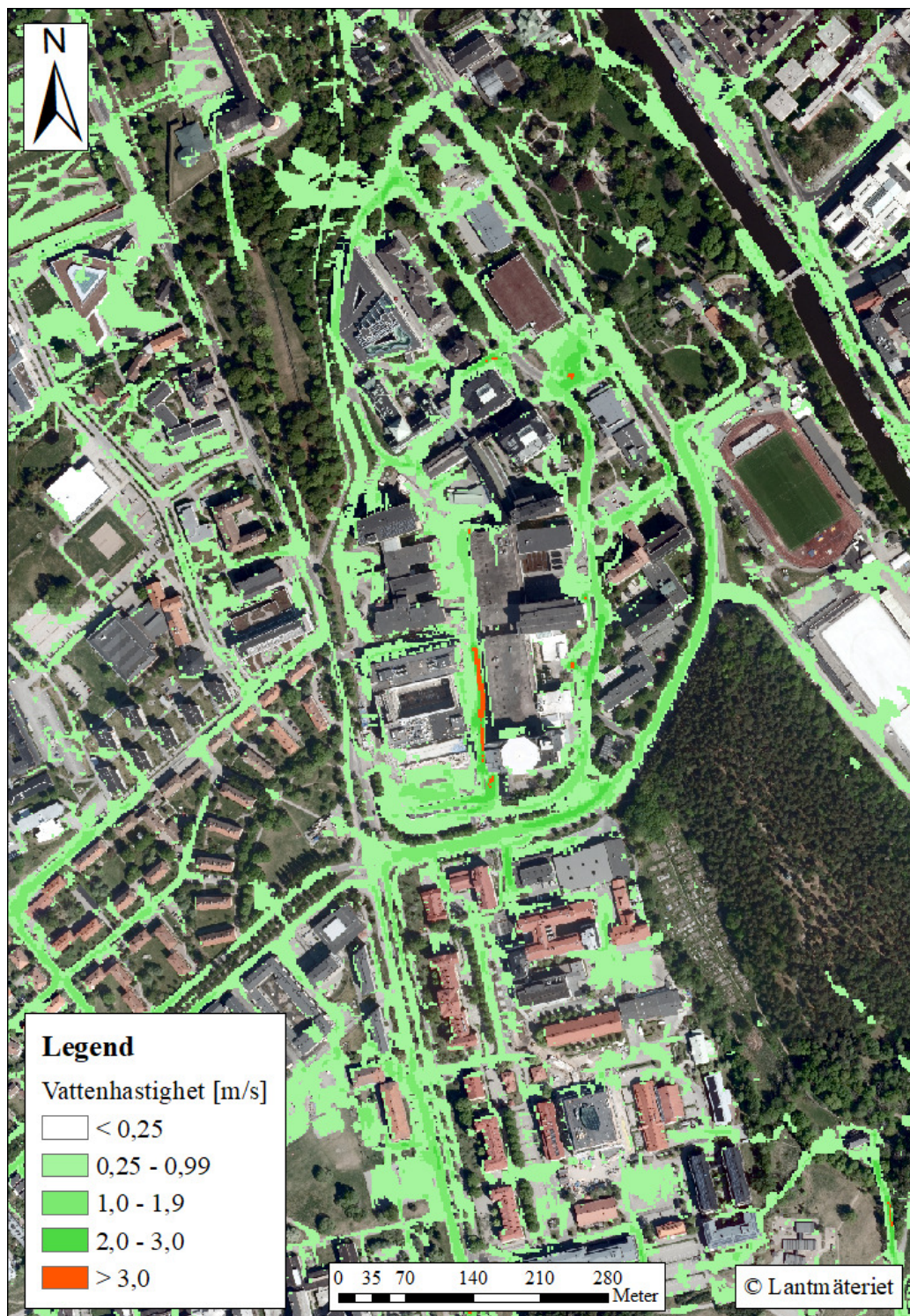
**Figur 14:** Vattendjupet vid simuleringens slut från körning med blockregn (Blk1). Återkomsttid: 100 år. Varaktighet: 30 minuter. Bakgrundskarta: GSD-Ortofoto RGB 0,25 m (2020), © Lantmäteriet.

Vattnet har några tydliga flödesvägar inom området, vilket kan ses i figur 15 som visar en karta med maxvattenflöden från simuleringen med Blk1. En flödesväg går genom område 4, en norr om psykiatrin ner mot område 2 och en tredje in från Sjukhusvägen ner mot område 6. Inget tydligt flöde sker in i det södra sjukhusområdet utan det finns endast ett tydligt utflöde vid område 7 ner mot Sjukhusvägen. Majoriteten av vattnet som flödar längst med Sjukhusvägen hamnar slutligen nere i Stadsparken



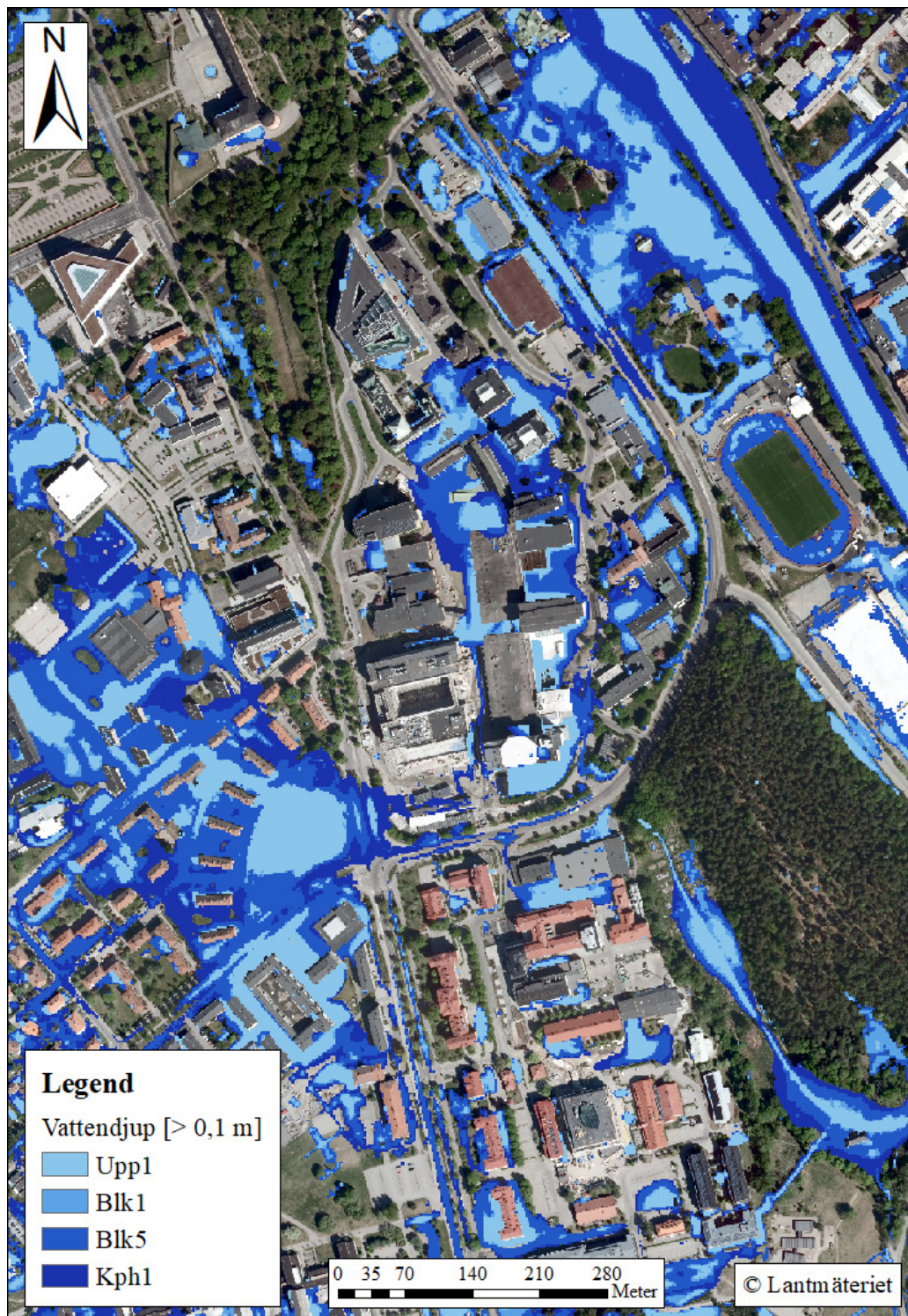
**Figur 15:** Maxvattenflödet från körning med blockregn (Blk1). Återkomsttid: 100 år. Varaktighet: 30 minuter. Bakgrundskarta: GSD-Ortofot RGB 0,25 m (2020), © Lantmäteriet.

I figur 16 presenteras maxvattenhastigheten för Köpenhamnsregnet (Kph1). Här ses det att vattenhastigheterna sällan når upp till 3 m/s. Det enda område som når de högsta vattenhastigheterna är område 4.



**Figur 16:** Maxvattenhastigheten från körning med Köpenhamnsregnet, Kph1. Återkomsttid: 1400 år. Varaktighet: 120 minuter. Bakgrundskarta: GSD-Ortofoto RGB 0,25 m (2020), © Lantmäteriet.

För att se vad skillnaden blir i utbredning av översvämningen vid olika återkomsttider har figur 17 tagits fram. I den figuren syns maxvattendjupet från Uppsalaregnet (Upp1, återkomsttid på 90 år), Blk1 (100 år), Blk5 (500 år) och Köpenhamnsregnet (Kph1, 1400 år). Översvämningen förvärras vid längre återkomsttider, speciellt kring Centralblocket och i Stadsparken.



**Figur 17:** Maxvattendjupet från körningar med Upp1 (90 års återkomsttid), Blk1 (100 år), Blk5 (500 år) och Kph1 (1400 år). Vattendjup större än 0,1 meter visas. Bakgrundskarta: GSD-Ortofoto RGB 0,25 m (2020), © Lantmäteriet.

## 5.2 Åtgärder

### 5.2.1 Barriär kring norra sjukhusområdet

För att se hur simuleringen med barriären kring norr sjukhusområdet (Bar1) påverkar resultatet presenteras maxvattendjupet i figur 18. Där kan det ses att översvämningen inne i område 6 har blivit mindre.



**Figur 18:** Maxvattendjupet från körning med blockregn och barriär (Bar1). Återkomsttid: 100 år. Varaktighet: 30 minuter. Bakgrundskarta: GSD-Ortofot RGB 0,25 m (2020), © Lantmäteriet.

I figur 19 ses maxvattenflödet från Bar1 och den största förändringen är att flödet ner mot område 6 nästan helt har upphört efter att barriären har lagts in.



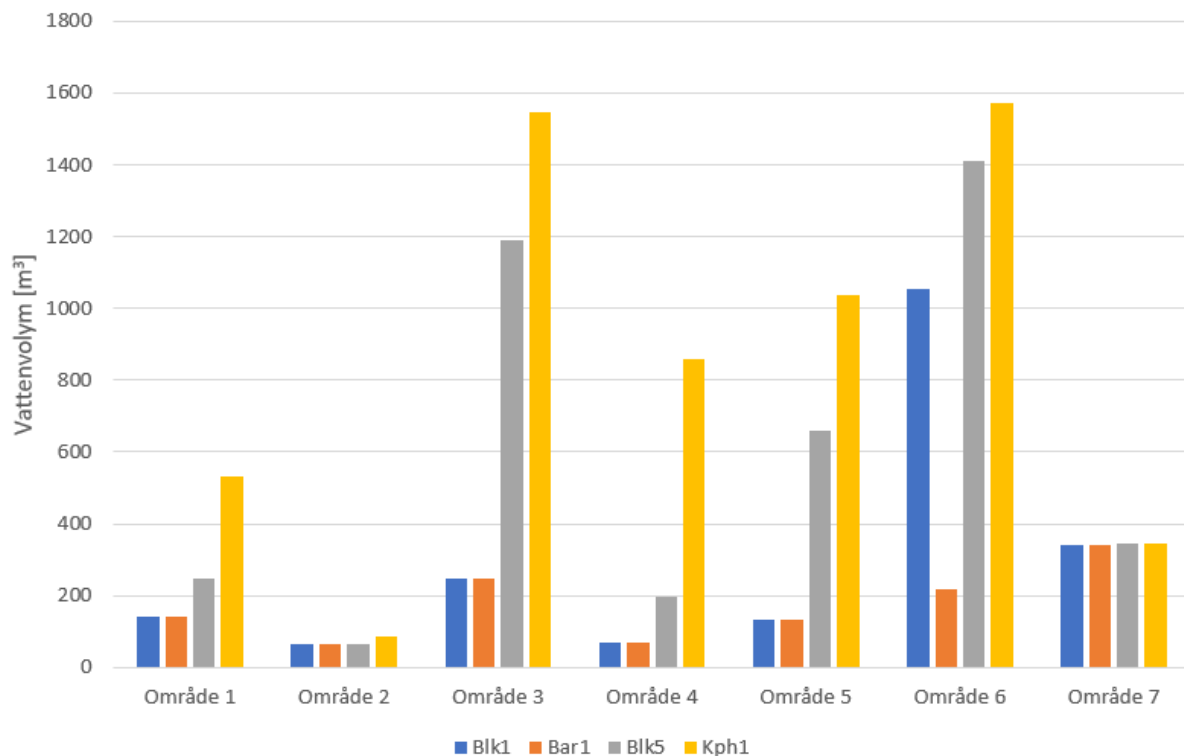
**Figur 19:** Maxvattenflödet från körning med blockregn och barriär (Bar1). Återkomsttid: 100 år. Varaktighet: 30 minuter. Bakgrundskarta: GSD-Ortofot RGB 0,25 m (2020), © Lantmäteriet.

I tabell 8 redovisas den totala volymen som flödat genom tvärsnitten (se figur 12 och tabell 7) före och efter barriären är på plats samt skillnaden i volym. Flödet över tvärsnitten runt det norra sjukhusområdet minskar efter att barriären lagts in, med undantaget av tvärsnitt N.1 där flödet istället ökar. Här ses även det som sågs i föregående figurer att det sker ett minskat flöde ner mot område 6, men att även område 4 får ett minskat flöde. Flödet förbi Studenternas IP (tvärsnitt 1.6) får ett större flöde efter att barriären är på plats. I tabellen är även flöden från taken i anslutning till områdena presenterade och här ses det att en stor andel av flödet till område 3 och 5 kommer från taken.

**Tabell 8:** Skillnaden i vattenflödet in mot områden av intresse före och efter barriär satts in presenterat i totala volymer efter hela simuleringen (fyra timmar). Observera att vissa flöden inte slutat flöda vid slutet av simuleringen.

| Område  | Blk1 [ $m^3$ ] | Bar1 [ $m^3$ ] | Skillnad [ $m^3$ ] | Skillnad [%] |
|---------|----------------|----------------|--------------------|--------------|
| N.1     | 497,5          | 549,4          | 51,9               | 10,4         |
| N.2     | 365,8          | 216,6          | -149,2             | -40,8        |
| N.3     | 94,8           | 66,9           | -27,9              | -29,5        |
| N.4     | 566,3          | 8,0            | -558,3             | -98,6        |
| 1.1     | 287,2          | 285,7          | -1,5               | -0,5         |
| 1.2     | -1915,3        | -1894,1        | 21,2               | -1,1         |
| 1.3     | -15,6          | -41,7          | -26,1              | 166,8        |
| 1.4     | 309,9          | 309,0          | -1,0               | -0,3         |
| 1.5     | 1131,8         | 1092,4         | -39,4              | -3,5         |
| 1.6     | -574,0         | -1378,1        | -804,2             | 140,1        |
| 2.1     | 37,7           | 37,3           | -0,4               | -1,1         |
| 2.1.tak | 14,2           | -              | -                  | -            |
| 2.2     | -17,2          | -17,8          | -0,67              | 3,9          |
| 2.2.tak | 9,0            | -              | -                  | -            |
| 3.1     | 96,3           | 96,3           | -0,0               | -0,0         |
| 3.tak   | 65,0           | -              | -                  | -            |
| 4.1     | -920,4         | -787,4         | 133,0              | -14,4        |
| 4.2     | 160,8          | 155,3          | -5,5               | -3,4         |
| 4.3     | 422,4          | 292,0          | -130,4             | -30,9        |
| 4.tak   | 203,2          | -              | -                  | -            |
| 5.1     | 18,9           | 18,9           | -0,0               | -0,1         |
| 5.tak   | 26,4           | -              | -                  | -            |
| 6.1     | 882,4          | 137,0          | -745,4             | -84,5        |
| 6.tak   | 35,3           | -              | -                  | -            |
| 7.1     | 149,8          | 150,2          | 0,4                | 0,2          |
| 7.2     | 1,7            | 2,9            | 1,2                | 68,6         |
| 7.tak   | 129,6          | -              | -                  | -            |

I figur 20 ses slutvolymen i de sju områdena av intresse efter simuleringar med ett 100-årsregn utan (Blk1) och med barriär (Bar1), ett 500-årsregn (Blk5) samt Köpenhamnsregnet (Kph1) som har en återkomsttid på 1400 år. Generellt leder längre återkomsttid till större slutvolym. Undantaget är område 2 och 7 där ingen större skillnad ses i slutvolymerna. Här ses det igen att område 6 får en mindre slutvolym efter barriären satts in.



**Figur 20:** Slutvolymen i områden av intresse vid simulering med Blk1, Bar1, Blk5 och Kph1.

## 5.2.2 Åtgärder i SCALGO

I det här avsnittet presenteras resultaten från de åtgärder som lades in i SCALGO. Figurerna som tagits fram visar höjdmodellen med översvämningens utbredning vid ett visst regn och för en viss vattendjupsgräns. Med i figurerna är även flödesvägarna där detaljgraden på dessa baseras på storleken av den uppströms bidragande arean.

I figur 21a visas område 2 innan åtgärderna lagts in och stående vatten kan ses på ambulansgaraget infart. I figur 21b ses översvämningen och flödesvägarna i område 2 efter att åtgärderna har lagts in. En av åtgärderna som lagts in är en höjdsättning av marken framför ambulansgaraget som i figur 21a var översvänningsdrabbad. Det har även lagts in en åtgärd i form av ett dike framför den översvänningsdrabbade ytan. Som kan ses i figur 21b så flödar vattnet längst med diket och runt ambulansgaraget och inget stående vatten finns kvar på infarten.



(a) Innan åtgärder inlagda i SCALGO.



(b) Efter åtgärder inlagda i SCALGO.

**Figur 21:** Översvämningen i område 2 innan och efter åtgärder i form av höjdsättning av hårdgjorda ytan framför garaget samt dike på gräsmattan är inlagda i SCALGO. Regnvolym: 55 mm. Flödesdetalj: 600 m<sup>2</sup>. Vattendjupsgräns: 0 cm Kartdata: GSD-Höjddata, grid 2+ (2020), © Lantmäteriet och SCALGO.

Figur 22a visar översvämningen i område 3 innan åtgärderna lagts in i SCALGO. Åtgärderna som sen lades in kan ses som svarta linjer i figur 22b. Åtgärden i norr är en höjdsättning av marken som gör att flödesvägen styrs bort från område 3. Den södra åtgärden är en höjning av markytan för att representera en barriär som leder undan det inkommande vattnet från söder. Det kan ses i figur 22 att översvämningen är mindre efter att åtgärden är inlagd och att flödet ner mot område 3 från norr och söder tar nya vägar.



(a) Innan åtgärder inlagda i SCALGO.



(b) Efter åtgärder inlagda i SCALGO.

**Figur 22:** Översvämningen i område 3 innan och efter åtgärder i form av barriär i söder samt en höjdsättning av vägen i norr är inlagda i SCALGO. Åtgärderna kan ses som svarta linjer i terrängkartan. Regnvolym: 55 mm. Flödesdetalj: 600 m<sup>2</sup>. Vattendjupsgräns: 0 cm Kartdata: GSD-Höjddata, grid 2+ (2020), © Lantmäteriet och SCALGO.

I figur 23 kan översvämningen studeras före och efter att åtgärder lagts in. Åtgärderna ses som två svarta linjer i figur 23b där de båda representerar barriärer inlagda i höjdmodellen. Ena barriären lades längst med Sjukhusvägen likt den som lades in i MIKE 21. Den andra lades i direkt anslutning till område 6. Det kan ses att översvämningen minskar efter att åtgärderna är inlagda och samtidigt förvärras inte översvämningarna i något område nedströms av åtgärderna.



(a) Innan åtgärder inlagda i SCALGO.



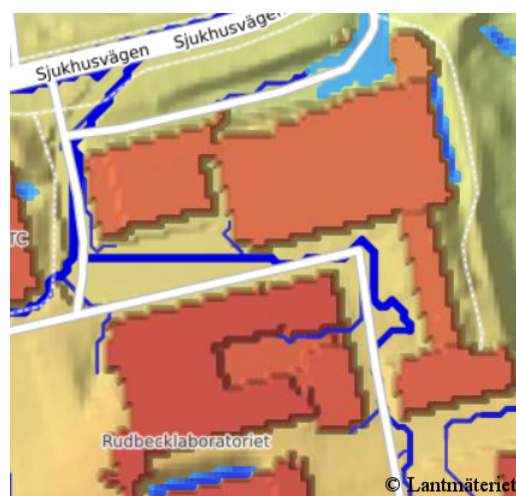
(b) Efter åtgärder inlagda i SCALGO.

**Figur 23:** Översvämningen i område 6 innan och efter åtgärder i form av barriär längst med Sjukhusvägen och längst med Inre sjukhusvägen är inlagda i SCALGO. Åtgärderna kan ses som svarta linjer i terrängkartan. Regnvolym: 55 mm. Flödesdetalj: 600 m<sup>2</sup>. Vattendjupsgräns: 30 cm. Kartdata: GSD-Höjddata, grid 2+ (2020), © Lantmäteriet och SCALGO.

Översvämningen i område 7 före och efter inlagd åtgärd kan ses i figur 24. Åtgärden som lades in var en höjdsättning av marken inne på område 7 så att den sluttar svagt ner mot Sjukhusvägen. I figur 24b ses det att det inte blir något stående vatten i område 7 och att det istället finns en tydlig flödesväg rakt igenom området.



(a) Innan åtgärder inlagda i SCALGO.



(b) Efter åtgärder inlagda i SCALGO.

**Figur 24:** Översvämningen i område 7 innan och efter åtgärder i form av höjdsättning av marken är inlagda i SCALGO. Regnvolym: 55 mm. Flödesdetalj: 600 m<sup>2</sup>. Vattendjupsgräns: 0 cm. Kartdata: GSD-Höjddata, grid 2+ (2020), © Lantmäteriet och SCALGO.

## 5.3 Känslighetsanalys

### 5.3.1 CDS-regn

Maxvattendjupet från körningar med CDS-regn (Cds1) och blockregn med 150 minuters varaktighet (Blk4) respektive 30 minuters varaktighet (Blk1) kan ses i figur 25. CDS-regnet ger en större översvämning än vad blockregnet av samma återkomsttid och varaktighet gör.



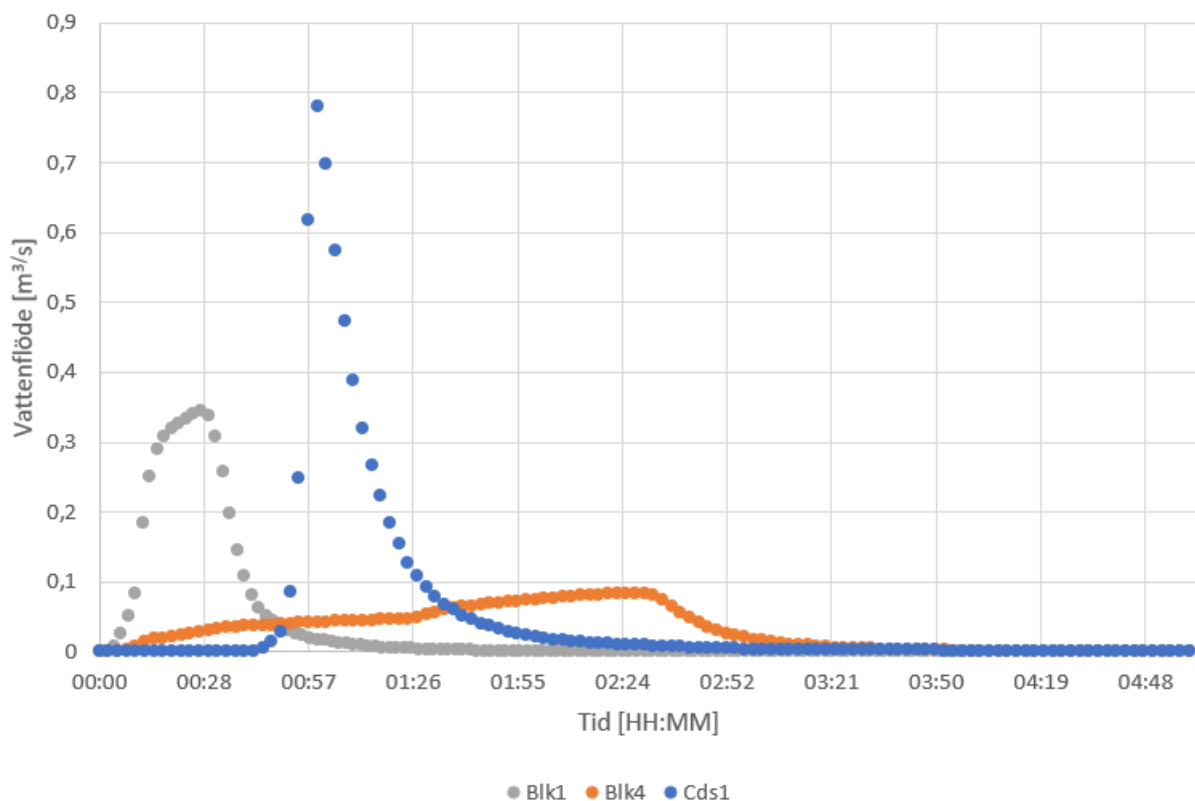
**Figur 25:** Maxvattendjupet från körningar med Blk1, Blk4 och Cds1. Vattendjup större än 0,1 meter visas. Bakgrundskarta: GSD-Ortofoto RGB 0,25 m (2020), © Lantmäteriet.

I tabell 9 ses volymbalanssummeringen från Blk4 och Cds1 samt skillnaden i volymer mellan dessa körningar. Tabellen visar att ungefär lika stor nederbörd har simulerats i körningarna, men att CDS-regnet har en mindre infiltrerad volym och större WLC- och slutvolym.

**Tabell 9:** Volymbalanssummeringen i MIKE 21 från simuleringarna med blockregn (Blk4) och CDS-regn (Cds1) av samma återkomsttid (100 år) och varaktighet (150 minuter). Presenterat i tabellen är: den initiala volymen i modellen innan simuleringens start, nederbördsvolymen, volymen från WLC, den totala inflödesvolymen, den infiltrerade volymen samt volymen som är kvar i modellen vid simuleringens slut.

|              | Blk4 [ $m^3$ ] | Cds1 [ $m^3$ ] | Skillnad [ $m^3$ ] | Skillnad [%] |
|--------------|----------------|----------------|--------------------|--------------|
| Initialt     | 700            | 700            | 0                  | 0            |
| Nederbörd    | 241800         | 252900         | 11100              | 4,6          |
| WLC          | 14750          | 51510          | 36760              | 249,2        |
| Tot. inflöde | 256600         | 304400         | 47860              | 18,7         |
| Infiltrerat  | 148700         | 144300         | -4400              | -3,0         |
| Slutvolym    | 107900         | 160100         | 52260              | 48,5         |

I figur 26 presenteras vattenflödet från Cds1, Blk4 och Blk1 över tid genom tvärsnitt 1.6 (se figur 12 för tvärsnittets placering). Cds1 har en åtta gånger större flödestopp än Blk4 och ungefär dubbel så hög flödestopp som Blk1.



**Figur 26:** Vattenflödet genom tvärsnitt 1.6 över tid vid körningar med Cds1, Blk4 och Blk1. Vattenflödet i  $m^3/s$  på y-axeln och tiden i timmar och minuter på x-axeln.

### 5.3.2 Varaktighet

I figur 27 ses vattendjupet vid slutet av fyra timmars simulering från körningar med blockregn av olika varaktigheter. Utbredningen av översvämningen är 121700 m<sup>2</sup>, 233900 m<sup>2</sup>, 267100 m<sup>2</sup> och 287200 m<sup>2</sup> för Blk2 (varaktighet 10 minuter), Blk1 (30 minuter), Blk3 (60 minuter) respektive Blk4 (150 minuter). Resultaten visar att en längre varaktighet leder till större översvämning.



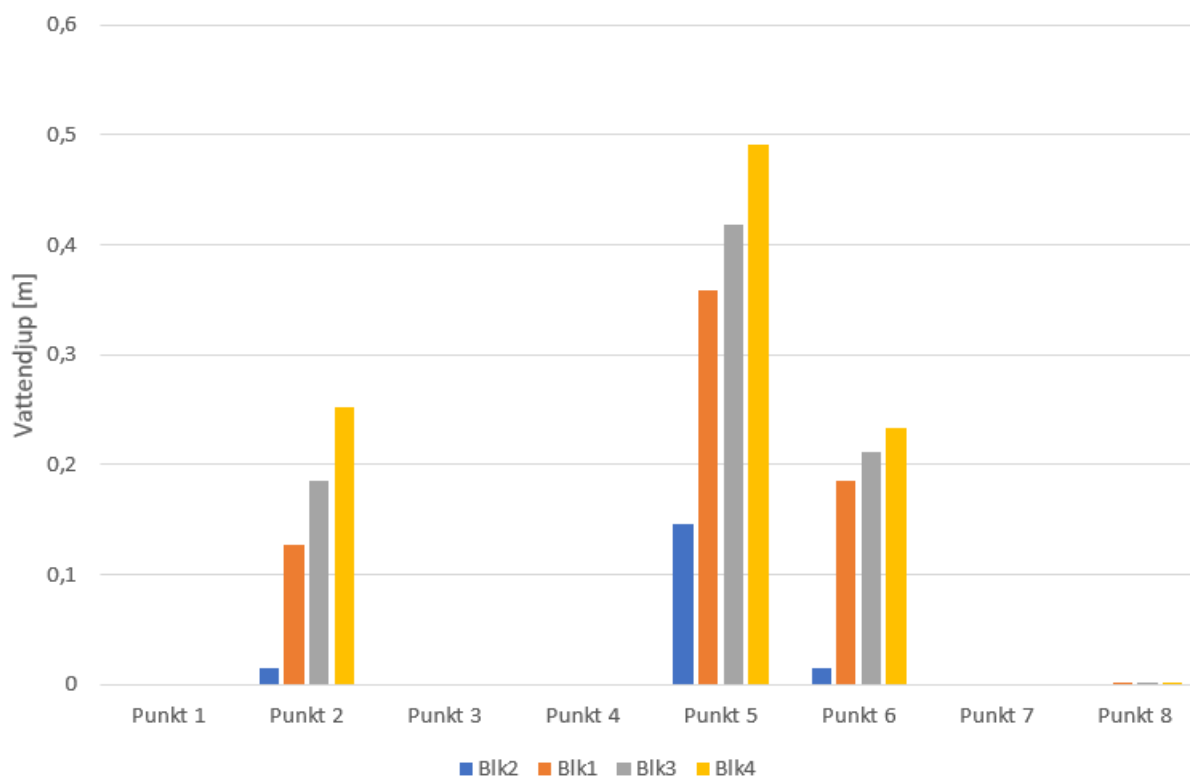
**Figur 27:** Vattendjupet vid slutet av fyra timmars simulering från körningar med olika varaktigheter. Resultat från Blk2 (10 minuters varaktighet), Blk1 (30 minuter), Blk3 (60 minuter) och Blk4 (150 minuter) presenteras i figuren. Vattendjup större än 0,1 meter visas. Bakgrundskarta: GSD-Ortofoto RGB 0,25 m (2020), © Lantmäteriet.

Resultaten från MIKE 21s volymbalanssummering från simuleringarna med varierande varaktigheter kan ses i tabell 10. Den visar att längre varaktighet leder till större slutvolym, men att det inte skiljer så mycket i slutvolym mellan de två längsta varaktigheterna. Observera att Blk4 har en längre simuleringstid än de övriga (sex timmar jämfört med fyra timmar).

**Tabell 10:** Volymbalanssummeringen i MIKE 21 från simuleringarna med olika varaktigheter: Blk2 (10 minuters varaktighet), Blk1 (30 minuter), Blk3 (60 minuter) och Blk4 (150 minuter). Observera att Blk4 har en simuleringstid på sex timmar jämfört med de andras fyra timmar. Presenterat i tabellen är: den initiala volymen i modellen innan simuleringens start, nederbördsvolymen, volymen från WLC, den totala inflödesvolymen, den infiltrerade volymen samt volymen som är kvar i modellen vid simuleringens slut.

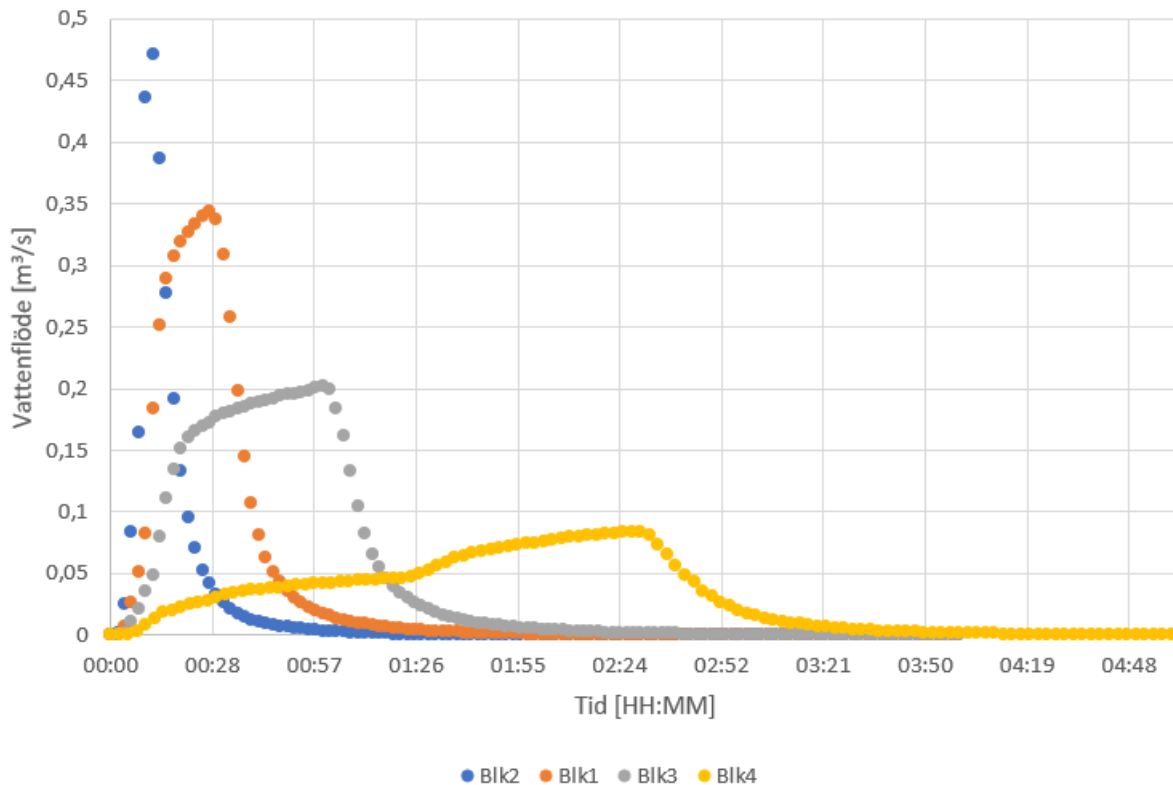
|              | Blk2 [ $m^3$ ] | Blk1 [ $m^3$ ] | Blk3 [ $m^3$ ] | Blk4 [ $m^3$ ] |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Initialt     | 700            | 700            | 700            | 700            |
| Nederbörd    | 82890          | 146500         | 192200         | 241800         |
| WLC          | 13940          | 13760          | 11500          | 14750          |
| Tot. inflöde | 96830          | 160300         | 203700         | 256600         |
| Infiltrerat  | 53540          | 76250          | 101800         | 148700         |
| Slutvolym    | 43990          | 84710          | 102600         | 107900         |

I figur 28 ses vattendjupet efter fyra timmars simulering i de åtta analyspunkterna (analyspunkternas placering kan ses i figur 11). Endast punkt 2, 5, 6 och 8 har stående vatten efter fyra timmars simulering. Figuren visar att simuleringarna med längre varaktighet leder till ett större vattendjup.



**Figur 28:** Vattendjupen i analyspunkterna efter fyra timmars simulering med körningar med olika varaktigheter. Resultatet från Blk2 (10 minuters varaktighet), Blk1 (30 minuter), Blk3 (60 minuter) och Blk4 (150 minuter) presenteras i figuren. Återkomsttid: 100 år.

I figur 29 är vattenflödet från Blk2, Blk1, Blk3 och Blk4 genom tvärsnitt 1.6 plottat över tid. I figuren ses det att längre varaktigheter ger en plattare och mer utdragen flödeskurva.



**Figur 29:** Vattenflödet genom tvärsnitt 1.6 över tid vid körningar med olika varaktigheter. Flödet från simuleringarna med Blk2, Blk1, Blk3 och Blk4 är plottade. Vattenflödet i  $\text{m}^3/\text{s}$  på y-axeln och tiden i timmar och minuter på x-axeln.

### 5.3.3 Avrinningskoefficient

I det här avsnittet är alla resultat baserade på simuleringarna med avrinningskoefficienter och en simulering med infiltrationsmodul som jämförelse. Avrinningskoefficienterna som användes på grönytor var 0,4 för Avr1 och 0,75 för Avr2. Jämförelsen med infiltrationsmodul gjordes på Blk1 som har samma varaktighet (30 minuter) och återkomsttid (100 år) som Avr1 och Avr2.

I figur 30 ses översvämningens utbredning vid simuleringarnas slut. Blk1 och Avr1 har en liknande översvämningens utbredning, men den skiljs åt på grönytor i det norra sjukhusområdet. Avr2 har en större översvämningens utbredning än de andra två simuleringarna. Översvämningens utbredning uttryckt i area är  $233900 \text{ m}^2$ ,  $242000 \text{ m}^2$  och  $308800 \text{ m}^2$  för Blk1, Avr1 respektive Avr2.



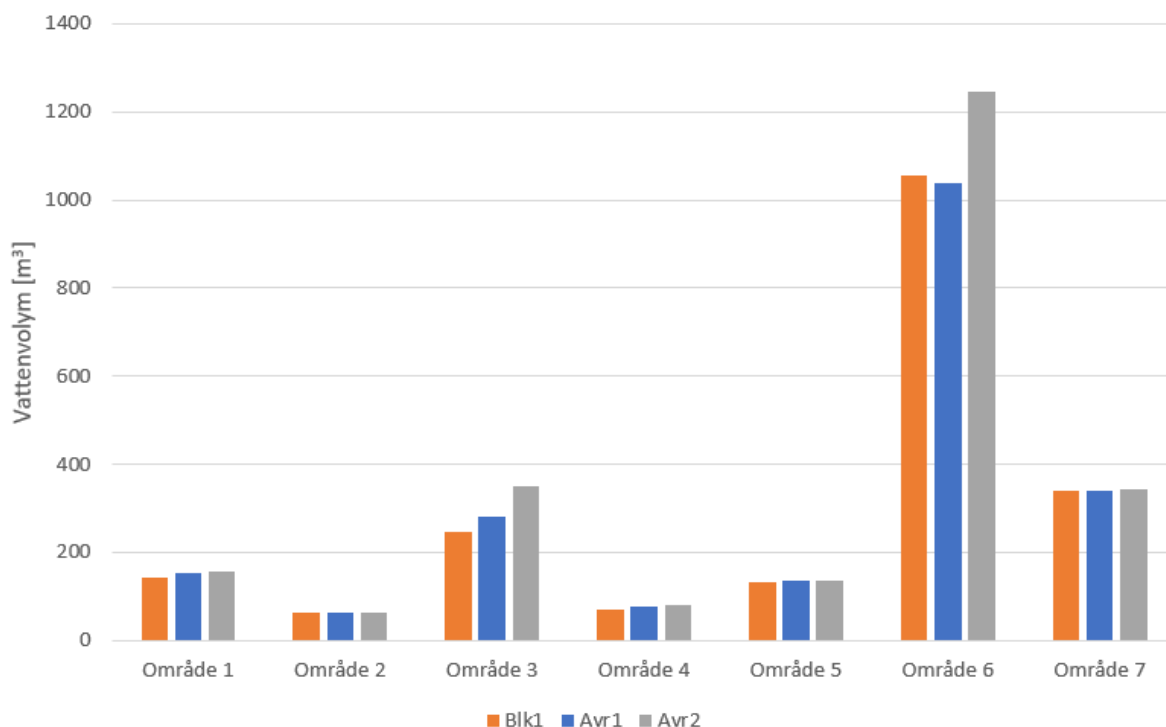
**Figur 30:** Vattendjupet vid simuleringens slut från körning med Blk1, Avr1 samt Avr2. Vattendjup större än 0,1 meter visas. Återkomsttid: 100-år. Varaktighet: 30 minuter. Bakgrundskarta: GSD-Ortofot RGB 0,25 m (2020), © Lantmäteriet.

I tabell 11 är volymbalanssummeringen från simuleringarna presenterade. I tabellen ses det att WLC är många gånger mindre för Avr1 och Avr2, slutvolymen för Blk1 och Avr1 är snarlik och Avr2 har en slutvolym som är 46% större än den för Blk1.

**Tabell 11:** Volymbalanssummeringen i MIKE 21 från simuleringarna Blk1 (infiltrationsmodul), Avr1 (avrinningskoefficient 0,4) och Avr2 (avrinningskoefficient 0,75). Presenterat i tabellen är: den initiala volymen i modellen innan simuleringens start, nederbördsvolymen, volymen från WLC, den totala inflödesvolymen, den infiltrerade volymen samt volymen som är kvar i modellen vid simuleringens slut.

|              | Blk1 [ $m^3$ ] | Avr1 [ $m^3$ ] | Avr2 [ $m^3$ ] |
|--------------|----------------|----------------|----------------|
| Initialt     | 700            | 700            | 700            |
| Nederbörd    | 146500         | 82440          | 119800         |
| WLC          | 13760          | 2207           | 2515           |
| Tot. inflöde | 160300         | 84650          | 122300         |
| Infiltrerat  | 76250          | 0              | 0              |
| Slutvolym    | 84010          | 85350          | 123000         |

I figur 31 visas slutvolymerna i områdena utpekade av Region Uppsala. Här följs Blk1 och Avr1 åt väl och det enda område Blk1 har en större slutvolym än Avr1 är i område 6. Generellt så har Avr2 en större slutvolym än de andra två simuleringarna.



**Figur 31:** Slutvolymen i områden av intresse när avrinningskoefficient har använts och Blk1 som jämförelse.

### 5.3.4 Infiltrationshastighet

I det här avsnittet är samtliga resultat från simuleringarna Inf3 (infiltrationshastighet 360 mm/h), Blk1 (36 mm/h), Inf1 (3,6 mm/h) och Inf2 (0,36 mm/h). Utbredningen av översvämningen vid simuleringarnas slut kan ses i figur 32 och det ses att en högre infiltrationshastighet leder till mindre översvämning. Översvämningens utbredning uttryckt i area är 195900 m<sup>2</sup>, 237900 m<sup>2</sup>, 330200 m<sup>2</sup> och 347600 m<sup>2</sup> för Inf3, Blk1, Inf1 respektive Inf2.



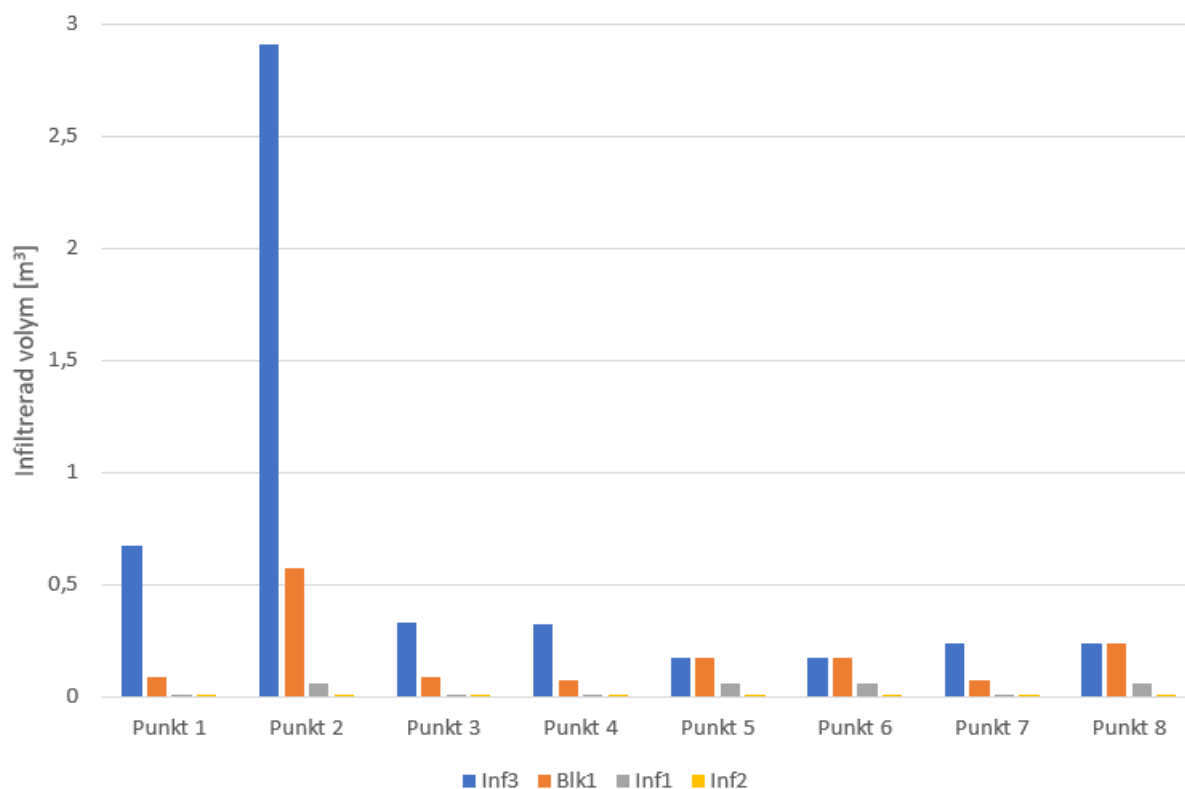
**Figur 32:** Vattendjupet vid simuleringens slut från körningar med olika infiltrationshastigheter. Resultat från Inf3 (infiltrationshastighet 360 mm/h), Blk1 (36 mm/h), Inf1 (3,6 mm/h) samt Inf2 (0,36 mm/h) presenteras i figuren. Vattendjup större än 0,1 meter visas. Återkomsttid: 100 år. Varaktighet: 30 minuter. Bakgrundskarta: GSD-Ortofot RGB 0,25 m (2020), © Lantmäteriet.

Tabell 12 visar volymbalanssummeringen från simuleringarna. I tabellen kan det avläsas att Inf3 har ungefär två gånger så stor simulerad volym som de övriga på grund av hög WLC. Trots detta har den ändå minst slutvolym. I den totala infiltrerade volymen är det ungefär en tiopotens skillnad i volym mellan Inf1 och Inf2. Mellan Blk1 och Inf1 är skillnaden mindre än en tiopotens och mellan Inf3 och Blk1 ännu mindre.

**Tabell 12:** Volymbalanssummeringen i MIKE 21 från simuleringarna med olika infiltrationshastigheter: Inf3 (infiltrationshastighet 360 mm/h), Blk1 (36 mm/h), Inf1 (3,6 mm/h) samt Inf2 (0,36 mm/h). Presenterat i tabellen är: den initiala volymen i modellen innan simuleringens start, nederbördsvolymen, volymen från WLC, den totala inflödesvolymen, den infiltrerade volymen samt volymen som är kvar i modellen vid simuleringens slut.

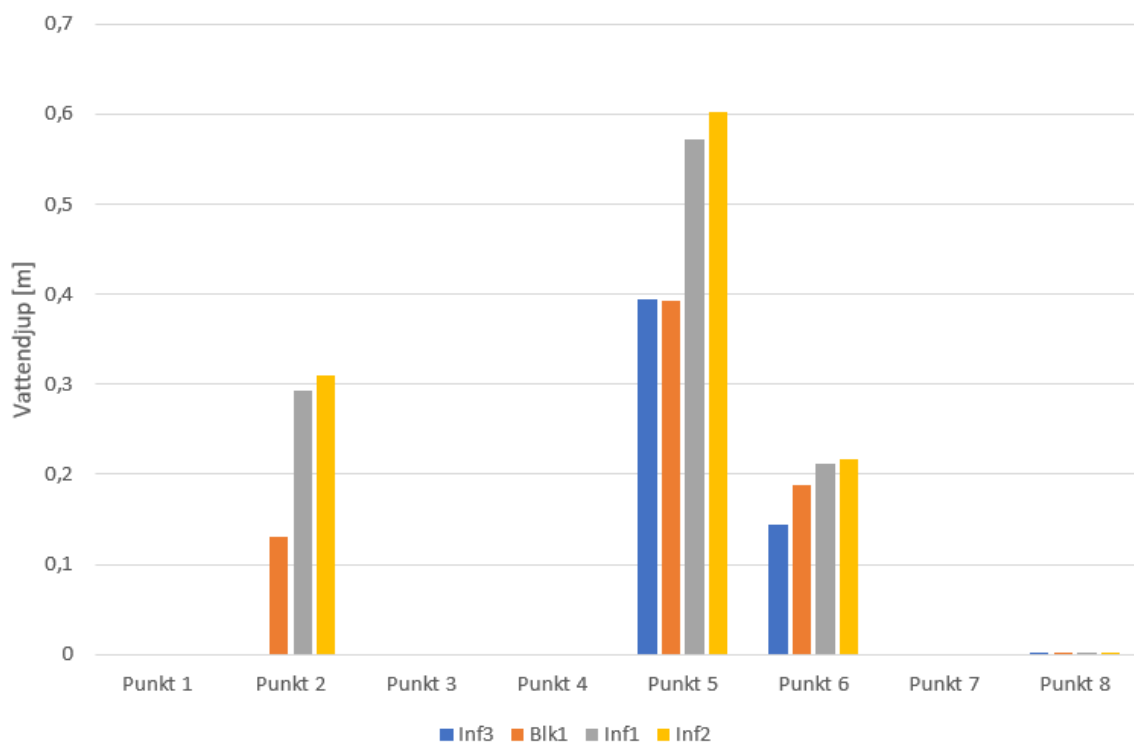
|              | Inf3 [ $m^3$ ] | Blk1 [ $m^3$ ] | Inf1 [ $m^3$ ] | Inf2 [ $m^3$ ] |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Initialt     | 700            | 700            | 700            | 700            |
| Nederbörd    | 146500         | 146500         | 146500         | 146500         |
| WLC          | 194000         | 14480          | 6920           | 5601           |
| Tot. inflöde | 340500         | 160980         | 153420         | 152100         |
| Infiltrerat  | 272200         | 74640          | 13980          | 1551           |
| Slutvolym    | 69000          | 87040          | 140200         | 151200         |

I figur 33 ses den totala infiltrerade volymen vid slutet av simuleringarna i analyspunkterna. I punkt 5, 6 och 8 har i stort sätt samma volym infiltrerat för Inf3 och Blk1. I punkt 1, 2, 3 och 4 ses en avtagande infiltrationsvolym när infiltrationshastigheten sjunker.



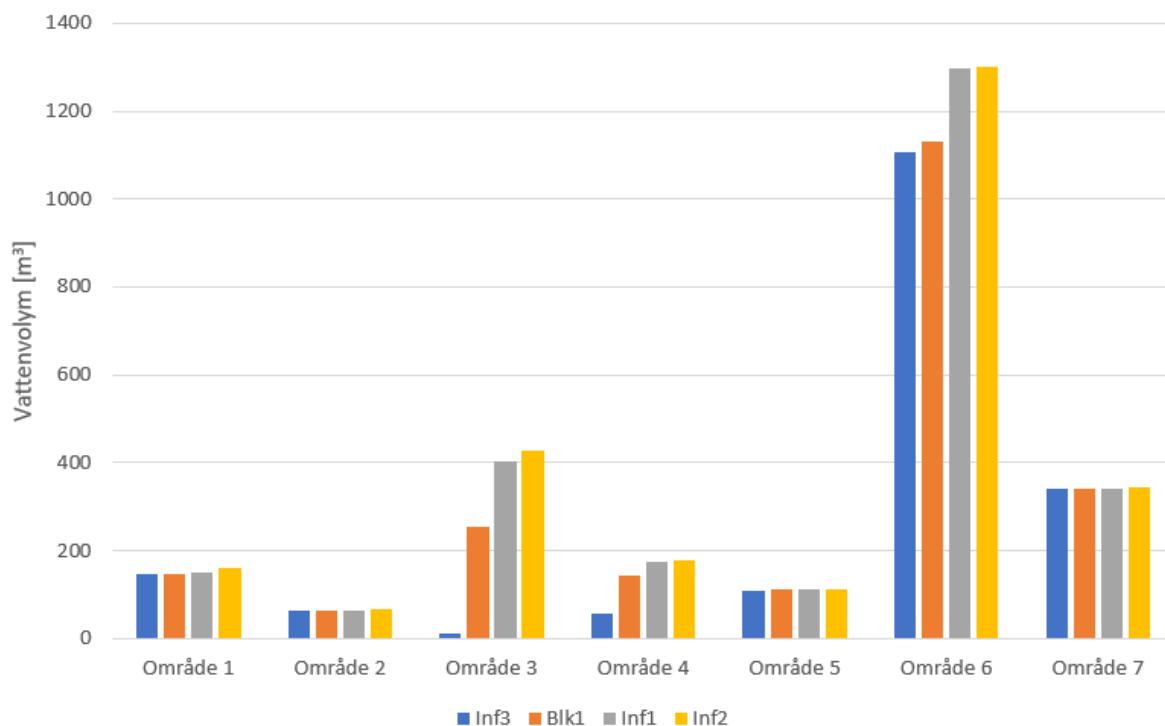
**Figur 33:** Den totala infiltrerade volymen i analyspunkterna vid slutet av simuleringarna Inf3, Blk1, Inf1 och Inf2. Resultat från Inf3 (infiltrationshastighet 360 mm/h), Blk1 (36 mm/h), Inf1 (3,6 mm/h) samt Inf2 (0,36 mm/h) presenteras i figuren.

Figur 34 visar vattendjupet vid slutet av simuleringarna i analyspunkterna. Endast punkt 2, 5, 6 och 8 visar något vattendjup och det kan ses att vattendjupet blir generellt högre vid lägre infiltrationshastigheter.



**Figur 34:** Vattendjupen i analyspunkterna vid slutet av simuleringarna Inf3, Blk1, Inf1 och Inf2. Resultat från Inf3 (infiltrationshastighet 360 mm/h), Blk1 (36 mm/h), Inf1 (3,6 mm/h) samt Inf2 (0,36 mm/h) presenteras i figuren.

I figur 35 är slutvolymen presenterad för samtliga områden utpekade av Region Uppsala. I område 3, 4 och 6 ses en ökande slutvolym när infiltrationshastigheten blir lägre. I de övriga områdena ses det ingen större skillnad mellan simuleringarna.



**Figur 35:** Slutvolymen i områdena utpekade av Region Uppsala när olika infiltrationshastigheter använts i simuleringen. Resultat från Inf3 (infiltrationshastighet 360 mm/h), Blk1 (36 mm/h), Inf1 (3,6 mm/h) samt Inf2 (0,36 mm/h) presenteras i figuren.

## 6 Diskussion

### 6.1 Åtgärder

På grund av att det är tidskrävande att köra simuleringar har endast en simulering körts med en stor åtgärd inlagd i form av en barriär som förväntades minska översvämningarna i hela norra sjukhusområdet. För övriga åtgärder diskuteras de utifrån flödesvägarna, höjdsättningen inne på och runt områdena. En del av åtgärderna har testats i SCALGO.

Åtgärden som lades in i MIKE 21 har endast testats med ett regn så jämförelsen kan bara göras med en annan simulering utan åtgärd (Blk1). Det kan antas att den procentuella skillnaden i flödet som barriären åstadkommer är liknande för regn med andra återkomsttider och varaktigheter.

I följande avsnitt diskuteras översvämningen och eventuella åtgärdsförslag för vardera område.

#### 6.1.1 Område 1

I figur 15 syns det tydligt att Sjukhusvägen är en stor flödesväg för vattnet vid skyfall, både i söder- och norrgående riktning. Trots detta blir det inte mycket stående vatten utan det mesta flödar vidare ner mot Stadsparken, se figur 14. Dock ses det i figur 17 och 20 att översvämningar vid riktigt stora skyfall börjar expandera från Stadsparken upp mot Sjukhusvägen.

Som förväntat är tvärsnitten 1.3 och 1.6 de flödesvägar som är mest påverkade av barriären, se tabell 8. Dessa får ett ökat flöde eftersom en stor vattenmassa som annars skulle hamna inne på norra sjukhusområdet leds vidare längst med Sjukhusvägen. Tvärsnitt 1.3 är flödet längst med Sjukhusvägen vidare ner mot Stadsparken och tvärsnitt 1.6 är en flödesväg som leds ner förbi Studenternas IP mot Stadsparken, se figur 15. En något ökad utbredning av översvämningen kan därför förväntas i Stadsparken till följd av implementering av barriären.

Angående framkomligheten på Sjukhusvägen så kan det under regnets varaktighet och en stund efter vara höga flöden, se figur 15. Resultaten visar dock att det inte är långvarande utan att nästan allt vatten som kommer in flödar vidare ner mot Stadsparken, se tabell 8. Det vatten som blir stående är inte så stora volymer att det kan tänkas påverka framkomligheten, se figur 14 och 20. Enligt teorin i avsnitt 2.5.3 kan det tänkas att de svenska ambulanserna ska klara vattennivåer upp till 0,4 meter (beroende på hur högt över marken de går) och vattenhastigheter upp till 3 m/s. Inga vattenhastigheter blir så höga under det mest extrema simulerade regnet, se figur 16. I figur 13 som visar maxdjupet på vattnet under hela simuleringen syns det att nivån aldrig når upp till 0,3 meter och därmed inte i närheten av 0,4 meter. Framkomligheten för ambulanserna längst med Sjukhusvägen kan därför antas vara säker vid ett skyfall. Det här antagandet kan göras för resten av sjukhusområdet eftersom det endast är ett fåtal ställen där vattenhastigheterna når 3 m/s.

Som kan ses i tabell 8 på tvärsnitt 1.2 och 1.6 är det stora volymer som flödar ner mot Stadsparken vid ett skyfall. Dessa värden kan förväntas vara mycket större vid ett större skyfall än det som använts för att ge resultaten i denna tabell. Stadsparken och Fyrisån är dock ett perfekt ställe att leda undan vatten till eftersom det är låg risk för skador och störningar. Dessutom är Stadsparken en enda stor grönyta där vatten tillfälligt kan magasineras och sakta infiltreras. Vid ett riktigt stort skyfall kan dock vissa erosionsskador ske på marken och framkomligheten för cyklister och gångtrafikanter kan påverkas. För att snabbt återställa framkomligheten kan bortpumpning behöva göras. Pumpningen behöver dock inte bli så lång eftersom Fyrisån ligger

i närheten. Huruvida Studenternas IP klarar av de stora vattenmängderna behöver dock utredas. Ett alternativ kan vara att leda vatten ut på fotbollsplanerna för temporär magasinering.

Sjukhusvägen är en bra transportväg för vattnet och har en naturlig lågpunkt som mynnar ut i Stadsparken som i sin tur är en bra ändstation för vattnet. Inga förändringar eller åtgärder behöver utföras på område 1.

### **6.1.2 Område 2**

I norra änden av den västra delen av område 2 (tvärsnitt 2.1) sker det ett svagt utflöde av vatten, men även ett visst inflöde vid de höga flödena. På grund av utflödet blir det inte allt för stora volymer stående vatten, men det är ändå i den västra delen majoriteten av volymen blir kvar, se figur 14 och 20.

En lösning på det stående vattnet skulle vara en höjdsättning av den hårdgjorda ytan framför byggnaden med sluttningar mot norr och söder vilket resulterar i att vatten leds vidare ner mot Sjukhusvägen. Det skulle även förhindra att vatten strömmar in från norr. Dock kommer den största andelen av vattnet in från gräsmattan i väst ( $95 \text{ m}^3$  vid ett 100-årsregn). Gräsmattan har i dagsläget inga topografiska hinder för vattnet utan den sluttar rakt ner mot område 2 och bildar närmast en skål framför byggnaden för vatten att ansamlas i. Som komplement till den ovannämnda åtgärden kan ett dike anläggas i den här gräsmattan. Med rätt lutning kan vattnet ledas söderut förbi område 2 och ner mot Sjukhusvägen. Detta skulle förhindra en stor andel av vattnet att ta sig in på området och det skulle samtidigt kunna bromsa upp flödesförloppet och viss infiltration skulle kunna ske i diket. Se figur 21 för att se hur dessa åtgärder gör skillnad på översvämningen efter att de är inlagda i SCALGO. Som kan ses blir området framför garaget fritt från stående vatten och vattnet flödar förbi söder om område 2 mot Sjukhusvägen. Linjerna som drogs i SCALGO för att lägga in åtgärderna har dolts här för att tydligare kunna se höjdsättningen i området.

För det östra området (tvärsnitt 2.2) sker ett inflöde i norr och utflöde i öster mot Sjukhusvägen. Nettoflödet är ett utflöde och det lämnar alltså mer vatten än vad det tillkommer. Det finns inga problem med stående vatten här och inga åtgärder behövs.

Volymerna som tillkommer från taken i simuleringarna är relativt små och anses vara verklighetstroga. De påverkar heller inte resultatet nämnvärt. Det sker ett något minskat flöde i närheten av område 2 till följd av barriären som ses i de mindre flödena genom tvärsnitt 1.1 (Sjukhusvägen från norr) och 1.5 (norra delen av norra sjukhusområdet), se tabell 8. Flödena är dock i stort sett oförändrade för område 2. Slutvolymen påverkas inte speciellt av kraftigare skyfall, se figur 20.

### **6.1.3 Område 3**

Om figur 13 och 14 jämförs syns ingen större förändring i vattenståndet vid slutet av simuleringen i område 3. Det kan inte förklaras av att det fortfarande finns ett tillflöde av vatten eftersom samtliga flöden har stannat av vid slutet av simuleringen. Det finns även relativt gott om grönytor för vattnet att infiltrera på. Det kan snarare förklaras av att det helt enkelt är stora volymer som ansamlas här (figur 20) vilket gör att det tar lång tid för allt vatten att infiltrera.

Vid ett 100-årsregn kan vattendjupet nå över 0,4 meter vilket enligt avsnitt 2.5.3 är den högsta vattennivån ambulanserna klarar av, se figur 13. Därför kan ambulansernas framkomlighet vara begränsad under de mest intensiva perioderna av ett skyfall. Djupet kan tänkas förvärras vid kraftigare skyfall.

Det finns ingen skillnad i volymer vatten som flödar till området efter barriären satts in. Det är förväntat eftersom flödet till det här området nästan enbart verkar bestå av vatten som faller inne på sjukhusområdet. Det vatten som flödar längst med Inre sjukhusvägen strax öster om området flödar vidare ner mot Sjukhusvägen istället för att flöda ner mot område 3.

Det är förvånansvärt stora volymer som hamnar i det här området med tanke på att de större flödesvägarna går förbi området. Varför en sådan stor volym ändå hamnar i det här området kan förklaras av den stora andelen som kommer från de omgivande taken. Hela 40 % av inflödet kommer från dessa och beror av den stora takytan på de kringliggande husen och att de lutar ner mot område 3. Det här är även ett av de områden som påverkas hårt av regn med längre återkomsttid, se figur 17 och 20.

Trots takens bidrag finns det ändå ett stort tillflöde av vatten vid ett skyfall och lämpliga åtgärder bör tas om ytan ska hållas fri från översvämning. Det mest effektiva skulle vara en höjdsättning av marken inne på område 3 så att inga lågpunkter finns och inget vatten kan ansamlas. Detta är dock en rätt omfattande åtgärd och huruvida det är möjligt är en annan fråga. Istället har två andra åtgärder testats i SCALGO för att se hur de påverkar översvämningen, se figur 22b. Det som lades in var en barriär längst med gräsytan i söder för att styra om vattnet mot Sjukhusvägen samt en höjdsättning av vägen i norr så denna lutar bort från nerfarten till område 3. Dessa åtgärder får inte bort allt vatten inne på område 3, men en klar minskning kan ses. Den volym som fortfarande finns på området kan till stor del komma från taken.

#### **6.1.4 Område 4**

Område 4 har inga större lågpunkter där vatten kan ansamlas, det mesta av vattnet kommer söderifrån och flödar rakt igenom ut i norr. Vattnet som kommer utifrån sjukhusområdet och når det här området är det som flödar genom tvärsnitt N.3. Som kan ses i tabell 8 så påverkas flödet mot område 4 av barriären, men mer än förväntat. Området får ungefär 136 m<sup>3</sup> mindre vatten men flödet över N.3 är bara 28 m<sup>3</sup> mindre. Detta kan bero på att flödet över N.3 utan barriären ändrar flödesriktningarna på vattnet som skapas inne på området och styr det ner mot område 4. Med barriären på plats kan vattnet som skapas på t.ex. parkeringen strax söder om J-huset följa dess naturliga flödesväg längst med vägen förbi område 6.

Område 4 är väldigt stort till arean vilket leder till att mycket vatten skapas inne på området och förklarar skillnaden i inflöde och utflöde i beräkningarna. Det är även omgiven av mycket takyta som gör att flödet från taken är relativt stort. Nästan all volym från taken kommer från de västra taken vilket är logiskt då de följer den underliggande topografin och sluttar rakt ner mot område 4.

Det blir knappt något stående vatten i det här området vid ett 100-årsregn, se figur 20. Men i figur 20 ses det att område 4 får mycket stående vatten vid ett regn i storlek med Köpenhamnsregnet. Det ses i figur 17 att det är översvämningen i lågpunkten nedströms område 4 som sprider sig upp vid större regn. Problem med stående vatten i område 4 kan uppstå om inte volymerna som flödar igenom området tas om hand.

Det här området är det enda som får vattenhastigheter som överskrider 3 m/s och kan alltså påverka ambulansernas framkomlighet genom området, se figur 16. Värt att notera är att det är det mest extrema regnet som simulerats för att studera vattenhastigheterna och därför anses det vara väldigt sällsynt att dessa hastigheter kan uppnås.

Eftersom den största andelen av vattnet som flödar igenom område 4 kommer inifrån sjukhusområdet kan barriären som var inlagd i MIKE 21 kombineras med någon lokal lösning. Parkeringen söder om J-huset är en stor hårdgjord yta som kan göras om till en genomsläpplig yta för att minska flödet från parkeringen. Innan bör det dock utföras en utredning av renhetsgraden på vattnet som flödar på parkeringen. Parkeringar brukar ha stora mängder olja och bensin från parkerade bilar. Om vattnet innehåller dessa föroreningar och perkolerar ner i den underliggande rullstensåsen kan det komma att påverka Uppsalas dricksvatten (Gustafsson et al. 2018).

I dagsläget är parkeringen omgiven av några centimeter höga rännstenar som på vissa ställen har öppningar för att släppa ut vatten. Om kanterna höjs och kontrollerbara utsläppsventiler installeras kan parkeringen användas som ett temporärt magasin. Ännu bättre vore om parkeringen kunde sänkas ner för att då kunna samla upp en större mängd vatten för magasinering. Parkeringen är ca 300 m<sup>2</sup> stor och kan till exempel magasinera 150 m<sup>3</sup> om den sänks ner 0,5 meter.

De nyanlagda grönytorna som finns kring parkeringen är omringade av rännstenar och deras förmåga att bromsa upp flödet blir därför obefintligt. Om rännstenarna tas bort och ytorna sänks ner för att bilda grunda diken skulle vatten kunna flöda ner i dessa och bromsas upp.

#### **6.1.5 Område 5**

Område 5 har ett relativt litet inflöde och den största andelen (ca 60 %) kommer från taken, se tabell 8. Detta beror på att det är ett litet tvärsnitt (5.1) där vattnet strömmar in längst med marken jämfört med tvärsnittet som uppgör takens inflöde. Dessutom har huset som omringar område 5 en väldigt stor takarea.

Inflödet påverkas inte av barriären (se figur 20) och det är alltså troligt att volymerna skapas inne på området. Skillnaden i utbredningen av översvämningen mellan figur 13 och 14 ser ut att vara obefintlig och beror på att det inte finns några grönytor på området för vattnet att infiltrera genom. Omständigheterna vid ett skyfall kan förmildras genom att anlägga grönytor i området.

Eftersom vattnet tycks ansamlas längst med husfasaden kan även en liten volym ställa till stora problem. Vattnet kan lätt tränga sig in i öppningar och behöver därför ledas bort från fasaden. En höjdsättning i anslutning till byggnaden skulle lösa det problemet. Observera dock att vid större regn än ett 100-årsregn så ökar volymerna markant i det här området (se figur 17 och 20) och då kan en mer drastisk höjdsättning behövas.

#### **6.1.6 Område 6**

Ett stort inflöde sker ner mot område 6, se figur 15. Vattennivån ligger som mest mellan 0,3 och 0,5 meter (figur 14) och ingen större skillnad kan ses efter simuleringens slut (figur 14). Vattnet ligger även mot fasaden och det finns därför en risk för läckage in i byggnaden. Till följd av dessa konstateranden kan område 6 anses vara ett särskilt utsatt område för översvämning.

Hela 84 % av inflödet minskar när barriären är på plats (tabell 8) och volymen som är kvar efter hela simuleringen är 83% mindre (figur 20). Det här kan även ses i figur 19 där det stora flödet har avtagit och i figur 18 syns hur mycket mindre översvämningens utbredning och vattennivå är. Nästan allt flöde (96% före respektive 88% efter barriären) kommer in från öster via gången längst med byggnaden. Den här flödesvägen kan även ses i både figur 15 och 19 där vattnet tycks flöda mot norr för att sedan göra en u-sväng ner mot område 6. En höjdsättning längst med vägen för att behålla vattnet i norrgående riktning skulle minska flödet in mot område 6 ytterligare, se figur 23. När åtgärden tillsammans med barriären runt norra sjukhusområdet är inlagda i SCALGO syns en liten skillnad i översvämningen i område 6. Den flödesväg som kommer in från norr i figur 23a fortsätter längst med Inre sjukhusvägen i figur 23b. Det kan inte ses någon särskilt förvärrad översvämning i området nedströms område 6 efter att åtgärden är inlagd.

Barriärerna som är inlagda i MIKE 21 och SCALGO ligger längst med gräsytor. Ett alternativ kan därför vara att anlägga impermeabla jordvallar längst med dessa gräsytor som skulle fungera som barriärer. Det är viktigt att poängtera att barriären i MIKE 21 sträcker sig över infarten som ligger i närheten av område 6 och resultaten visar alltså vad som skulle ske när en barriär även sträcker sig över denna infart. Det kan vara krångligt att upprätta en barriär över infarten, men det är ett stort inströmningsområde så någon form av höjdsättning skulle ändå vara relevant att göra. En ny simulering utan barriär över infarten kan göras för att se hur mycket vatten som skulle strömma in utan en höjdsättning av infarten.

### **6.1.7 Område 7**

Område 7 är det enda område som ligger i det södra sjukhusområdet och bör då av förklarliga skäl inte påverkas av barriären. Det går dock att utläsa i tabell 8 att flödet genom tvärsnitt 7.2 påverkas något av barriären, men det är väldigt små volymer det rör sig om.

Slutvolymen är relativt konstant i det här området oberoende av regnets storlek, se figur 20. Det beror på att området bara kan rymma en viss volym vatten innan vattennivån blir så hög att den når över höjdpunkten på tvärsnitt 7.2 och vatten börjar strömma ut den vägen. Här skulle en potentiell åtgärd för att undvika översvämning vara att sänka marknivån vid tvärsnitt 7.2 och samtidigt höja marknivån inne på området för att bilda en tydlig genomströmning för vattnet ner mot Sjukhusvägen. Detta testades i SCALGO och resultatet kan ses i figur 24 där inget vatten ansamlas efter åtgärden utan allt vatten strömmar igenom området. I figuren har linjerna som dragits för att lägga in åtgärden dolts för att lättare se hur höjdförändringarna ser ut.

Precis som hos andra områden som är omgivna av stor takarea kommer mycket vatten från taken, se diskussion om takvolymerna i avsnitt 6.4.1. Vid ett riktigt kraftigt skyfall kan det förväntas att en stor del av volymen kommer rinna ner från taken när stuprännorna inte hinner med att leda undan allt vatten.

## **6.2 Känslighetsanalys**

### **6.2.1 CDS-regn**

Utbredningen av översvämningen som ses i figur 25 är som förväntat större för CDS-regnet (Cds1). Att översvämningen är värre vid simuleringen av CDS-regnet (figur 25) beror delvis på att blockregnet (Blk4) har en konstant intensitet och en stor del av regnet hinner infiltrera i grönyrtorna under hela simuleringstiden. Vid CDS-regnet hinner regnet infiltrera under de partier

med låg intensitet, men under intensitetstoppen flödar det mesta av vattnet vidare på grund av markens vattenmättnad. Detta kan ses i tabell 9 där det redovisas att trots en större volym som simulerats i Cds1 så är infiltrationen mindre. Det här är också vad som händer i verkligheten vid ett skyfall, grönytor har mindre effekt på att minimera vattenvolymer från de riktigt intensiva perioderna av regnet.

Skillnaden i översvämningens utbredning beror också på skillnaden i simulerad nederbördsvolym mellan Cds1 och Blk4. I beräkningarna skiljde sig den totala volymen som skulle simuleras med ca 0,04 %. I tabell 9 ses att den simulerade nederbörden skiljer sig mycket mer än så (4,59 %). Det var även en mycket större WLC för CDS-regnet, hela 249 % mer. Detta resulterar i ett mycket större inflöde i CDS-simuleringen (47860 m<sup>3</sup> mer). Skillnaden i simulerad volym mellan Cds1 och Blk4 är mycket större än skillnaden i infiltrerad volym (4400 m<sup>3</sup> mindre för Cds1). Detta leder till slutsatsen att den simulerade volymen har haft störst inverkan på att översvämningen är värre i Cds1.

Flödestoppen för CDS-regnet i figur 26 tycks sammanfalla med intensitetstoppen på regnet, vilket är förväntat. Ett blockregn med mycket kortare varaktighet, men samma återkomsttid, har även lagts in i grafen för jämförelse, Blk1. Det regnet har en markant flödestopp vilket inte ses i Blk4. Vid simulering av ett blockregn med lång varaktighet kommer inte dynamiken från ett skyfalls flödestopp med. Dessutom kan inte Blk4 klassas som ett skyfall enligt den svenska definitionen (intensiteten når inte upp i 50 mm/h eller en mm/min) trots att återkomstiden är så lång.

En intressant observation är att flödet stiger stadigt med tiden under Blk4-regnets förlopp för att sedan klinga av. Det här beror förmodligen på koncentrationstiden i området och att det därför tar en viss tid för att hela området ska bidra med flöde till tvärsnittet som studerats. Att flödeskurvan för Blk4 inte når en plåtå kan tyda på att koncentrationstiden är längre än varaktigheten på regnet. Därför uppnås aldrig ett maximalt flöde innan regnet har upphört.

Det finns en viss nackdel med att simulera CDS-regn med så här lång varaktighet. Den kombinerar en extrem flödestopp (som korta regn kan ha) med riktigt stora volymer (som från ett långvarigt regn). Det är då inte konstigt att det blir stora översvämningar i resultatet från simuleringar med långa CDS-regn i jämförelse med vad som kan förväntas av ett regn av en viss återkomsttid. Samtidigt ska varaktigheten för CDS-regnet väljas utifrån koncentrationstiden i det område som ska modelleras (Svenskt Vatten 2011a). Därför lämpar sig CDS-regn bättre för mindre avrinningsområden eller där rinntiden är snabbare än för området i det här projektet. Koncentrationstiden blir stor i det här fallet eftersom en bit av avrinningsområdet ligger i Stadsskogen där flödet är långsammare.

### 6.2.2 Varaktighet

Att skillnaden i översvämningens utbredning blir mindre ju längre varaktigheten blir kan delvis bero på att lågpunkterna blir fulla snabbt, men för att utbredningen av översvämningen ska sprida sig längre behövs mycket större volymer. Det här styrks av att den avtagande skillnaden i simulerade volymer när varaktigheten ökar inte är i samma andelsstorlek som den avtagande utbredningen, se tabell 10. I figur 28 ses en stor skillnad mellan Blk2 och Blk1 i vattendjup och sedan mindre skillnad mellan de andra varaktigheterna. Detta stämmer väl med skillnaden i utbredning och den simulerade volymen som togs upp här ovan.

Skillnaden mellan körningarna i infiltrerad volym (figur 10) följer inte samma mönster som utbredningen och totalt inflöde utan ökar istället med ökad varaktighet. Detta beror förmodligen på att det finns mer vatten under en längre tid att infiltrera för de simuleringar med längre varaktighet. Dessutom är det lägre intensitet på regnen med längre varaktighet. Vid lägre intensitet rinner inte lika mycket vatten av direkt på grönyterna utan en större andel hinner infiltrera. Observera att Blk4 är simulerad två timmar längre än de andra och en större volym hinner därför infiltrera.

De kortare regnen har högre intensiteter och därmed kraftigare flödestoppar, se figur 29. Vid valet av varaktighet till skyfallskarteringar med blockregn behöver det göras en avvägning av vad som är viktigast att få med i simuleringen. Antingen snabba flödesförlopp med höga flödestoppar eller mindre toppar som varar längre och bidrar med en större total volym. Det sistnämnda kan få med hur bidraget från hela avrinningsområdet påverkar flödet och översvämningarna, medans det förstnämnda ger en bild av hur området klarar av höga intensiteter. Om varaktigheten på regnet väljs till något långt kan det som i fallet för Blk4 leda till att intensiteten blir för låg för att det enligt den svenska definitionen ska klassas som ett skyfall.

### 6.2.3 Avrinningskoefficient

Körningarna med avrinningskoefficienter (Avr1 och Avr2) jämfördes med en körning med infiltrationsmodul där ett likadant regn har simulerats (Blk1). Denna jämförelse gjordes för att få en uppfattning om hur simuleringar med avrinningskoefficienter förhåller sig till simuleringar med en infiltrationsmodul.

Resultaten från Blk1 och Avr1 är rätt lika men skillnaden mellan dem finns framförallt på grönyterna, se figur 30. Grönyterna gör att vattnet har en väg ut ur modellen när infiltrationsmodulen är aktiverad. I Avr1 blir vattnet därför stående i större utsträckning på grönyterna. Störst skillnad syns i det norra sjukhusområdet där läckagehastigheten är som störst och mer vatten hinner infiltrera i Blk1.

Skillnaden i slutvolymen i områdena utpekade av Region Uppsala (figur 31) påverkas av hur mycket grönyta som finns och om de ligger i områdenas lågpunkter eller ej. Som exempel syns en väldigt låg skillnad i volym i område 2 och 5. Område 2 har förvisso en hel del grönytor (se figur 6) men de ligger inte där vattnet ansamlas (se figur 12). Som diskuterats tidigare har område 7 liknande volymer oavsett körning. Det beror på att det finns ett utflöde när en viss höjd på vattennivån nås i området. Det beror även på att läckagehastigheten är väldigt låg i område 7. Detta leder till att infiltrationen blir väldigt liten i Blk1 och slutvolymen blir lik Avr1 och Avr2.

För att få ett tydligare mönster i hur slutvolymen varierar mellan simuleringarna bör ett större urval på områden användas samt att de är valda utan bias.

Generellt motsvarar en avrinningskoefficient på 0,4 rätt bra den infiltrationshastighet som använts som standard i det här projektet, medans en avrinningskoefficient på 0,75 är en grov underskattning av infiltrationen. Observera att resultatet kan variera beroende på hur lång simuleringen är. Det kan förväntas att volymen i körningen med infiltrationsmodul kommer minska medans avrinningskoefficienternas volymer förblir oförändrade. För just den här simuleringstiden passar 0,4 väldigt bra för att få samma resultat som med infiltrationsmodulen. Notera även att känslighetsanalysen har fokuserat på simuleringens slut. Maxvattennivåer och flödestoppar kan se annorlunda ut.

Att använda en avrinningskoefficient är en förenklad metod som inte behöver lika stor arbetsinsats och ger ändå ett rimligt resultat. För att få ett bättre resultat kan markanvändningen delas in i fler kategorier och avrinningskoefficienten sättas efter dessa kategorier. Men en sammanslagen avrinningskoefficient används för att spara arbetstid, så att börja dela in markanvändningen ytterligare skulle vara kontraproduktivt. Då är det bättre att lägga arbetstiden på att förbättra infiltrationsmodulen.

#### 6.2.4 Infiltrationshastighet

Observera att resultaten från de här simuleringarna skiljer sig något från de övriga på grund av att den äldre höjdmodellen från 2017 användes.

I figur 33 ses det att i stort sätt samma volym har infiltrerat i punkt 5, 6 och 8 för både Inf3 och Blk1. Detta visar att läckaget är den begränsande faktorn för infiltrationen i dessa punkter. Punkt 7 borde också visa samma resultat men det verkar som det endast är Inf3 som har hunnit med att infiltrera maxvolymen för cellen. Förmodligen på grund av att punkten ligger i en sluttning och de andra infiltrationshastigheterna inte hinner infiltrera lika mycket volym innan vattnet rinner vidare nedströms. Att vattenståndet är 0 i den här punkten för samtliga körningar är också ett tecken på att vattnet rinner undan, se figur 34. Sluttning är förmodligen orsaken till att infiltrerade volymerna skiljer i punkt 1, 3 och 4 trots att vattenståndet är noll och läckagehastigheten hög. I punkt 2 är det en tiopotens skillnad i den infiltrerade volymen mellan Blk1, Inf1 och Inf2 (samma skillnad mellan deras infiltrationshastigheter). Detta tillsammans med att det finns vatten kvar i punkten (figur 34) visar tydligt att infiltrationshastigheten är den begränsande faktorn.

I norra sjukhusområdet kan det förväntas att infiltrationshastigheten kommer vara den begränsande faktorn eftersom det ligger på isälvs sediment (se figur 7) med hög läckagehastighet (360 mm/h). Detta ses i figur 35 där slutvolymen i område 3 och 4 ökar exponentiellt med minskade infiltrationshastighet. Till viss del syns det även i område 6, fast det är mindre skillnad mellan Inf3 och Blk1. Det beror på att en stor del av volymen ligger mot fasaden där det är mer hårdgjorda ytor samt att område 6 ligger till största del på glacial lera som har väldigt låg läckagehastighet (0,36 mm/h). Det dessa tre områden har gemensamt är den höga andelen grönytor, se figur 6. Som diskuterats tidigare har område 2 inga grönytor i lågpunkterna och volymen i område 7 är densamma oavsett simulering samt att det är en låg läckagehastighet i området. Område 1 och 5 har väldigt få respektive inga grönytor och därför är resultatet i dessa områden förväntat.

Skillnaden i den totala infiltrerade volymen som kan ses i tabell 12 visar på att infiltrationshastigheten är den begränsande faktorn när den är 3,6 mm/h eller mindre. Detta eftersom att det är ungefär en tiopotens skillnad i infiltrerad volym mellan Inf1 och Inf2 (samma skillnad som i infiltrationshastighet). Medans skillnaden mellan de andra körningarna med högre infiltrationshastighet visar mindre skillnad i infiltrerade volymer. För dessa simuleringar är istället läckagehastigheten i större utsträckning den begränsande faktorn.

I den här känslighetsanalysen har stora skillnader gjorts i infiltrationshastigheterna mellan simuleringarna och stora skillnader i resultaten kan då även förväntas. Det kan dock resoneras att infiltrationshastigheten i infiltrationsmodulen är en känslig parameter som kan göra stor påverkan på resultatet. Skyfallskarteringar skulle gynnas av att valet av infiltrationshastighet utreds nog med fältundersökningar för det område som ska modelleras.

## 6.3 Metoddiskussion

Blk1 var det regn som användes i de flesta beräkningar och var som en referens i känslighetsanalysen. Återkomsttiden på 100 år valdes eftersom det är den lägsta återkomsttiden som en skyfallskartering bör göras på (MSB 2017). Om varaktigheten hade valts till samma som områdets koncentrationstid hade den blivit alldeles för lång och intensiteten för låg. Därför valdes en kortare varaktighet på 30 minuter som kan ses som den mest intensiva delen i ett skyfall.

Justeringen av toppen i CDS-regnet var minimal. Totala volymen som erhöles av CDS-regnet stämde bra överens med volymen från ett blockregn. Resultatet från metoden att beräkna CDS-regnet med ekvation 17 och 18 jämfördes med ett CDS-regn som tagits fram med den enklare metoden beskriven av Svenskt Vatten (2011a) och de följdes åt väldigt bra. I början och slutet av regnet har den enklare metoden en något högre intensitet, men när regnets topp närmas har metoden baserat på ekvationerna en högre intensitet och når även en högre topp. Värt att notera är också att med den här metoden prickades toppen på regnet in bättre än den enklare metoden där toppen är något försenad.

För att analysera vattenhastigheterna användes Köpenhamnsregnet eftersom det hade de största intensitetstopparna och därmed förväntas ha de högsta vattenhastigheterna. Trots att det är det mest extrema regnscenariot som simulerats i detta projekt är det endast ett fåtal ställen som når upp i 3 m/s, se figur 16. Denna hastighet på vattnet anses vara den högsta en ambulans kan klara av utan att förlora fäste, vilket beskrevs i avsnitt 2.5.3.

## 6.4 Osäkerheter och felkällor

Det finns ett litet fel i beräkningarna av volymerna direkt i ArcMap eftersom celler som klassas som torra i MIKE 21 inte har något värde på vattendjupet, trots att det faktiskt finns vatten i cellen. Detta gör att volymen vatten underskattas något i beräkningarna med den här metoden. En jämförelse gjordes mellan att räkna ut totala volymen vatten vid sista tidssteget och den volymen som MIKE själv ger i vattenbalanssummeringen. Det skiljde sig från några få procent upp till ca 15%. Detta kan påverka resultatet i känslighetsanalyserna men anses inte vara en stor påverkan eftersom skillnaden mellan körningarna inte är så stor.

### 6.4.1 Modellens uppbyggnad

Ledningsnätet är inte modellerat och det finns därför ingenstans för vattnet att ta vägen på de hårdgjorda ytorna eller taken, det enda utloppet sker via grönytorna. De lågpunkter som inte har några grönytor får därför ingen skillnad i vattennivå vid simuleringarnas slut, till exempel område 5. Det bör dock poängteras att ett schablonmässigt avdrag har gjorts på den totala volymen för att ta hänsyn till dagvattennätet och att det här ändå visar en rättvis bild över översvämningen. Ju större regn som simuleras, desto mindre inverkan har ledningsnätet på resultatet (MSB 2013a).

Det schablonmässiga avdraget har baserats på ett 10-årsregn med klimatfaktor 1,25. Varaktigheten på 10-årsregnet har satts till samma som det regn som ska simuleras. Alltså har ledningsnätet haft ett lägre intag per tidsenhet vid regn med längre varaktighet, men samtidigt kunnat ta emot en större volym över hela simuleringen. På det här sättet tar ledningsnätet emot en liknande stor andel för samtliga regn av samma återkomsttid, men med varierande varaktighet. Det anses därför vara en rimlig metod.

På grund av tidsstegsintervallen som användes under simuleringen så simulerades regnen med 30 och 10 minuters varaktighet bara under 28 minuter respektive 8 minuter vilket resulterar i att volymen från dessa regn är något underskattade. Detta upptäcktes sent i projektet och alla simuleringar var redan utförda. Dock är volymskillnaden inte så stor för regnen med 30 minuters varaktighet (51,87 mm jämfört med 55,56 mm för 100-årsregnen). Det var en desto större skillnad i volym för regnet med 10 minuters varaktighet (29,32 mm jämfört med 36,65 mm), men detta regn användes endast för varaktighetens påverkan på resultatet och kan därför ses som ett regn med 8-minuters varaktighet i analyserna.

Taklutningarna är inte korrigerade efter verkligheten utan byggnaderna är endast inlagda genom att höja upp höjdmodellen med två meter. Detta resulterar i att taken har samma lutning som den underliggande markytan och kan i vissa fall ge ett obalanserat flöde. De takkanter som ligger lägre belägna får ett större flöde.

Vid ett riktigt kraftigt skyfall kan det antas att stuprännorna går fulla och vattnet rinner av takkanterna. Område 2 har en jämn fördelning av vatten på vardera sida av taket och bidraget från dessa anses därför vara verklighetstroget. Område 3 och 5 ligger båda nedanför stora takytor som till mestadels sluttar ner mot dessa områden. De här två områdena har därför ett något för stort bidrag från taken, men samtidigt förväntas en stor del av vattnet komma från taken eftersom det är stora takareor som omringar dessa områden. Område 4 ligger mitt emellan två stora takareor, varav den västra sluttar ner mot område 4 och den östra sluttar bortåt. Detta leder till att nästan inget vatten kommer från de östra taken, men desto mer kommer från de västra. Detta jämnar ut sig och bidraget från taken kan anses vara verklighetstroget. Område 6 har en stor takarea närliggande och volymen från taken anses vara korrekt. Område 7 ligger i ett relativt plant område och takens sluttningar är jämnt fördelade. Möjligtvis att en för liten volym kommer från taket som ligger beläget i öster eftersom det mestadels sluttar bortåt, men dess area är relativt liten och gör ingen större skillnad på resultatet. Bidraget från taken till område 7 anses vara inom rimliga gränser.

Vid klassningen av markanvändningen klumpades grönytor och grus ihop och ansågs ha samma infiltrationshastighet och Mannings tal, vilket inte stämmer med verkligheten. Det var dock bara två grusytor som lades in för hand som upptäcktes på sjukhusområdet vid fältbesök. Det är svårt och tidskrävande att lägga in samtliga grusytor i hela avrinningsområdet. Varför dessa ändå togs med var på grund av att det ansågs vara mer passande att klassa grusytorna som grönytor istället för hårdgjorda ytor som de annars skulle klassas som.

I simuleringarna med avrinningskoefficient borde de gröna taken ha fått ett avdrag som gröns- och grusytorna. Detta missades och upptäcktes i efterhand. Det fanns dock bara två gröna tak i hela modellen och det skulle göra väldigt liten skillnad på resultatet om de fick ett avdrag.

Analyspunkterna som valdes för känslighetsanalysen (se figur 11) gav inte så bra resultat. Eftersom dessa punkter skulle studera infiltrationen var det viktigt att dessa inte låg i sluttningar. Punkterna valdes ut i början av projektet i områden utan skarpa sluttningar. Trots detta verkar det som att det ändå inte ansamlades vatten i majoriteten av punkterna. Fler punkter borde valts ut och valts noggrannare utefter sluttning.

Det upptäcktes att flöden över vissa tvärsnitt inte hade slutat vid slutet av simuleringen. Flödena var dock väldigt små och majoriteten av volymerna hade redan flödat till vid slutet av simuleringarna (se figur 26 och 29). En längre simulering skulle inte påverka resultatet märkvärt.

Efter att simuleringarna var gjorda upptäcktes det att beräkningen av eddy-viskositeten var felaktig. Beräkningen baserades på tidsstegsintervallet 0,5 sekunder som användes i de första testsimuleringarna. Tidsstegsintervallet sänktes sedan till 0,2 för att få en stabilare modell, men en ny beräkning av eddy-viskositeten gjordes inte. Huruvida det här påverkar resultatet är oklart.

#### **6.4.2 Water level correction**

Det tycks bli mer WLC i simuleringar där ytor i genomsnitt är torrare. Som exempel kan ses i tabell 12 där WLC-volymen är många gånger större för Inf3 än för de andra simuleringarna. Inf3 har en väldigt hög infiltrationshastighet och vattnet som faller under simuleringen hinner ofta sjunka undan direkt på grönyterna, vilket leder till att cellerna pendlar mellan torra och våta (se avsnitt 3.6 om *flooding and drying* i MIKE 21). MIKE 21 gör då en korrigering för att vattennivåerna inte ska hamna under ESPH-tröskeln och lägger till en WLC-volym. Det här förklarar även varför CDS-regnet i tabell 9 har en mycket högre WLC än blockregnet. CDS-regnet har under vissa tidsperioder låg intensitet och under dessa perioder så hinner grönyterna infiltrera det mesta vattnet och WLC skapas. De körningar som har tydligt lägst WLC är Avr1 och Avr2 där ingen infiltrationsmodul användes.

Det är värt att fundera över MIKE 21s duglighet till simuleringarna som ger hög WLC. Ett CDS-regn bör simuleras utan infiltrationsmodul för att inte skapa så höga WLC-volymer. För att beskriva infiltrationen kan istället avrinningskoefficienter användas.

### **6.5 Validering**

Någon data med uppmätta värden på vattennivåer och flöden vid ett skyfall finns inte för området och därför har ingen kalibrering av modellen utförts. Istället har regndata från Uppsalaregnet 2018 simulerats för att använda som en form av validering av modellen. I skrivande stund färdigställs en rapport om Uppsalaregnet 2018 (Nystrand 2020). Den hann inte bli klar i tid till denna studie och valideringen uteblev.

Infiltrationshastigheten som använts i de flesta simuleringarna (36 mm/h) är det som användes av WSP i skyfallskarteringen för Stockholms stad (Thurin 2018). Efter konsultation med ämnesgranskare på SLU så har infiltrationshastigheten som använts som standard i modellen ansetts vara rimlig, om än något generös. En något lägre infiltrationshastighet kan förväntas på grönytor som i en stad oftast är hårt packade (Wesström 2020).

### **6.6 Vidare studier**

Eftersom sjukhusområdet ligger på Uppsala kommuns största dricksvattentäckt behöver det göras en utredning på dagvattnets kvalitet innan åtgärder med infiltration anläggs (Gustafsson et al. 2018). Det skulle även behövas göra en utredning kring mer exakt hur skyfallsåtgärderna ska konstrueras, om de är genomförbara och deras kostnad.

## 7 Slutsatser

En stor andel av volymen vatten som flödar inne på Akademiska sjukhusets område vid ett skyfall skapas inne på området. Det sker ett minimalt flöde in i det södra sjukhusområdet och det finns några stora flödesvägar in i det norra sjukhusområdet, där den största sker från Sjukhusvägen i höjd med helikopterplattan.

Det finns ett antal lågpunkter inne på sjukhusområdet där vatten ansamlas. Några av dessa ligger i de särskilt intressanta områdena utpekade av Region Uppsala och kring dessa har följande slutsatser dragits:

- **Område 1:** Det finns inga större risker för framkomligheten längst med Sjukhusvägen vid ett skyfall. Sjukhusvägen är en naturlig flödesväg för vatten ner mot Stadsparken och Fyriskan. Den bör utnyttjas som transportväg för vatten vid ett skyfall.
- **Område 2:** Det blir stående vatten vid infarten till ambulansgaraget vid ett skyfall. För att undvika detta föreslås en höjdsättning av den hårdgjorda ytan för att leda bort vattnet från ytan. För att undvika det största flödet in mot infarten kan ett dike anläggas längst med gräsmattan mellan Inre sjukhusvägen och infarten.
- **Område 3:** En höjdsättning av marken inne på området skulle ge störst positiv effekt på översvämningen. Om det inte är möjligt kan inflödet minskas genom en barriär i söder och en höjdsättning av vägen i norr så vattnet styrs bort.
- **Område 4:** Inget större problem med stående vatten vid ett skyfall, men området är en av de största flödesvägarna inne på sjukhusområdet. En stor andel av vattnet kommer från parkeringen söder om J-huset. Denna kan därför användas som temporär magasinering av vatten genom att antingen sänka marken på parkeringen eller höja upp kanterna runt.
- **Område 5:** Inga större volymer vid ett 100-årsregn, men påverkas kraftigt av regn med längre återkomsttid. Införandet av grönytor kan förmildra konsekvenserna vid ett skyfall. För att undvika att vatten tränger in i byggnaderna behövs en höjdsättning av marken i anslutning till fasaden.
- **Område 6:** Särskilt stor risk för översvämning vid ett skyfall. Barriären som lades in i MIKE 21 är en effektiv åtgärd för att minska översvämningen i det här området. Kan kompletteras med en barriär längst med Inre sjukhusvägen. Barriärerna kan konstrueras som impermeabla jordvallar längst med gräsmattorna.
- **Område 7:** Översvämningens utbredning är i stort sett konstant vid skyfall, oberoende av skyfalllets storlek. En höjdsättning av marken föreslås för att skapa ett genomflöde ner mot Sjukhusvägen.

Ett CDS-regn ger större översvänningsutbredning och högre flödestoppar än ett blockregn av samma varaktighet och återkomsttid. Ett CDS-regn med så lång varaktighet som använts i det här projektet får med extremer från både kortvariga och långvariga regn. Detta leder till större översvänningskonsekvenser än förväntat från ett regn av en viss återkomsttid och anses vara CDS-regnets svaghet vid skyfallskaracteringar. Vidare så är inte MIKE 21s infiltrationsmodul det bästa att använda vid simuleringar av CDS-regn på grund av de stora WLC-volymer som läggs till.

När varaktigheten på regnet ökar, så ökar även översvämningens utbredning, slutvolymen och den infiltrerade volymen. Flödet får lägre toppar och blir mer utdragna. Om blockregn används i en skyfallskartering bör varaktigheten väljas så att regnet får en tillräckligt hög intensitet så att det enligt den svenska definitionen kan klassas som ett skyfall.

En avrinningskoefficient på 0,4 för grönytorna gav ett liknande resultat som simuleringar med infiltrationsmodulen och beskriver därför infiltrationen väl i området. Vid en högre avrinningskoefficient ökar översvämningens utbredning, speciellt på de gröna ytorna.

Högre infiltrationshastighet i modellen leder till mindre översvämning och slutvolym. Vid höga infiltrationshastigheter blir läckagehastigheten till den underliggande jordarten den begränsande faktorn i infiltrationsmodulen. Vid lägre infiltrationshastigheter är det alltid infiltrationshastigheten som är den begränsande faktorn. Infiltrationshastigheten är en känslig parameter som bör väljas efter underlag om infiltrationsförhållandena i området som ska modelleras.

## Referenser

- Akademiska sjukhuset (2020). *Årsredovisning och korta fakta*. Library Catalog: [www.akademiska.se](http://www.akademiska.se). Tillgänglig: <https://www.akademiska.se/om-oss/om-akademiska-sjukhuset/arsredovisning-kvalitetsbokslut-och-korta-fakta/> [2020-06-02].
- BT (2011). *Hospitaler var centimeter fra katastrofe*. [www.bt.dk](http://www.bt.dk). Library Catalog: [www.bt.dk](http://www.bt.dk). Section: Nyheder. Tillgänglig: <https://www.bt.dk/content/item/66220> [2020-04-23].
- Carlander, F. (2016). Skyfallsförebyggande åtgärder: exempel från arbete i Köpenhamns och Fredriksbergs kommuner (MSB1018 – Augusti 2016), s. 16.
- Dagens Medicin (2018). *Akademiska behöver hjälp efter översvämning*. Dagens Medicin. Library Catalog: [www.dagensmedicin.se](http://www.dagensmedicin.se). Tillgänglig: <https://www.dagensmedicin.se/artiklar/2018/07/30/akademiska-behoover-hjalp-efter-oversvamning/> [2020-04-23].
- Dahlström, B. (2006). *Regnintensitet i Sverige - en klimatologisk analys*. 2006-26. Svenskt Vatten, s. 69.
- DHI (2017a). *MIKE 21 Flow Model & MIKE 21 Flood Screening Tool - Hydrodynamic Module*. Horsholm, Denmark: DHI Headquarters, s. 58. Tillgänglig: [https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast\\_and\\_Sea/M21HDFST\\_Scientific\\_Doc.pdf](https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast_and_Sea/M21HDFST_Scientific_Doc.pdf) [2020-02-04].
- DHI (2017b). *MIKE 21 Toolbox - User guide*. Horsholm, Denmark: DHI Headquarters, s. 258. Tillgänglig: [https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast\\_and\\_Sea/M21Toolbox.pdf](https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast_and_Sea/M21Toolbox.pdf) [2020-05-12].
- DHI (u.å.). *MIKE 21 Flow Model - Hints and recommendations in applications with significant flooding and drying*, s. 8. Tillgänglig: <https://www.dhigroup.com/upload/dhisoftwarearchive/papersanddocs/hydrodynamics/MIKE21SignificantFloodDryGuidelines.pdf> [2020-05-20].
- DMI (2012). *Drift af Spildevandskomitéens Regnmålersystem Årsnotat 2011*. København: Danmarks Meteorologiske Institut, s. 51.
- GSD-Fastighetskartan (2020). collaborator Lantmäteriet. Tillgänglig: [zeus.slu.se](http://zeus.slu.se) [2020-02-11].
- GSD-Höjddata, grid 2+ (2020). collaborator Lantmäteriet. Tillgänglig: [zeus.slu.se](http://zeus.slu.se) [2020-02-11].
- GSD-Ortofoto IRF 0,25 m (2020). collaborator Lantmäteriet. Tillgänglig: [zeus.slu.se](http://zeus.slu.se) [2020-02-11].
- GSD-Ortofoto RGB 0,25 m (2020). collaborator Lantmäteriet. Tillgänglig: [zeus.slu.se](http://zeus.slu.se) [2020-02-11].
- Gustafsson, E., Andersson, E., Föhlinger, S., Hammar, F., Heinke, M., Lundberg, T., Nordqvist, R., Palmfjord, E., Ragvald, J. & Sjöberg, O. (2018). *Risikanalys av Uppsala- och Vattholma-åsarnas tillrinningsområde ur grundvattensynpunkt - Slutrapport MÅsen Etapp 2*. Uppsala: Geosigma, s. 73.
- Göteborgs Stad (2019). *Förslag till översiktsplan för Göteborg – tillägg för översvämningsrisker*. Göteborg: Stadsbyggnadskontoret, s. 52. Tillgänglig: [https://www5.goteborg.se/prod/fastighetskontoret/etjanst/planbygg.nsf/vyFiler/%C3%96versiktsplan%20-%20Till%C3%A4gg%20f%C3%B6r%20%C3%B6versv%C3%A4mningsrisker-%C3%96versiktsplan%20-%20Godk%C3%A4nd-Bilaga%20till%20tematiskt%20till%C3%A4gg%20f%C3%B6r%20%C3%B6versv%C3%A4mningsrisker/\\$File/Tematisk+till%C3%A4gg+%C3%96P+%C3%B6versv%C3%A4mningsrisk+-+Bilaga.pdf?OpenElement](https://www5.goteborg.se/prod/fastighetskontoret/etjanst/planbygg.nsf/vyFiler/%C3%96versiktsplan%20-%20Till%C3%A4gg%20f%C3%B6r%20%C3%B6versv%C3%A4mningsrisker-%C3%96versiktsplan%20-%20Godk%C3%A4nd-Bilaga%20till%20tematiskt%20till%C3%A4gg%20f%C3%B6r%20%C3%B6versv%C3%A4mningsrisker/$File/Tematisk+till%C3%A4gg+%C3%96P+%C3%B6versv%C3%A4mningsrisk+-+Bilaga.pdf?OpenElement) [2020-04-17].
- Institut for Beredskabsevaluering (2012). *Redegørelse om skybruddet i Storkøbenhavn 2. juli 2011*. Institut for Beredskabsevaluering, s. 22.
- Jordarter 1:25 000-1:100 000 (2020). collaborator SGU. Tillgänglig: [zeus.slu.se](http://zeus.slu.se) [2020-02-11].

- Keifer, C. J. & Chu, H. H. (1957). Synthetic Storm Pattern for Drainage Design. *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 83 (4), ss. 1–25.
- Lantmäteriet (2017). Produktbeskrivning: GSD-Fastighetskartan vektor, vol. 7.4, s. 100.
- Leijonhufvud, E. (2018). Miljonkostnad för kommunen i skyfallets spår. *SVT Nyheter*. Tillgänglig: <https://www.svt.se/nyheter/lokalt/uppsala/miljonkostnad-i-skyfallet-s-spar> [2020-04-23].
- Länsstyrelsen i Jönköpings län (2015). *Life to ad(d)mire - Bilaga 4: Handledning för hydrologiska beräkningar i GIS*. NAT/S/000268. Jönköping: Länsstyrelsen i Jönköpings län, s. 39.
- Länsstyrelserna (2018). Rekommendationer för hantering av översvämning till följd av skyfall, s. 10.
- Malmö stad (2017). *Skyfallsplan för Malmö*. Malmö, s. 44. Tillgänglig: [https://malmo.se/download/18.cb832751656711ccfb323/1535098146263/Skyfallsplanen\\_antagn\\_20170301.pdf](https://malmo.se/download/18.cb832751656711ccfb323/1535098146263/Skyfallsplanen_antagn_20170301.pdf) [2020-04-17].
- Martínez-Gomariz, E., Gómez, M., Russo, B. & Djordjević, S. (2018). Stability criteria for flooded vehicles: a state-of-the-art review: Stability criteria for flooded vehicles. *Journal of Flood Risk Management*, vol. 11, S817–S826. doi: 10.1111/jfr3.12262. Tillgänglig: <http://doi.wiley.com/10.1111/jfr3.12262> [2020-04-09].
- MSB (2013a). Pluviala översvämningar : konsekvenser vid skyfall över tätorter, en kunskapsöversikt. *MSB567-13*, s. 70.
- MSB (2013b). *Handlingsplan för skydd av samhällsviktig verksamhet*. MSB597. OCLC: 941635610. Karlstad: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB).
- MSB (2014). Kartläggning av skyfalls påverkan på samhällsviktig verksamhet: framtagande av metodik för utredning på kommunal nivå (MSB694 - maj 2014), s. 64.
- MSB (2017). *Vägledning för skyfallskartering: tips för genomförande och exempel på användning*. OCLC: 1023376598. Karlstad: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB).
- MSB (2019). *Vägledning för identifiering av samhällsviktig verksamhet*. MSB1408. Karlstad: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB), s. 18. Tillgänglig: <https://www.msb.se/contentassets/d8fca23b124c4686a629970fd2c1aa31/vagledning-for-identifiering-av-samhallsviktig-verksamhet-msb1408---juni-2019.pdf> [2020-01-31].
- Nystrand, M. (2020). E-mail.
- Olsson, J., Berg, P., Eronn, A., Simonsson, L., Södling, J., Wern, L. & Yang, W. (2017). Extremregn i nuvarande och framtida klimat, vol. 47, s. 83. Tillgänglig: [https://www.smhi.se/polopoly\\_fs/1.134304!/klimatologi\\_47\\_4.pdf](https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.134304!/klimatologi_47_4.pdf) [2020-01-24].
- SCALGO (2020). *SCALGO Live Flood Risk - SCALGO*. Tillgänglig: <https://scalgo.com/en-US/live-flood-risk> [2020-05-22].
- SFS 2009:956 (2009). *Förordning om översvänningsrisker*. Tillgänglig: [https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/forordning-2009956-om-oversvanningsrisker\\_sfs-2009-956](https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/forordning-2009956-om-oversvanningsrisker_sfs-2009-956) [2020-01-27].
- Sjövist, E., Asp, M., Axén Mårtensson, J., Berggren-Clausen, S., Berglöv, G., Björck, E., Johnell, A., Nylén, L., Ohlsson, A. & Persson, H. (2015). *Framtidsklimat i Uppsala län - enligt RCP-scenarier*. 20. Norrköping: SMHI, s. 82.
- SMHI (2018). *Hur mäts nederbörd? | SMHI*. Tillgänglig: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/hur-mats-nederbord-1.637> [2020-04-20].
- SMHI (2020a). *Återkomsttider | SMHI*. Tillgänglig: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/extremer/aterkomsttider-1.89085> [2020-04-20].

- SMHI (2020b). *Nederbördsdata Uppsala*. Type: dataset. SMHI. Tillgänglig: <https://www.smhi.se/data/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-observationer#param=precipitationHourlySum,stations=all,stationid=97510> [2020-04-20].
- SOU (2017). *Vem har ansvaret?* Statens offentliga utredningar. Stockholm: Wolters Kluwer. 425 s. Tillgänglig: <https://www.regeringen.se/49c4a3/contentassets/7931dd4521284343b9224e9322539e8d/vem-har-ansvaret-sou-201742> [2020-02-18].
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P. (2013). *IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom och New York, NY, USA: Cambridge University Press, s. 1535. Tillgänglig: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_SPM\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf) [2020-01-24].
- Svenskt Vatten (2011a). *Publikation P104: Nederbördsdata vid dimensionering och analys av avloppssystem*. 1. utg. Stockholm: Svenskt Vatten AB. 112 s.
- Svenskt Vatten (2011b). *Publikation P105: Hållbar dag- och dränvattenhantering*. 1. utg. Stockholm: Svenskt Vatten AB. 128 s.
- Svenskt Vatten (2016). *Publikation P110: Avledning av dag-, drän- och spillvatten*. 1. utg. Stockholm: Svenskt Vatten AB. 148 s.
- The city of Copenhagen (2012). *Cloudburst Management Plan 2012*. Copenhagen: Technical och Environmental Administration, s. 28.
- Thurin, S. (2018). *Skyfallsmodellering Stockholm stad*. Stockholm: WSP, s. 18.
- Uppsala kommun (2016). *Översiktsplan 2016 för Uppsala kommun: Del A Huvudhandling*. Uppsala, s. 196. Tillgänglig: <https://www.uppsala.se/organisation-och-styrning/publikationer/oversiktsplan-2016/> [2020-04-21].
- Uppsala kommun (2018). *Klimatförändringar i Uppsala kommun - en översikt av effekter och åtgärder*. Uppsala, s. 69. Tillgänglig: <https://www.uppsala.se/contentassets/f79210ceff714a9d87063565ae0745d6/4-klimatanpassning-som-en-del-av-miljo--och-klimatprogrammet.pdf> [2020-04-17].
- Uppsala kommun (2019). *Granskning av kommunens arbete med klimatanpassning*. Uppsala, s. 23. Tillgänglig: <https://www.uppsala.se/contentassets/68d8d78873fa4247a0710289e43150d8/granskning-av-kommunens-arbete-med-klimatanpassning.pdf> [2020-04-17].
- Wesström, I. (2020). *Exjobb, frågor kring infiltrationshastighet*. E-mail.
- Vägverket (2008). *VVMB 310 Hydraulisk dimensionering*. 2008:61. Borlänge: Vägverket, s. 68.

# Appendix

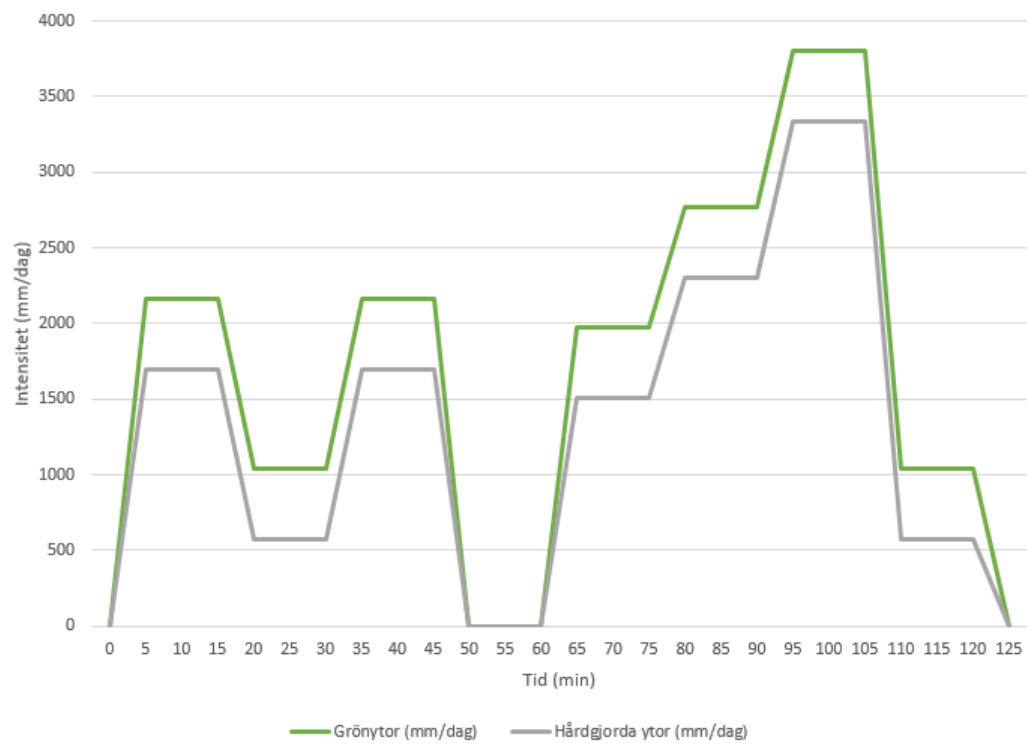
## A Regnberäkningar

### A.1 CDS-regnet

| Återkomst<br>tid, T<br>(mån) | Varaktighe<br>t, t_v (min) | r                    | t_f                  | t_e                             | Klimatfakt<br>or | Avdrag<br>(mm/dag) |
|------------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------|------------------|--------------------|
| 1200                         | 150                        | 0,37                 | 55,5                 | 94,5                            | 1,25             | 395,28             |
| Tid (min)                    | I (l/s ha)                 | I med kf<br>(l/s ha) | Grönytor<br>(mm/dag) | Hårdgjord<br>a ytor<br>(mm/dag) | Volym<br>(mm)    |                    |
| 0                            | 0                          | 0                    | 0                    | 0                               | 0                |                    |
| 5                            | 19,01843                   | 23,77304             | 205,4                | 0                               | 0,713191         |                    |
| 10                           | 20,83288                   | 26,04109             | 225                  | 0                               | 0,781233         |                    |
| 15                           | 23,08823                   | 28,86029             | 249,35               | 0                               | 0,865809         |                    |
| 20                           | 25,9687                    | 32,46087             | 280,46               | 0                               | 0,973826         |                    |
| 25                           | 29,77814                   | 37,22268             | 321,6                | 0                               | 1,11668          |                    |
| 30                           | 35,05649                   | 43,82061             | 378,61               | 0                               | 1,314618         |                    |
| 35                           | 42,86509                   | 53,58137             | 462,94               | 67,66                           | 1,607441         |                    |
| 40                           | 55,61989                   | 69,52486             | 600,69               | 205,41                          | 2,085746         |                    |
| 45                           | 80,28168                   | 100,3521             | 867,04               | 471,76                          | 3,010563         |                    |
| 50                           | 148,7214                   | 185,9017             | 1606,19              | 1210,91                         | 5,577051         |                    |
| 55                           | 739                        | 923,75               | 7981,2               | 7585,92                         | 27,7125          |                    |
| 60                           | 301,0246                   | 376,2807             | 3251,07              | 2855,79                         | 11,28842         |                    |
| 65                           | 146,6933                   | 183,3667             | 1584,29              | 1189,01                         | 5,501            |                    |
| 70                           | 97,94727                   | 122,4341             | 1057,83              | 662,55                          | 3,673022         |                    |
| 75                           | 73,94919                   | 92,43649             | 798,65               | 403,37                          | 2,773095         |                    |
| 80                           | 59,63846                   | 74,54808             | 644,1                | 248,82                          | 2,236442         |                    |
| 85                           | 50,12248                   | 62,6531              | 541,32               | 146,04                          | 1,879593         |                    |
| 90                           | 43,33158                   | 54,16448             | 467,98               | 72,7                            | 1,624934         |                    |
| 95                           | 38,23871                   | 47,79838             | 412,98               | 17,7                            | 1,433951         |                    |
| 100                          | 34,27593                   | 42,84492             | 370,18               | 0                               | 1,285348         |                    |
| 105                          | 31,10353                   | 38,87942             | 335,92               | 0                               | 1,166383         |                    |
| 110                          | 28,50573                   | 35,63217             | 307,86               | 0                               | 1,068965         |                    |
| 115                          | 26,33887                   | 32,92359             | 284,46               | 0                               | 0,987708         |                    |
| 120                          | 24,50356                   | 30,62945             | 264,64               | 0                               | 0,918884         |                    |
| 125                          | 22,92885                   | 28,66106             | 247,63               | 0                               | 0,859832         |                    |
| 130                          | 21,56271                   | 26,95339             | 232,88               | 0                               | 0,808602         |                    |
| 135                          | 20,36613                   | 25,45766             | 219,95               | 0                               | 0,76373          |                    |
| 140                          | 19,30926                   | 24,13658             | 208,54               | 0                               | 0,724097         |                    |
| 145                          | 18,3689                    | 22,96112             | 198,38               | 0                               | 0,688834         |                    |
| 150                          | 17,52671                   | 21,90839             | 189,29               | 0                               | 0,657252         |                    |
|                              |                            |                      |                      | Ackumuler<br>ad volym<br>(mm)   | 86,09875         |                    |

**Figur A1:** Resultatet av beräkningen av CDS-regnet med ekvation 17 och 18. Med i figuren är värden på koefficienterna som användes i beräkningarna samt intensiteten och volym för varje tidssteg.

## A.2 Köpenhamnsregnet

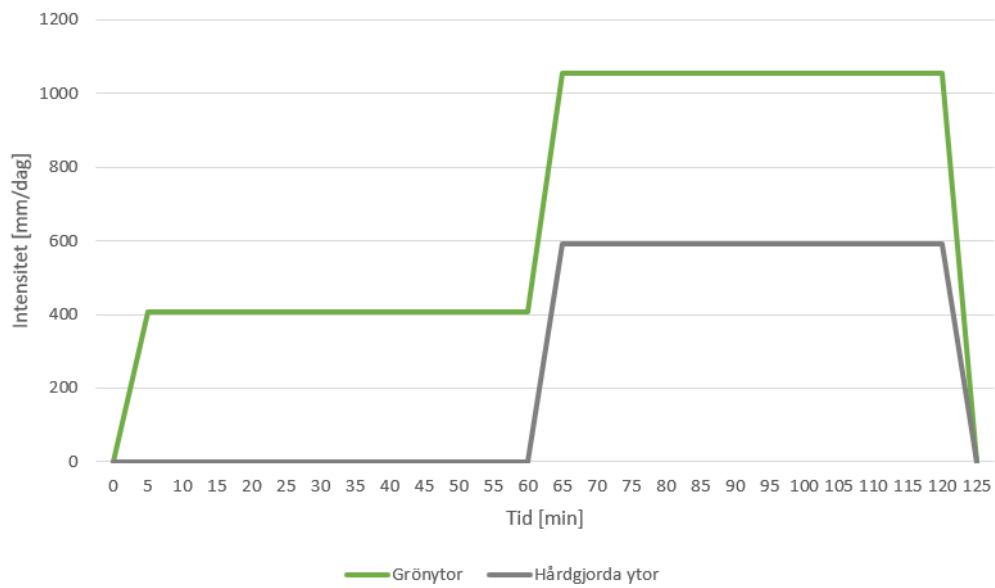


**Figur A2:** Köpenhamnsregnet illustrerat i en intensitets-tid-graf. Den gröna linjen är regnets intensitet på de gröna ytorna och den gråa linjen är intensiteten på de hårdgjorda ytorna. Data: DMI (2012)

| I 10-<br>årsregn,<br>120min (l/s<br>ha) |          |                               |               |                                |
|-----------------------------------------|----------|-------------------------------|---------------|--------------------------------|
| Klimatfakt<br>or                        |          | Omvandlin<br>gsfaktor         |               | Avdrag<br>(mm/dag)             |
| 43,1                                    |          | 1,25                          |               | 465,48                         |
| Tid (min)                               | I (mm/h) | Grönytor<br>(mm/dag)          | Volym<br>(mm) | Hårdgjorda<br>ytor<br>(mm/dag) |
| 0                                       | 0        | 0                             | 0             | 0                              |
| 5                                       | 90       | 2160                          | 7,5           | 1694,52                        |
| 10                                      | 90       | 2160                          | 7,5           | 1694,52                        |
| 15                                      | 90       | 2160                          | 7,5           | 1694,52                        |
| 20                                      | 43,2     | 1036,8                        | 3,6           | 571,32                         |
| 25                                      | 43,2     | 1036,8                        | 3,6           | 571,32                         |
| 30                                      | 43,2     | 1036,8                        | 3,6           | 571,32                         |
| 35                                      | 90       | 2160                          | 7,5           | 1694,52                        |
| 40                                      | 90       | 2160                          | 7,5           | 1694,52                        |
| 45                                      | 90       | 2160                          | 7,5           | 1694,52                        |
| 50                                      | 0        | 0                             | 0             | 0                              |
| 55                                      | 0        | 0                             | 0             | 0                              |
| 60                                      | 0        | 0                             | 0             | 0                              |
| 65                                      | 82,2     | 1972,8                        | 6,85          | 1507,32                        |
| 70                                      | 82,2     | 1972,8                        | 6,85          | 1507,32                        |
| 75                                      | 82,2     | 1972,8                        | 6,85          | 1507,32                        |
| 80                                      | 115,2    | 2764,8                        | 9,6           | 2299,32                        |
| 85                                      | 115,2    | 2764,8                        | 9,6           | 2299,32                        |
| 90                                      | 115,2    | 2764,8                        | 9,6           | 2299,32                        |
| 95                                      | 158,4    | 3801,6                        | 13,2          | 3336,12                        |
| 100                                     | 158,4    | 3801,6                        | 13,2          | 3336,12                        |
| 105                                     | 158,4    | 3801,6                        | 13,2          | 3336,12                        |
| 110                                     | 43,2     | 1036,8                        | 3,6           | 571,32                         |
| 115                                     | 43,2     | 1036,8                        | 3,6           | 571,32                         |
| 120                                     | 43,2     | 1036,8                        | 3,6           | 571,32                         |
| 125                                     | 0        | 0                             | 0             | 0                              |
|                                         |          | Ackumuler<br>ad volym<br>(mm) |               | 155,55                         |

**Figur A3:** Köpenhamnsregnets tidssteg med intensiteter och volymer presenterade. Data: DMI (2012)

### A.3 Uppsalaregnet



**Figur A4:** Uppsalaregnet illustrerat i en intensitets-tid-graf. Den gröna linjen är regnets intensitet på de gröna ytorna och den gråa linjen är intensiteten på de hårdgjorda ytorna. Data: SMHI (2020b)