



UPPSALA  
UNIVERSITET

UPTEC W 23017

Examensarbete 30 hp

Februari 2023

# Skyfall i Sala

En skyfallskartering i HEC-RAS

---

Jacob Källbom



## Abstract

As the climate becomes warmer in Sweden the frequency and extent of cloudbursts are expected to rise. When these rain events occurs in populated areas the consequences can be severe for the local community with extensive flooding leading to for example damaged properties, erosion and obstructions of traffic. One step to increase the awareness of these risks is to do a cloudburst mapping where a rain with cloudburst extent is modelled hydraulically. Areas that are at risk of flooding during the rain event and flow paths for the surface runoff can be assessed from the model. In this thesis such a model was created for the town of Sala.

The cloudburst model was made using the software HEC-RAS and to simulate infiltration the method SCS curve number was implemented. The rain event was modeled as a Chicago design storm with a return period of 100 years, total duration of six hours and a climate factor of 1,3. The results were that several areas in Sala were at risk of flooding. Two main areas with risk of major flooding extents were located to just south of central Sala between Ringgatan and Östra Tulegatan and adjacent to Pråmån upstream of Jakob Mats kvarn.

Because of uncertainties in the SCS curve number model and due to the fact that it is based on empirical data a sensitivity analysis was also done on the infiltration parameters. For the sensitivity analysis four different scenarios were used. One scenario had no modeled infiltration and the three other scenarios were based of error estimations of the curve number parameter called antecedent runoff conditions. The difference in flooding extent with a depth greater than 0,1 m in the model between the scenario with high infiltration and the scenario with low infiltration was 9,1 percentage points. Several new properties and infrastructure were affected in the scenario when no infiltration was used. In total 30% of the precipitation infiltrated in the model in the scenario with low infiltration, 49% infiltrated in the scenario with literature values for the curve number value, and 66% of the precipitation infiltrated in the scenario with high infiltration.

Since the infiltration is highly dependent on the classification of the soils in the model no overall conclusion could be drawn on which infiltration scenario that is best suited for a cloudburst model in general when the SCS curve number method is used to model infiltration.

Key words: Cloudburst, cloudburst mapping, 2D-hydraulic model, surface runoff, HEC-RAS, infiltration, SCS curve number

*Department of Earth Sciences, Program for Air, Water and Landscape Sciences, Uppsala university, Villavägen 16*

**Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten**

**Uppsala universitet, Utgivningsort Uppsala**

Handledare: Lukas Rehn Ämnesgranskare: Gabriele Messori

Examinator: Johan Arnqvist



## Referat

När klimatet i Sverige blir varmare ökar både förekomsten och omfattningen av intensiva skyfall. Dessa kan leda till stora konsekvenser lokalt för drabbade samhällen. Omfattande översvämningar, skadade fastigheter, erosionsskador och hindrad framkomlighet är några av de potentiella följderna. Ett första steg för att öka beredskapen för skyfall är att göra en skyfallskartering där ett nederbördstillfälle med skyfallskaraktär läggs in i en hydraulisk modell över ett område. Modellen visar sedan områden som riskerar att drabbas av översvämningar samt vilken väg som ytavrinningen tar under förloppet. I detta arbete har en sådan modell gjorts över Sala stad.

Skyfallsmodellen skapades i programmet HEC-RAS och för att simulera infiltrationen användes metoden SCS curve number. SCS curve number metoden uppskattar infiltration baserat på markanvändning och jordart. Typregnet valdes till 100 års återkomsttid och modellerades som ett CDS-regn med varaktighet sex timmar och klimatafaktor 1,3. Ett avdrag på nederbördsmängden gjordes även för dagvattennätets kapacitet. Resultatet blev att flertalet områden i Sala kan drabbas av potentiellt stora vattendjup. De största problemområdena identifierades till bebyggelsen mellan Ringgatan och Östra Tulegatan söder om centrala Sala samt området kring Pråmån uppströms Jakob Mats kvarn.

Då infiltrationsmetoden SCS curve number är baserad på empiriska data gjordes en känslighetsanalys på infiltrationsparametrarna. Det som undersöktes var påverkan på total andel infiltrerad nederbörd och översvämningarnas utbredning. Tre olika scenarion baserat på osäkerheten i curve number-talet användes samt ett scenario utan infiltration i modellen. Skillnaden i total översvämmad yta med ett djup större än 0,1 m mellan scenariot med högst infiltration och scenariot med lägst infiltration var i modellen totalt 9,1 procentenheter. I det scenario där ingen infiltration modellerades drabbades flertalet nya fastigheter och infrastruktur av översvämning vilket visar på infiltrationens betydelse för riskbedömningen vid en skyfallskartering. Totalt infiltrerade 30 % av nederbörden i modellen vid scenariot med lägst infiltration, 49 % av nederbörden vid scenariot med direkta litteraturvärden för curve number-talet och 66 % av nederbörden i scenariot med högst infiltration. Eftersom infiltrationen mellan scenarierna till hög grad berodde på hur jordarterna klassades i modellen är det dock svårt att dra en generell slutsats om vilket infiltrationsscenario som är bäst lämpat att använda vidskyfall.

Nyckelord: Skyfall, skyfallskartering, 2D-hydraulisk modellering, markavrinning, HEC-RAS, infiltration, SCS curve number

*Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala universitet, Villavägen 16*

**Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten**

**Uppsala universitet, Utgivningsort Uppsala**

Handledare: Lukas Rehn Ämnesgranskare: Gabriele Messori

Examinator: Johan Arnqvist

# Förord

Med detta examensarbete avslutar jag min studietid på Civilingenjörsprogrammet i Miljö- och vattenteknik vid Uppsala Universitet och Sveriges Lantbruksuniversitet. Arbetet omfattar 30 högskolepoäng och genomfördes under hösten 2022 hos Water Revival Systems AB (WRS) i Uppsala. Sala kommun och WRS har finansierat projektet. Arbetet beställdes av Linn Hemlin på Sala kommun, Jonathan Arnlund på WRS har varit projektledare och Lukas Rehn på WRS har varit handledare. Gabriele Messori, professor på institutionen för geovetenskaper Luft-, vatten- och landskapslära har varit ämnesgranskare.

Först och främst vill jag tacka alla på WRS för att ni har låtit mig ta del av er härliga gemenskap från dag ett. Jag har verkligen uppskattat att ni har gett mig möjligheten att få vara på kontoret och ta del av intressanta möten och seminarier under projektets gång. Tack alla på Sala kommun som har möjliggjort projektet, hjälpt till med underlag och visat intresse. Tack även Gabriele Messori som har varit ett stort stöd under arbetets gång. Jag vill till sist rikta ett extra stort tack till Lukas Rehn som har varit en klippa genom hela arbetet och hjälpt mig med sina många kloka tankar och idéer.

# Populärvetenskaplig sammanfattning

De kraftigaste regntillfällena som förekommer i Sverige kallas för skyfall. Under ett skyfall är regnintensiteten så hög att de dagvattensystem som finns i tätorter inte har tillräcklig kapacitet att leda bort regnmassorna vilket leder till stora konsekvenser när de faller i dessa områden. Byggnader skadas till följd av översvämningar och stora vattenmassor hindrar framkomlighet för räddningstjänst, sjukvård och viktiga transporter. Risk finns även för människors hälsa både direkt från de stora vattenmassorna men även som en följd av elavbrott, hotad dricksvattenkvalitet och ökad smittspridning när avloppsvatten tar sig in i fastigheter. För att uppskatta risken för att ett kraftigt regntillfälle ska inträffa finns en matematisk formel som kallas Dahlströms formel. Denna formel sammankopplar faktorerna regnintensitet, längd på regntillfället och förväntad återkomsttid. Enligt denna formel kan ett regn med storleksordningen skyfall förväntas inträffa på en plats ungefär en gång under en 80-årsperiod. Till följd av klimatförändringarna blir dock vädret allt varmare i Sverige. Detta leder till att atmosfären kan hålla en större mängd vattenånga och skyfallen kommer därför att bli vanligare i framtiden. Enligt en klimatmodell av SMHI kan förekomsten av skyfall öka med så mycket som 40 % till år 2100.

Kommunen har som uppgift att identifiera de risker som finns innanför kommungränserna i en risk- och sårbarhetsanalys. Ett sätt att ta fram riskerna förknippade med ett skyfall är att göra en skyfallskartering. Vid en skyfallskartering simuleras regnmassor från ett uppskattat skyfall över tid för att se var vattnet rinner och blir stående. I detta arbete togs en sådan modell fram på uppdrag av Sala kommun över Sala stad i modelleringsprogrammet HEC-RAS. I modellen undersöktes även hur infiltrationsmetoden SCS curve number påverkar översvämningarnas utbredning och hur parametrarna i metoden påverkar mängden infiltrerad nederbörd.

Regnet som modellerades över Sala var ett så kallat 100-årsregn. Det betyder att regnet hade en återkomsttid på 100 år vilket innebär att det statistiskt sett kommer att inträffa en gång under en 100 årsperiod. För att ta höjd för att framtida klimatförändringar som kan inträffa inom en 100-års period leder till kraftigare skyfall användes även en klimatfaktor på regnet. Klimatfaktorn i modellen var 1,3 vilket innebär att regnet antas vara 30 % intensivare jämfört med ett regn med 100 års återkomsttid idag. För att regnmassorna ska vara så verklighetstroga som möjligt gjordes även ett avdrag på regnet för de vattenmassor som dagvattenledningarna hinner föra bort i Salas centrum och bostadskvarter. För att simulera Sala stad användes en digital karta med inskannade höjder, även kallat för en höjdmmodell. Hänsyn togs även i modellen till markens varierande friktion som påverkar hur snabbt vattnet rinner genom olika delar av modellen.

Infiltration till marken är även en faktor som påverkar vattenmängderna i modellen. Infiltrationen till marken beror delvis på jordens beståndsdelar, även kallat för jordart. Lerjordar kan vara förhållandevis täta vilket leder till att vattnet infiltrerar långsamt medan en jord med hög sandhalt kan leda vatten betydligt snabbare. En annan

faktor som påverkar infiltrationen är vad marken används till. För hårdgjorda ytor så som vägar och parkeringsplatser är infiltrationen väldigt låg medan en större del av regnet kan infiltrera genom marken i en skog eller på en gräsmatta. För att simulera infiltrationen i modellen delades alla ytor i Sala upp i olika klasser beroende på jordart och markanvändning. Genom att använda en metod som kallas SCS curve number kunde infiltrationen i Sala därefter uppskattas. För att undersöka hur infiltrationen påverkade resultatet gjordes fyra olika simuleringar i modellen. Tre simuleringar hade olika generella scenarion för infiltrationen, ett med högre infiltration, ett med medelhög infiltration och ett med låg infiltration. Ytterligare en simulering utan infiltration gjordes även för att se infiltrationens påverkan på översvämningsnivåerna i modellen.

Resultaten från modellen visade att flera områden, vägar och byggnader i Sala riskerar att drabbas av stora vattendjup till följd av ett skyfall. Två huvudområden pekades ut där riskerna sågs som extra stora. Det ena området var strax söder om centrala Sala mellan Ringgatan och Östra Tulegatan och utgjorde en huvudsaklig samlingspunkt för en stor del av ytavrinningen som bildades i centrala Sala. Detta ledde till relativt stora vattendjup och flera drabbade fastigheter. I samma område riskerade framkomligheten över Sagån till och från östra Sala att förhindras på grund av stående vattenmassor. Det andra området var kring Pråmån uppströms Jakob Mats kvarn där stora vattenmassor från kringliggande terräng ansamlades vilket ledde till potentiellt stora vattendjup på upp till över en meter intill fastigheter öster om Jakobsbergsgatan.

Infiltrationen hade relativt stor påverkan på hur stora ytor som blev översvämmade i modellen jämfört med det scenario där ingen infiltration simulerades. Skillnaden på översvämmad yta med mer än 10 cm djup mellan scenariot med medelhög infiltration och scenariot där ingen infiltration användes var 11 procentenheter. Detta motsvarade en ökning på 66 % och påverkade bedömningen av drabbade fastigheter och infrastruktur då flertalet nya områden blev översvämmade. Skillnaden mellan scenariot med hög respektive låg infiltration var i sin tur 9,1 procentenheter vilket motsvarade en ökning på 76 %. Generellt var dock översvämningsutbredningen mellan de tre infiltrationsscenarierna relativt lik och hade inte en stor påverkan på vilka områden och fastigheter som blev påverkade av skyfallet.

En jämförelse gjordes även på den totala infiltrerade vattenvolymen mellan infiltrationsscenarierna. Totalt i modellen infiltrerade 30 % av nederbörden för scenariot med låg infiltration, 49 % i scenariot med medelhög infiltration och 66 % i scenariot med hög infiltration. Infiltrationen i modellen skiljde sig beroende på jordarter och markanvändning och därför gjordes även en jämförelse mellan modellen och Trafikverkets uppskattningar för avrinning vid ett 100-årsregn. I skyfallsmodellen var avrinningen generellt mycket högre för åkermark och lite högre för skogsmark jämfört med Trafikverkets uppskattning. För de tätbebyggda områdena var modellens avrinning lite mindre jämfört med Trafikverket. Denna skillnad bedömdes till stor grad bero på hur jordarterna klassades i infiltrationsmetoden i modellen och ingen generell slutsats kring vilket infiltrationsscenario som är bäst lämpat att använda vid en skyfallskartering kunde därför dras.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Introduktion</b>	<b>1</b>
1.1	Syfte . . . . .	2
1.2	Frågeställningar . . . . .	2
1.3	Avgränsningar . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Teori och bakgrund</b>	<b>3</b>
2.1	Områdesbeskrivning . . . . .	3
2.1.1	Sjöar och vattensystem . . . . .	4
2.1.2	Jordarter . . . . .	5
2.2	Uppkomst och frekvens av skyfall . . . . .	6
2.2.1	Beräkning av återkomsttid . . . . .	6
2.2.2	Klimatförändringars påverkan på skyfall . . . . .	9
2.3	Avrinning vid skyfall . . . . .	9
2.4	Samhällsrisker vid skyfall . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Modell</b>	<b>11</b>
3.1	Metodval vid skyfallskartering . . . . .	11
3.1.1	Höjdmodell . . . . .	11
3.2	Typregn . . . . .	11
3.2.1	Blockregn . . . . .	12
3.2.2	Chicago design storm . . . . .	12
3.3	Dagvattennätets kapacitet . . . . .	13
3.4	Modelleringsprogrammet HEC-RAS . . . . .	14
3.5	2D-modellering i HEC-RAS . . . . .	14
3.5.1	Bevarande av massa . . . . .	14
3.5.2	Bevarande av rörelsemängd . . . . .	14
3.5.3	Beräkningsnät . . . . .	15
3.5.4	Cellstorlek och tidssteg . . . . .	16
3.5.5	Nederbördssimulering i HEC-RAS (Rain on grid) . . . . .	17
3.5.6	Geospatiala lager . . . . .	17
3.5.7	Infiltrationsmetoder . . . . .	17
3.6	Känslighetsanalys på modellen . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Metod</b>	<b>20</b>
4.1	Modellavgränsning och beräkningsnät . . . . .	20
4.1.1	Anpassning av beräkningsnät . . . . .	21
4.2	Randvillkor . . . . .	22
4.3	Modellerat typregn . . . . .	23
4.3.1	Dagvattennätets kapacitet . . . . .	23
4.3.2	CDS-regn . . . . .	25
4.4	Val av parametervärden i skyfallsmodellen . . . . .	25
4.4.1	Markanvändning . . . . .	26

4.4.2	Mannings tal . . . . .	27
4.4.3	Infiltration med SCS curve number-metoden . . . . .	28
4.4.4	Känslighetsanalys på CN-tal . . . . .	30
4.5	Anpassning av höjdmmodell . . . . .	31
4.5.1	Vattendrag och sjöar . . . . .	31
4.5.2	Byggnader . . . . .	31
4.6	Simuleringsscenarier . . . . .	32
4.7	Modelluppställning . . . . .	33
4.8	Känslighetsanalys . . . . .	33
4.8.1	Skillnad i översvämningsutbredning . . . . .	33
4.8.2	Andel infiltrerad nederbörd . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Resultat</b>	<b>35</b>
5.1	Översvämningsutbredning till följd av ett skyfall i Sala . . . . .	35
5.1.1	Område 1 - Söder om centrala Sala . . . . .	37
5.1.2	Område 2 - Pråmån . . . . .	38
5.1.3	Rinnvägar . . . . .	39
5.1.4	Område 1 - Söder om centrala Sala . . . . .	41
5.2	Infiltrationens påverkan på översvämningsutbredning . . . . .	42
5.2.1	Område 1 - Söder om centrala Sala . . . . .	44
5.2.2	Område 3 - Utlopp från Ekeby dammar . . . . .	45
5.2.3	Område 4 - Norr om Sala station . . . . .	46
5.3	Andel infiltrerad nederbörd . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>50</b>
6.1	Översvämningsutbredning till följd av ett skyfall i Sala . . . . .	50
6.1.1	Område 1 - Söder om centrala Sala . . . . .	50
6.1.2	Område 2 - Pråmån . . . . .	51
6.1.3	Påverkan från antagande om dagvattennätets kapacitet . . . . .	51
6.1.4	Vägar och vägtrummor . . . . .	51
6.1.5	Påverkan av modellerat CDS-regn . . . . .	52
6.2	Infiltrationens påverkan på översvämningsutbredning . . . . .	52
6.3	Osäkerhet med avseende på andel infiltrerad nederbörd . . . . .	53
6.3.1	Jämförelse med avrinningskoefficienter . . . . .	54
6.4	Osäkerheter och felkällor i modellen . . . . .	56
6.4.1	Mannings tal och markanvändning . . . . .	56
6.4.2	Beräkningsnät . . . . .	56
6.4.3	Terräng . . . . .	57
6.4.4	SCS curve number-metoden vid skyfallsmodeller . . . . .	57
6.5	Vidare studier . . . . .	58
<b>7</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>59</b>
	<b>Referenser</b>	<b>60</b>
<b>A</b>	<b>Bilaga: Breaklines</b>	<b>i</b>



B Bilaga: CN-tal	ii
C Bilaga: Tekniska avrinningsområden i Sala	iv

# 1 Introduktion

I takt med att klimatet förändras blir flera typer av extrema väderfenomen allt vanligare såväl globalt som lokalt (Douville et al. 2021). Ett exempel på extremväder som antagligen kommer att öka i både intensitet och frekvens i Sverige som följd av klimatförändringar är skyfall (MSB 2017; Ohlsson et al. 2015; Olsson, Berg et al. 2017). Ett skyfall är ett nederbördstillfälle där en extremt stor mängd regn faller under kort tid. När skyfall faller i tätbebyggda områden kan dagvattennätets kapacitet överskridas, vilket ofta leder till översvämningar. Dessa översvämningar skapar stora kostnader för såväl privatpersoner som samhället i stort och kan i värsta fall utgöra en risk för människors hälsa (MSB 2017, 2020). Ett exempel på skyfall som fick allvarliga konsekvenser är det som föll i Gävle mellan 17 och 18 augusti 2021. Lyckligtvis blev ingen allvarligt skadad av händelsen, men kostnaden av förstörd egendom efter skyfallet uppskattades till mellan 500 miljoner och en miljard kronor av Länsstyrelsen i Gävleborg (Länstyrelsen Gävleborg 2022). För kommunkoncernen uppgick kostnaden ett år efter händelsen till 335 miljoner kronor (Gävle Kommun 2022).

Trots att vi nu går in i en tid där risken för kraftiga skyfall i värsta fall beräknas öka med så mycket som 40 % till år 2100 är det få kommuner som idag har en långsiktig och förvaltningsövergripande skyfallsplanering (Olsson, Berg et al. 2017; Salomonsson et al. 2017). Kommunerna har som uppgift att identifiera och värdera de risker som finns innanför kommungränserna i en risk- och sårbarhetsanalys och ett sätt att identifiera risker förknippade med skyfall är att göra en skyfallskartering. I denna rapport har en skyfallskartering över Sala stad gjorts som ett steg i ledet för att höja beredskapen för framtida extremväder. I samband med skyfallskarteringen genomfördes även en analys av infiltrationen i modellen för att utreda hur valet av infiltrationsparametrar påverkar utbredningen och konsekvenserna av översvämningarna.

## 1.1 Syfte

Detta projekt hade som syfte att med programvaran HEC-RAS upprätta en skyfallsmodell över Sala stad och identifiera områden som potentiellt riskerar att översvämmas vid ett kraftigt skyfall, samt identifiera rinnvägar som kan medföra risk för framkomligheten. Infiltrationen i skyfallsmodellen modellerades med SCS curve number-metoden. För att undersöka hur andelen infiltrerad nederbörd och översvämningarnas utbredning påverkades av infiltrationsmetoden hade projektet även som syfte att genomföra en känslighetsanalys på infiltrationsparametrar i modellen.

## 1.2 Frågeställningar

- Vilka områden i Sala riskerar att översvämmas till följd av ett skyfall med 100 års återkomsttid?
- Hur stor påverkan har infiltration, modellerad med SCS curve number-metoden, på översvämningarnas utbredning?
- Hur stor osäkerhet finns det i andel infiltrerad nederbörd kopplat till infiltrationsparametrarna?

## 1.3 Avgränsningar

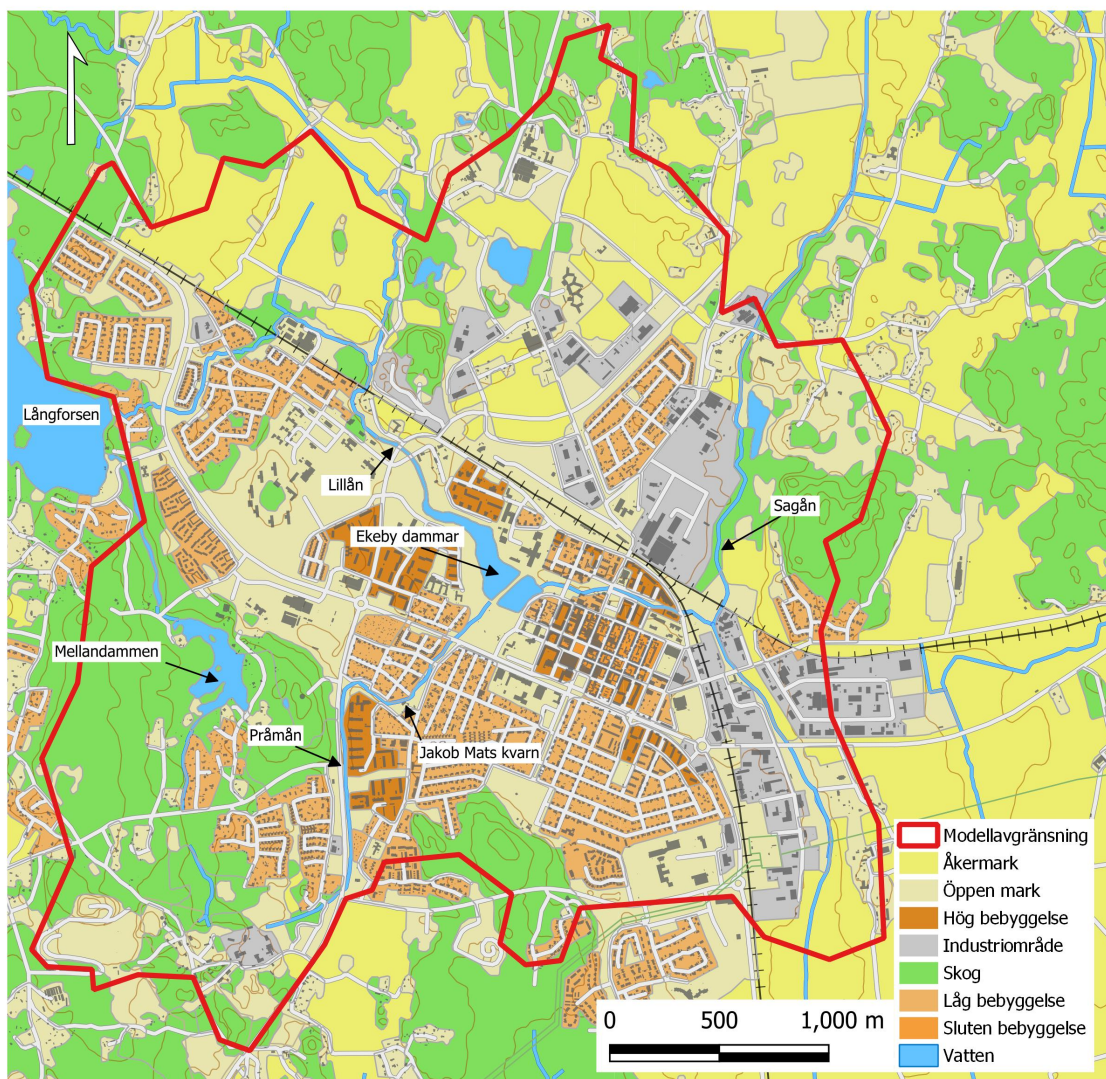
- Det här arbetet utredde översvämningsrisker för befintlig markanvändning i Sala. Åtgärder för att minimera skyfallsrisker omfattades inte av detta arbete.
- Skyfallet modelleras som ett artificiellt CDS-regn där intensiteten antas vara enhetlig över hela området.
- Dagvattennätet är inte inkluderat i modellen. Istället gjordes ett schablonmässigt avdrag på nederbördsmängden baserat på ledningarnas uppskattade kapacitet.
- Det verkliga bottendjupet på sjöar och vattendrag är inte inkluderat i modellen, utan ersättes med en antagen normalvattenyta för åsystemet.

# 2 Teori och bakgrund

## 2.1 Områdesbeskrivning

Sala är en tätort i norra Västmanlands län med cirka 14 000 invånare (SCB 2021). Orten är känd för sin silvergruva som grundades på 1400-talet där det finns viss gruvverksamhet pågående än idag (Sala Silvergruva u.å.).

Det finns sedan tidigare en lågpunktskartering över området gjord av Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI) samt en översvämningsskartering av Sagån genomförd av MSB (Länsstyrelsen i Västmanlands län 2022).



Figur 1: Karta över Sala stad. Källa: Terrängkartan (2022), ©Lantmäteriet.

### 2.1.1 Sjöar och vattensystem

Uppströms Sala ligger den reglerade sjön Långforsen som avvattnas av vattendraget Lillån. Lillån rinner igenom Ekeby dammar och de centrala delarna av Sala för att sedan ansluta till Sagån öster om centrala Sala. Vid Ekeby dammars utlopp finns två dämmen som reglerar vattennivån (figur 2).



(a) Sett från Ekeby dammar.



(b) Närbild.

**Figur 2:** Ett av två dämmen vid Ekeby dammars utlopp. Foto: Källbom (2022).

Från Långforsen går även ett kanalsystem till Mellandammen och Sala silvergruva i södra delarna av orten. Nedströms gruvan får kanalen namnet Pråmån och två dämmen reglerar vattenytan vid Jakob Mats kvarn (figur 3). Efter dämnet ansluter Pråmån till Lillån vid Ekeby dammar (figur 1).



(a) Dämme vid sluss.

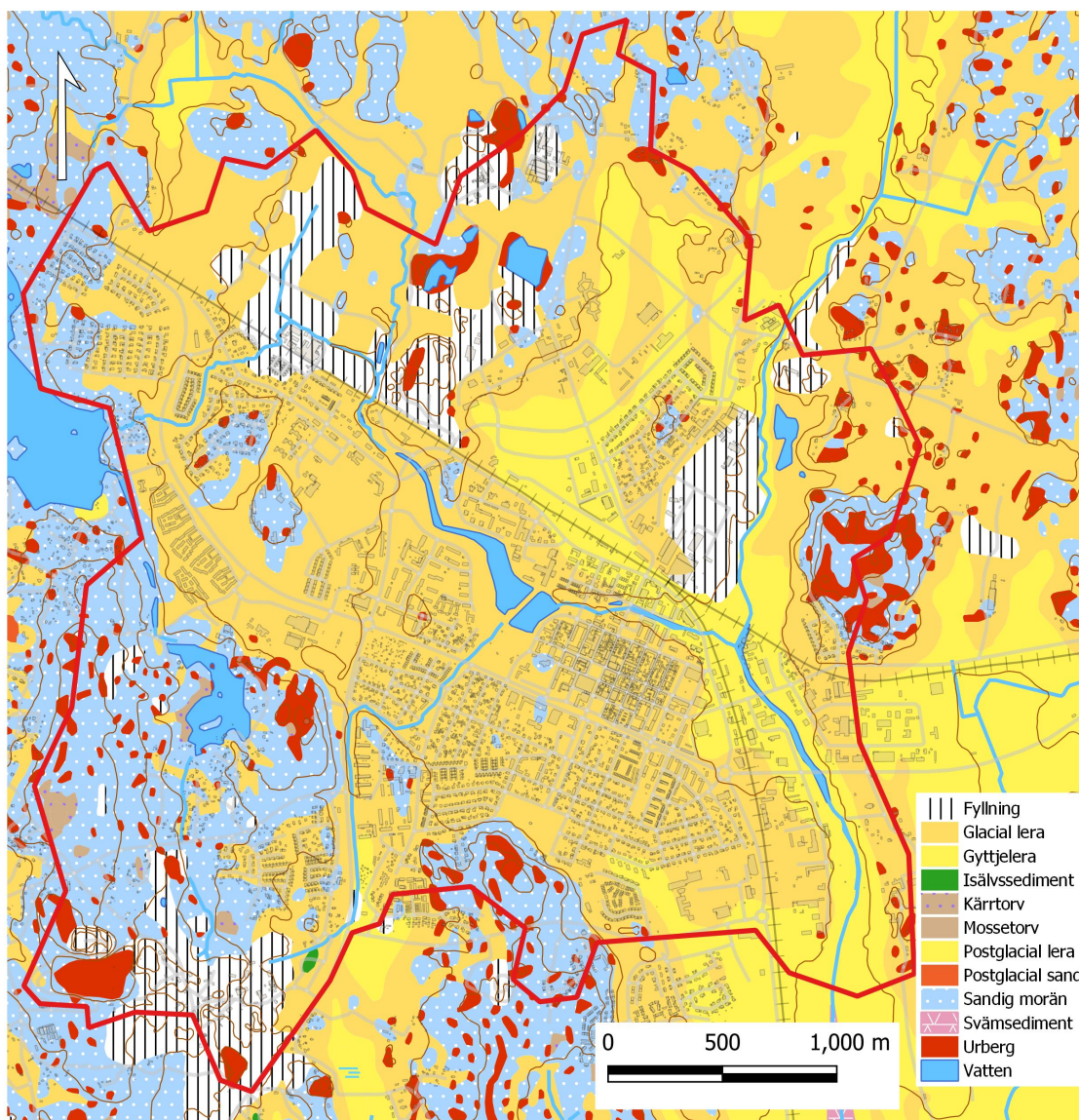


(b) Dämme vid kvarn.

**Figur 3:** Dämmen i Pråmån vid Jakob Mats kvarn. Foto: Källbom (2022).

## 2.1.2 Jordarter

Eftersom området ligger i en flack dalgång under högsta kustlinjen består jordarterna till största del av impermeabla jordarter så som glacial lera med en mindre del postglacial lera kring Sagaåns sträckning (figur 4). I närheten av gruvverksamheten i områdets sydvästra delar är marknivåerna högre och jordlagrarna består av sandig morän med en del berg i dagen. Några större områden med fyllning finns även i områdets norra och södra delar. Fyllning är inte en naturligt avsatt jordart utan är tillförd av människan (Karlsson, Sohlenius & Becher 2021; SGU 2022).



**Figur 4:** Jordarter i Sala stad. Källa: Jordarter 1:25 000 - 1:100 000 (2022) ©SGU och Terrängkartan (2022) ©Lantmäteriet.

## 2.2 Uppkomst och frekvens av skyfall

Begreppet skyfall används för att beskriva en stor mängd nederbörd som faller över kort tid med en hög intensitet. SMHI definierar ett skyfall som ett regn som faller med intensiteten 1 mm per minut eller 50 mm per timme (SMHI 2021a).

För att ett nederbördstillfälle ska kunna definieras som ett skyfall behöver nederbördsintensiteten uppmätas med relativt hög tidsupplösning. Vanligtvis mäter man nederbörd med enheten millimeter per ytenhet och tid vilket motsvarar djupet på regnvattnet om det får falla fritt på en horisontell yta (SMHI 2022). Historiska mätserier består ofta av dygnsmätningar av nederbördsmängd vilket innebär att man inte kan veta om nederbörden har fallit under en hel dag eller mer kortvarigt med skyfallsintensitet. SMHI har ungefär 600 mätstationer spridda över Sverige och av dessa så kan 120 stycken utläsa minutvärden för nederbörd sedan 2022 (SMHI 2022). Eftersom skyfall dock ofta har en liten geografisk utbredning på några kilometer är det sällan som de fångas upp av en sådan mätstation. Det glesa stationsnätet leder till att en stor del av de skyfall som kommer över Sverige inte kan kvantifieras och datan som finns över skyfall i Sverige blir därför begränsad (Olsson & Josefsson 2015).

### 2.2.1 Beräkning av återkomsttid

För att kvantifiera hur extremt ett väderfenomen är används ofta begreppet återkomsttid. En återkomsttid är en statistiskt framtagen tidsperiod som beskriver hur ofta man kan förvänta sig att ett nederbördstillfälle med given intensitet och varaktighet i genomsnitt kommer att ske. För att ta fram återkomsttider med bra säkerhet behövs långa mätserier. SMHI (2021b) anger att som en tumregel kan en återkomsttid vara ungefär dubbelt så lång som mätserien innan osäkerheten blir för stor. Ett nederbördstillfälle med återkomsttiden 100 år benämns som ett 100-årsregn och har sannolikheten 1 % att inträffa per år vilket betyder att risken ackumuleras över längre tidsperioder (SMHI 2021b). För att uppskatta sannolikheten att en händelse ska inträffa minst en gång under en tidsperiod baserat på återkomsttiden  $\tau$  används ekvation 1:

$$P = 1 - (1 - 1/\tau)^{T_p} \quad (1)$$

Där  $P$  är sannolikhet,  $\tau$  är återkomsttiden i år och  $T_p$  är tidsperioden i år (Svenskt Vatten 2011).

Tabell 1 visar sambandet mellan sannolikhet och återkomsttid baserat på ekvation 1.

**Tabell 1:** Sannolikhet för att en händelse med en viss återkomsttid ska inträffa minst en gång under en angiven tidsperiod. Tabellen baseras på ekvation 1.

Återkomsttid	Tidsserie				
	5 år	10 år	20 år	50 år	100 år
<b>10 år</b>	41 %	65 %	88 %	99 %	100 %
<b>50 år</b>	10 %	18 %	33 %	64 %	87 %
<b>100 år</b>	5 %	10 %	18 %	39 %	63 %
<b>500 år</b>	1 %	2 %	4 %	10 %	18 %

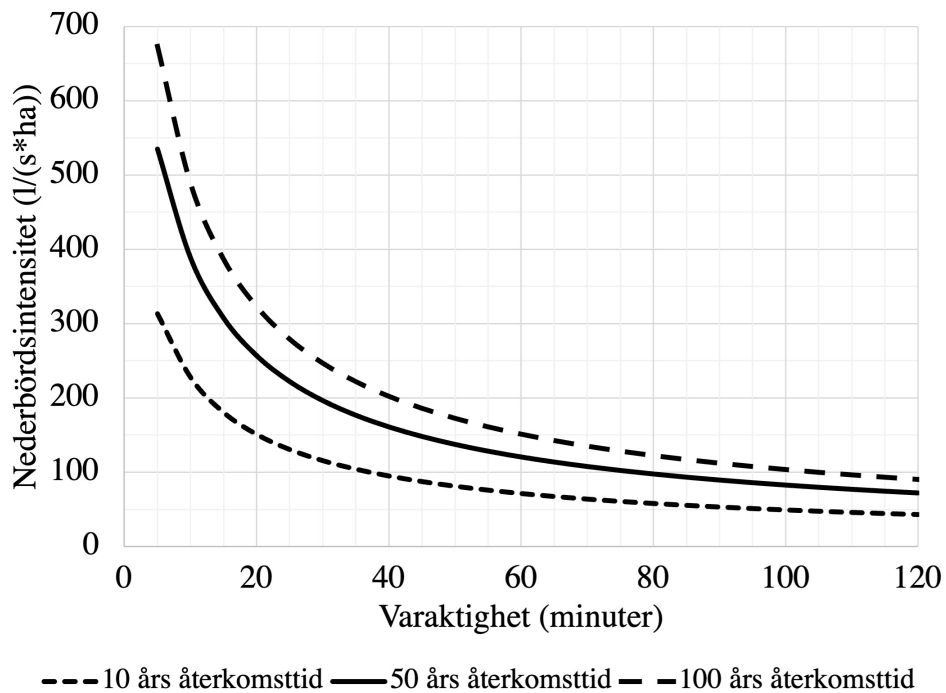
Vid beräkning av återkomsttid för skyfall måste man ta hänsyn till både regnintensitet och varaktighet. Dahlström (2010) tog i sin rapport *Regnintensitet - En molnfysikalisk berättelse* fram en formel som med grund i fysiska processer i atmosfären beskriver sambandet mellan intensitet, varaktighet och återkomsttid vid kraftiga nederbördstillfällen (ekvation 2).  $i_\tau$  är regnintensiteten uttryckt i L/(s ha),  $\tau$  är återkomsttiden i antal månader och  $\Delta t_j$  varaktigheten i antal minuter (Dahlström 2010).

$$i_\tau \approx 190\tau^{1/3} \frac{\ln(\Delta t_j)}{\Delta t_j^{0,98}} + 2 \quad (2)$$

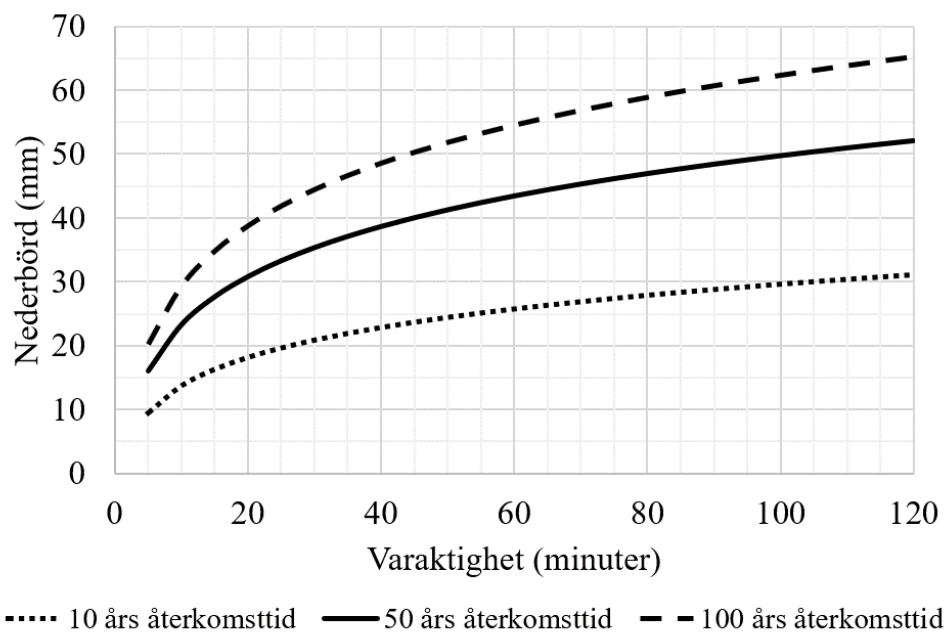
Formeln är utvecklad för att vara planeringsunderlag för berörda samhällssektorer och är giltig för varaktigheter mellan 5 minuter och 24 timmar samt återkomsttider mellan 1 månad och 10 år. Även om Dahlströms formel är framtagen för dessa återkomsttider visas den för återkomsttider upp till 100 år i bland annat rapport P104 av Svenskt Vatten (2011). Dahlströms formels giltighet vid större återkomsttider diskuteras av Blomquist et al. (2016) i *Riktlinjer för modellering av spillvattenförande system och dagvattensystem*. Rapporten tar upp att de dataserier på nederbörd som idag finns inte är tillräckligt långa för att med god säkerhet ta fram magnituden av ett 100-årsregn, och att alla skattningar får väldigt stora osäkerheter som följd. Blomquist et al. (2016) bedömer därför att Dahlströms formel är den bästa uppskattningen på storleken av ett 100-årsregn som finns tillgänglig för Sverige.

Genom att rita ut ekvation 2 med nederbördsintensitet respektive nederbördsmängd som en funktion av regnets varaktighet för olika återkomsttider kan man få en uppfattning av hur de totala nederbördsmängderna skiljer sig åt beroende på varaktigheten av nederbördstillfället (figur 5 och 6).





Figur 5: Intensitets-varaktighetskurva baserat på Dahlström (2010).



Figur 6: Total nederbörd för skyfall med varierande återkomsttid och varaktighet baserat på Dahlström (2010).

### 2.2.2 Klimatförändringars påverkan på skyfall

När atmosfären blir varmare ökar ofta även antalet skyfall. Detta är delvis en följd av att mättnadsångtrycket för vattenånga ökar med temperaturen vilket leder till att ett varmare luft kan innehålla mer vatten. Grunden till detta fysikaliska samband är beskrivet av Clausius-Clapeyron-ekvationen. Ekvationen beskriver den termodynamiska relationen mellan tryck, ångtryck och temperatur och visar att atmosfärens potentiella vatteninnehåll ökar med cirka 7 % per 1°C temperaturökning (Salomonsson et al. 2017). När det kommer till konvektionsdriven nederbörd är sambandet mellan regnintensitet och temperatur potentiellt ännu större än så. Studier gjorda i Nederländerna visar att intensiteten på konvektivt regn potentiellt ökar med 12 % till 14 % per 1°C temperaturökning, något som i rapporterna benämns som *Super-Clausius-Clapeyron Scaling* (Lenderink et al. 2017; Loriaux et al. 2013).

SMHI har utvecklat en modell på hur klimatet kommer att förändras i Sverige utifrån FN:s klimatpanels (IPCC) utsläppsscenarier (Representative Concentration Pathways) RCP 4.5 och RCP 8.5. Dessa scenarier utgår ifrån hur jordens strålningsbalans kan komma att förändras till följd av ökade framtida antropogena utsläpp av växthusgaser (Olsson, Berg et al. 2017). Utsläppsscenarioet RCP 4.5 förutsätter en konsekvent klimatpolitik, att utsläppen av koldioxid kulminerar runt år 2040 och att jordens befolkning stannar på under 9 miljarder till år 2100. RCP 8.5 är ett scenario för värsta tänkbara fall med fortsatt stora utsläpp av koldioxid och beroende av fossila bränslen, ökade metanutsläpp samt en global befolkning på 12 miljarder vid slutet på seklet (Pachauri et al. 2015; SMHI 2021c). Resultatet av modellen var att volymerna för den extrema korttidsnederbörden till år 2100 kommer att öka med 20 % för RCP 4.5 och 40 % för RCP 8.5 (Olsson, Berg et al. 2017).

Då klimatförändringarna påverkar återkomsttiderna för extrema nederbördstillfällen måste man ta höjd för detta i modellen. Detta görs genom att lägga på en klimatfaktor för att anpassa de extrema nederbördstillfällena till framtidens klimat. Baserat på resultatet ifrån SMHI:s modell av extrem korttidsnederbörd menar Olsson, Berg et al. (2017) att en klimatfaktor mellan 1,1 och 1,4 är rimlig fram till mitten av århundradet och att en högre klimatfaktor mellan 1,3 och 1,4 bör användas mot slutet av århundradet för RCP 8.5 (Olsson, Berg et al. 2017).

## 2.3 Avrinning vid skyfall

Vattnet som tillkommer efter ett nederbördstillfälle kan som regel ta fyra olika vägar: avdunstning, växtupptag, infiltration och ytavrinning. Avdunstningen styrs av faktorer som temperatur, vind och luftfuktighet. Växtupptaget varierar beroende på årstid och den största delen av vattnet som tas upp av växter transpireras. Avdunstning och transpiration benämns tillsammans som evapotranspiration. På grund av låga temperaturer är evapotranspirationen i Sverige generellt relativt låg: årsmedelvärdet i Västmanland var ungefär 500 mm mellan 1961-1978 (Eriksson 1981). Då förloppen vid ett skyfall går snabbt blir evapotranspirationen försumbar i jämförelse med de på kort

tid stora mängderna tillförd nederbörd. De två huvudvägarna som vattnet tar efter ett skyfall är därför infiltration genom marken och ytavrinning (Salomonsson et al. 2017).

Infiltration innebär att vatten tränger ned i marken och beror främst på markens beskaffenhet med avseende på kornstorlek, vattenmättnadsgrad, markytans lutning och markytans råhet. Generellt kan sägas att marktyper med grov kornstorlek som isälvssediment och sandjordar har hög infiltrationskapacitet medan kohesionsjordar som styv lera generellt har en lägre infiltrationskapacitet. Markanvändningen har stor påverkan på infiltrationskapaciteten, i synnerhet i urbana miljöer med stor andel impermeabla ytor som hindrar infiltration (MSB 2017; Sparrenbom & Jeppsson 2022).

## 2.4 Samhällsrisker vid skyfall

Nederbördstillfällena med skyfallsintensitet kan leda till stora samhällsstörningar och kostnader (MSB 2020). Hur känslig en tätort är för ett skyfall beror på en mängd faktorer som ofta är svåra att påverka. Till exempel kan topografin leda till att ytavrinningen koncentreras till vissa stråk eller samlas vid olämpliga platser. Dagvattennätet kan även vara bristfälligt eller underdimensionerat över stora områden vilket kan förvärra situationen ytterligare.

Effekterna på samhället kan beroende på sårbarheten bli många och påverka ett stort antal personer. Vägar, tunnlar och viadukter kan bli vattenfyllda med följden att bilister fastnar och behöver räddas. Erosion kan skada vägar och järnvägsbankar vilket också leder till störningar i trafiken. Viktiga funktioner som hemtjänst, sjuktransport och räddningstjänst blir då potentiellt hindrade och människor har svårt att ta sig till jobb vilket även kan påverka personal och transporter inom sjukvården och andra samhällsviktiga tjänster. Erosion kan leda till skador på dricksvattennätet och vattenkvalitén i ytvattentäkter kan försämrats. Även elnätet kan påverkas om markkablar skadas. Då vatten kan strömma via avloppsledningar riskerar många källare att översvämmas vilket kan leda till stora skador och även skapa sanitära problem (MSB 2020).

Skyfall i urbana miljöer kan även påverka natur och vattenlevande organismer negativt. Reningsverken får svårt att hantera de stora inkommande vattenmängderna vilket kan leda till att de tvingas brädda avloppet med följden att orenat avloppsvatten släpps direkt ut till recipienten. Föroreningar kan lakas ut i vattnet och leda till läckage från bensinstationer och miljöfarlig verksamhet som deponier samt andra områden med förorenad mark (MSB 2020).

# 3 Modell

## 3.1 Metodval vid skyfallskartering

Skyfallskartering kan göras med olika metoder och varierande syfte. Det kan handla om en enkel överblick av potentiella översvänningsområden eller en avancerad analys för dimensionering av dagvattenledningar. Skyfallsmodeller kan delas upp i tre huvudsakliga grupper utifrån hur avancerad modellen är: lågpunktskartering, kartering av markavrinning, samt kartering av markavrinning med hänsyn till modellerat ledningsnät.

En lågpunktskartering ger en statisk bild över lågpunkter och flödesvägar vid ett nederbördstillfälle (MSB 2017). Modellen är inte kopplad till ett regn med definierad återkomsttid och varaktighet utan ska istället ses som en enkel överblick av riskområden. Det medför att risken för översvämning inte kan kvantifieras med den här metoden.

Kartering av markavrinning med eller utan ledningsnät beskriver avrinningen från nederbördstillfälle med bestämd återkomsttid. Det gör det möjligt att kvantifiera risken för att nederbördstillfället ska inträffa under en bestämd tidsperiod. Dessa typer av skyfallskarteringar är till skillnad från lågpunktskarteringar dynamiska vilket innebär att de beskriver ett förlopp med avrinning över tid. Om ledningsnätet inte är med i modellen kan ett schablonmässigt avdrag på nederbördsmängderna göras motsvarande dagvattennätets uppskattade kapacitet. Dagvattennätet spelar en större roll vid mindre intensiva nederbördstillfällen vilket leder till att det oftast inte är lämpligt att göra en markavrinningsmodell med schablonavdrag för återkomsttider kortare än 100 år. När dagvattennätet inkluderas i modellen finns ingen begränsning på återkomsttid och mer avancerade förlopp som tillrinning från ledningsnätet kan modelleras (MSB 2017).

### 3.1.1 Höjdmodell

För att en skyfallskartering ska ge meningsfulla resultat behöver höjdmodellen ha tillräckligt hög upplösning för att visa rinnvägar och potentiella hinder. Generellt rekommenderas en upplösning mellan 1 och 5 m för att konstruktioner som hus och vägar ska kunna beskrivas, risken är annars att utbredningen av översvämningen blir för stor och att vattendjupet potentiellt underskattas som följd. Eftersom höjdmodeller oftast bara läser av markytan måste korrigeringar göras för att sänka marknivån vid strukturer som broar vilka annars skulle stoppa vattenflödet. Marknivån kan även höjas för att representera byggnader som inte finns med i höjdmodellen (MSB 2014, 2017).

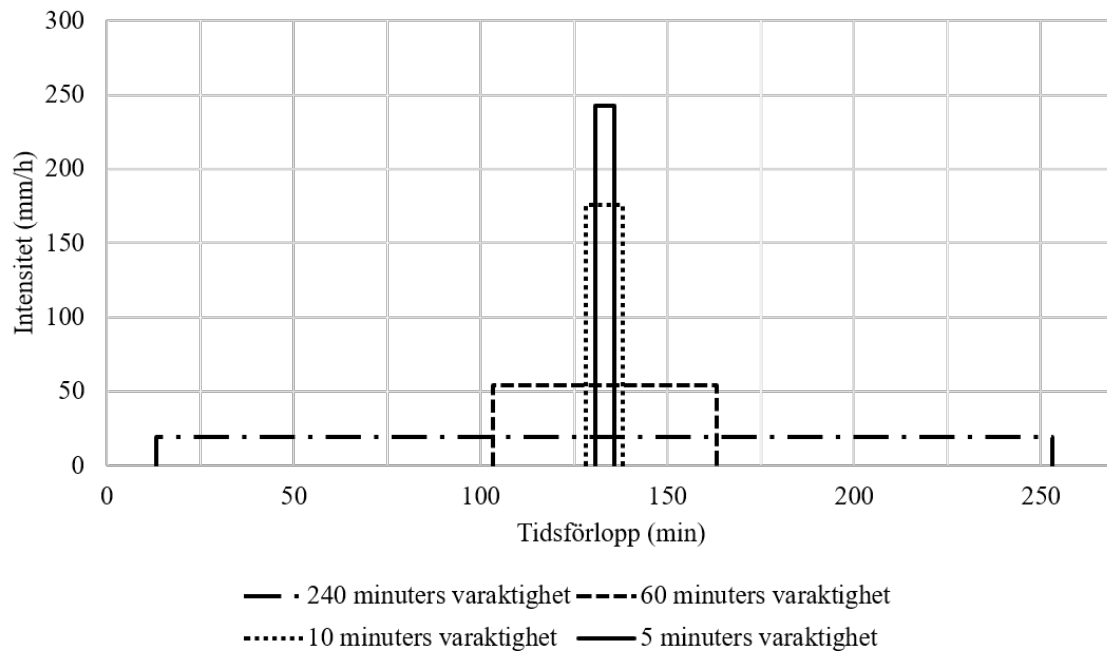
## 3.2 Typregn

För att modellera skyfall krävs indata med den mängd och fördelning av nederbörd som ska falla under en viss tid. Denna indata kan vara i form av mätningar över intensitet och varaktighet från ett verkligt nederbördstillfälle, men vanligtvis används ett så kallat typregn. Ett typregn är ett konstruerat nederbördstillfälle som vanligtvis har

en bestämd återkomsttid och utgår ifrån intensitet-varaktighetskurvor (figur 5). Dessa nederbördstillfällen kan konstrueras på många olika sätt med avseende på totalvolym, intensitetsmaximum och tidsförlopp (Svenskt Vatten 2011).

### 3.2.1 Blockregn

Blockregn är ett enkelt sätt att konstruera ett typregn på där nederbörden har samma intensitet längs hela varaktigheten. Genom att använda Dahlström ekvation (ekvation 2) kan ett volymriktigt nederbördstillfälle med konstant intensitet och bestämd återkomsttid och varaktighet tas fram. Figur 7 visar fyra exempel på hur ett 100-årsregn kan konstrueras som ett blockregn med konstant intensitet. Givet samma återkomsttid blir intensiteten högre hos blockregn med kortare varaktighet, men den totala nederbördsvolymen blir större hos blockregn med längre varaktighet (figur 6).



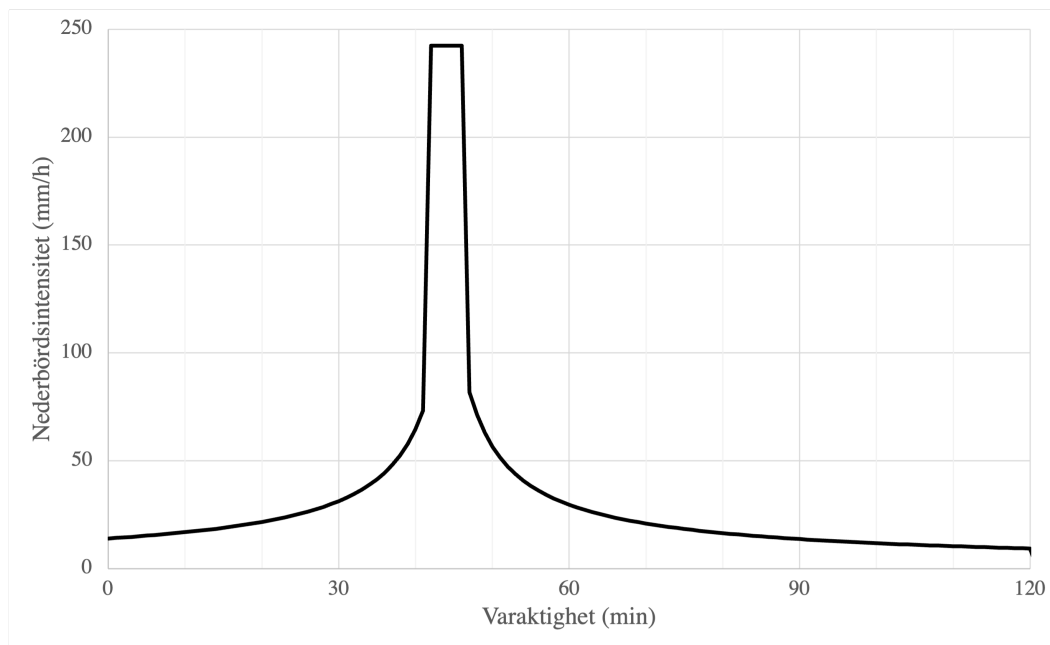
**Figur 7:** Fyra olika 100-årsregn representerade som blockregn med konstant intensitet över hela nederbördsförloppet baserat på Dahlströms formel (ekvation 2).

### 3.2.2 Chicago design storm

Chicago design storm (CDS) är en metod för att skapa ett typregn som togs fram 1975 i USA. CDS-regnet följer en intensitet-varaktighetskurva där regnet ökar och avtar relativt symmetriskt innan och efter intensitetsmaximum. Detta innebär att regnintensiteten varierar under typregnet och det därför blir mer verklighetstroget än ett blockregn (Svenskt Vatten 2011).

Ett CDS-regn för ett skyfall kan konstrueras med Dahlströms formel. Utifrån en lämplig varaktighet på skyfallet bestäms den totala nederbördsmängden av Dahlströms formel

(figur 6). Blomquist et al. (2016) skriver att regnförloppets intensitet bör ha en skevhet så att intensitetsmaximum inträffar mellan 32 och 48 % in i regnets totala tidsförlopp. Intensitetsmaximum pågår under en kort tid och har samma intensitet som ett blockregn med motsvarande varaktighet enligt Dahlströms formel. Nederbördsintensiteten före och efter intensitetstoppen har sedan en exponentiellt ökande respektive avtagande intensitet. Ett avdrag på intensiteten görs även före och efter maximum så att skyfallet som helhet blir volymriktigt för den totala varaktigheten, det vill säga att den totala regnvolymer motsvarar regnvolymer för ett blockregn med samma varaktighet (Blomquist et al. 2016).



**Figur 8:** CDS-regn med total varaktighet på 120 minuter och en 5 minuter lång intensitetstopp med skevheten 0,37 baserat på Dahlströms formel (ekvation 2).

### 3.3 Dagvattennätets kapacitet

Sambandet mellan dimensionerande flöde, dimensionerande nederbördsintensitet och övriga faktorer som avrinningsområdets area, klimatfaktor och avrinningskoefficient kan uppskattas med rationella metoden (ekvation 3). Denna finns bland annat beskrivet i rapport P110 av Svenskt Vatten och relaterar till Dahlströms formel (ekvation 2).

$$q_{dagdim} = A * \phi * i(t_r) * kf \quad (3)$$

$q_{dagdim}$  är det dimensionerande flödet [L/s],  $A$  är avrinningsområdets area [ha],  $\phi$  är avrinningskoefficienten och  $kf$  är klimatfaktorn.  $i(t_r)$  är den dimensionerande nederbördsintensiteten [L/(s\*ha)] som bestäms med Dahlströms formel (ekvation 2).  $t_r$  är

varaktigheten på regnet vilket antas vara samma som den längsta rinntiden i delavrinningsområdet (Svenskt Vatten 2016).

### 3.4 Modelleringsprogrammet HEC-RAS

Hydrologic Engineering Center River Analysis System (HEC-RAS) är en mjukvara för att göra hydrauliska modeller som utvecklats av USA:s armés ingenjörskår. Det är en öppen programvara som kan användas för att göra en- och tvådimensionella (2D) hydrauliska modeller med konstant eller varierat flöde (Brunner 2016). För skyfallsanalyser av stadsmiljöer behövs 2D-modeller med ett varierat ostadigt flöde.

### 3.5 2D-modellering i HEC-RAS

Hydraulisk modellering i två dimensioner utgår ifrån topografisk höjddata för att bestämma flödets storlek och riktning. Det är två principer som styr flödet av vattenmassorna: bevarandet av massa och bevarandet av rörelsemängd. I del 3.5.1 och 3.5.2 beskrivs hur ekvationerna är uppbyggda i HEC-RAS och vilka antaganden som görs i beräkningarna. En viktig aspekt som kan påverka resultatet vid 2D-modellering i HEC-RAS är beräkningsnätet som utgör grunden för var alla flödesberäkningar görs över tid och rum i modellen. Hur beräkningsnätet fungerar beskrivs i del 3.5.3. Vattenytan i en 2D-modell beror på dess topografiska placering  $z(x, y)$  som är en funktion av de horisontella lägesvariablerna  $x$  och  $y$  (motsvarande exempelvis nord och öst i en karta) samt vattendjupet  $h(x, y, t)$  på platsen vid en given tid  $t$ . Vattenytans position kan således skrivas  $H(x, y, t) = z(x, y) + h(x, y, t)$  (Brunner 2016).

#### 3.5.1 Bevarande av massa

Genom antagandet att vätskan är inkompressibel gäller kontinuitetsekvationen, det vill säga att summan av ingående flöden är samma som utgående flöden tillsammans med förändringen i lagrad volym, på vektorform uttryckt som ekvation 4.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \bullet hV + q = 0 \quad (4)$$

$\nabla$  är den partiella derivatan med avseende på  $x$  och  $y$  ( $\partial/\partial x$ ,  $\partial/\partial y$ ) och  $q$  beskriver flödet. Den integrerade formen av ekvation 4 kan då skrivas som ekvation 5.

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} d\Omega + \iint_S V \bullet n dS + Q = 0 \quad (5)$$

$\Omega$  är vätskans volym,  $S$  är gränserna med en normalvektor  $n$ .  $Q$  är en term som motsvarar in- och utgående flöden som ej är i x- eller y-led, dessa kan till exempel vara infiltration, nederbörd eller evaporation.

#### 3.5.2 Bevarande av rörelsemängd

Navier-Stokes ekvationer beskriver rörelsen av en vätska i tre dimensioner. I samband med modellering av flöden och översvämningar är den horisontella skalan betydligt stör-

re än den vertikala vilket leder till att den vertikala termen för hastighet kan försummas (Brunner 2016). Hydrostatiskt tryck, okomprimerbart flöde och uniform densitet antas också. Dessa antaganden leder till en förenklad form av Navier-stokes ekvationerna som kallas Saint Venant-ekvationerna eller Shallow Water-equations (ekvation 6 och 7).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v - f u \quad (7)$$

Där ekvation 6 beskriver flödet i x riktning och ekvation 7 beskriver flödet i y-riktning. Högerledet beskriver accelerationen där  $v$  och  $u$  är hastigheterna i det kartesiska koordinatsystemet. Vänsterledet beskriver de interna och externa krafterna som verkar på vätskan där  $g$  är tyngdaccelerationen,  $v_t$  är en koefficient för turbulens och virvelbildning och  $f$  är en parameter för Corioliskraften.  $c_f$  är en koefficient för bottenfriktion som bestäms med hjälp av Chézys formel (ekvation 8).

$$c_f = \frac{n^2 g |V|}{R^{3/4}} \quad (8)$$

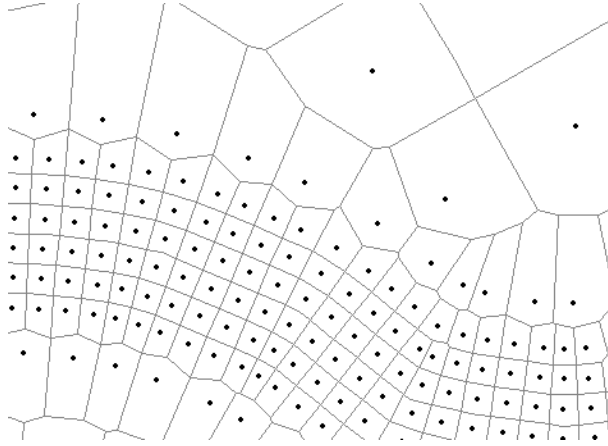
Där  $n$  är Mannings friktionskoefficient,  $R$  är den hydrauliska radien, och  $|V|$  är hastighetsvektorns magnitud (Brunner 2016).

### 3.5.3 Beräkningsnät

Vid 2D-modellering i HEC-RAS används ett så kallat beräkningsnät som läggs över höjddmodellen (Brunner 2016). HEC-RAS beräkningsnät består av polygoner (celler) som kan ha variabel storlek och geometri med begränsningarna att varje cell måste vara konvex och max ha 8 sidor av prestandaskäl. I varje cell definieras även en mittpunkt som är placerad så att den linje som skär mellan två cellers mittpunkt är ortogonal med sidan som cellerna delar (figur 9) (Casulli 2009).

Beräkningsnätet i HEC-RAS skiljer sig från många andra 2D-modelleringsprogram genom att höjden inte antas vara konstant för varje cell. Detta leder till att när beräkningsnätet blir större minimeras förlusten av höjddata i simuleringen (Forest 2020). Sidorna på varje cell läses av topografin på samma sätt som ett tvärsnitt. Dessa tvärsnitt som cellen utgörs av används sedan för att beräkna flöden till och från närliggande celler. Beräkningsnätet innehåller information om förhållandet mellan höjden och variabler som volym, hydraulisk radie och tvärsnittsarea. Dessa förhållanden kan beräknas i förväg baserat på cellernas utformning vilket gör att beräkningstiden för modellen går snabbare än om de skulle behöva räknas ut i varje tidssteg. När beräkningsnätet bestäms är det viktigt att ytor som kan påverka flödet som dammvallar och liknande hamnar på gränsen mellan två celler, annars kommer den topografiska datan gå förlorad vid flödesberäkningarna (Brunner 2016).





**Figur 9:** Ett exempel på beräkningsnät med mittpunkter i HEC-RAS 2D-modell.

### 3.5.4 Cellstorlek och tidssteg

Saint Venant-ekvationerna som beskriver hur vattnet flödar i modellen är differentialekvationer som måste lösas numeriskt. Eftersom vattenytan och flödet varierar både i tid och rum måste dessa lösas för varje cell i beräkningsnätet vid varje tidssteg. Vid inställning av tidssteget bör man både ta hänsyn till vilka flödes hastigheter och cellstorlekar modellen har. Ett mått på hur väl tidssteget är anpassat i modellen är Courantvärdet. Courantvärdet varierar beroende på cellernas storlek och tidssteget som används (ekvation 9 och 10).

$$C = \frac{V\Delta T}{\Delta X} \leq 1.0 \quad (9)$$

Med  $C = 1$  kan ekvation 9 uttryckas som:

$$\Delta T \leq \frac{\Delta X}{V} \quad (10)$$

Där  $C$  är Courantvärdet,  $V$  är flood wave velocity,  $\Delta T$  är tidssteget och  $\Delta X$  är cellstorleken. När Saint Venant används rekommenderas ett Courantvärde på 1, men i vissa fall kan det vara så högt som 3 utan att modellen påverkas negativt. Rent intuitivt kan Courantvärdet beskrivas som antalet celler som flödet passerar per tidssteg. En modell med små celler eller snabba flödes hastigheter behöver därav mindre tidssteg för att Courantvärdet inte ska bli för högt. Inställningen av tidssteg i HEC-RAS kan göras automatiskt genom att Courantvärdet räknas ut av programmet, alternativt kan även tidssteget ställas in manuellt av användaren för att förbättra prestandan (Brunner 2022).

### 3.5.5 Nederbördssimulering i HEC-RAS (Rain on grid)

I HEC-RAS är det möjligt att lägga in ett typregn som faller över modellen och detta möjliggör att modellera avrinning från nederbörd i programmet. Nederbörden kan läggas till på två olika sätt i modellen, antingen som ett globalt gränsvärde, det vill säga att det regnar med samma intensitet och varaktighet över hela modellen, eller som lokala regn endast för vissa celler. Då beräkningar vanligtvis görs för ett stort antal celler har HEC-RAS-modeller med nederbörd som gränsvärde generellt sett långa körningstider. Vid nederbördssimulering i HEC-RAS kan stabilitetsproblem uppstå vid platser med kraftig lutning som exempelvis vid sluttningar eller byggnader (Brunner 2022; Goodell 2018).

### 3.5.6 Geospatiala lager

Det är fler faktorer än höjdskillnader som påverkar avrinningsbildningen i en hydraulisk modell. För att den hydrauliska modellen ska representera verkligheten på ett tillfredställande sätt kan flera anpassningar göras i HEC-RAS-terrängen som påverkar modellens parametrar.

Markanvändningslager kan läggas in för att kategorisera olika områden baserat på hur de används. Markanvändningen påverkar ytavrinningen i modellen genom att påverka flödes hastighet och permeabilitet (Brunner 2022). Markanvändningen påverkar Mannings friktionskoefficient vilket leder till skillnader i vattenhastighet. Olika markanvändning påverkar även hur permeabel marken är, det vill säga hur stor del av vattnet som kan ta sig igenom ned till jorden under markanvändningslagret. När lagret är skapat kan värden för Mannings tal och permeabilitet tas från lämplig litteratur och användas för respektive markanvändningsklassificering. Jordarter kan på samma sätt som markanvändning definieras som ett lager genom import av shapefiler. Genom att kombinera markanvändningslagret med jordartslagret kan en modell som både tar hänsyn till markanvändningens påverkan och jordarternas permeabilitet tas fram (Brunner 2022).

### 3.5.7 Infiltrationsmetoder

Det finns i HEC-RAS version 6.0 tre olika metoder för att modellera infiltration. Dessa är *SCS Curve Number*, *Deficit and Constant* och *Green-Ampt* (Brunner 2022). I denna del beskrivs endast metoden *SCS Curve number* då det var den infiltrationsmetoden som användes i modellen.

SCS Curve number-metoden utvecklades av US Department of Agriculture (USDA). Det är en metod som baserats helt på empirisk data över avrinning och nederbörd i små avrinningsområden. Med grund i datan har man uppskattat hur infiltration och avrinning varierar på faktorer som nederbördsmängd, jordarter, markanvändning och jordens vattenhållande förmåga (Jun et al. 2015). För att använda metoden i HEC-RAS behöver varje cell ha minst två olika variabler som är baserade på markens egenskaper, *Curve Number (CN)* och *initial abstraction ratio (r)*.

Principen bygger på två huvudsakliga antaganden (Wang & Bi 2020). Det första antagandet är ekvation 11 och beskriver sambandet mellan nederbörd, infiltration och avrinning.

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \quad (11)$$

$F$  är infiltrationen [mm],  $P$  är nederbördsmängden [mm],  $S$  är *potential maximum soil retention* [mm],  $Q$  är ytavrinning [mm] och  $I_a$  är *initial abstraction* [mm]. Det andra antagandet är att sambandet mellan *initial abstraction* och *potential maximum soil retention* kan skrivas som ekvation 12.

$$I_a = rS \quad (12)$$

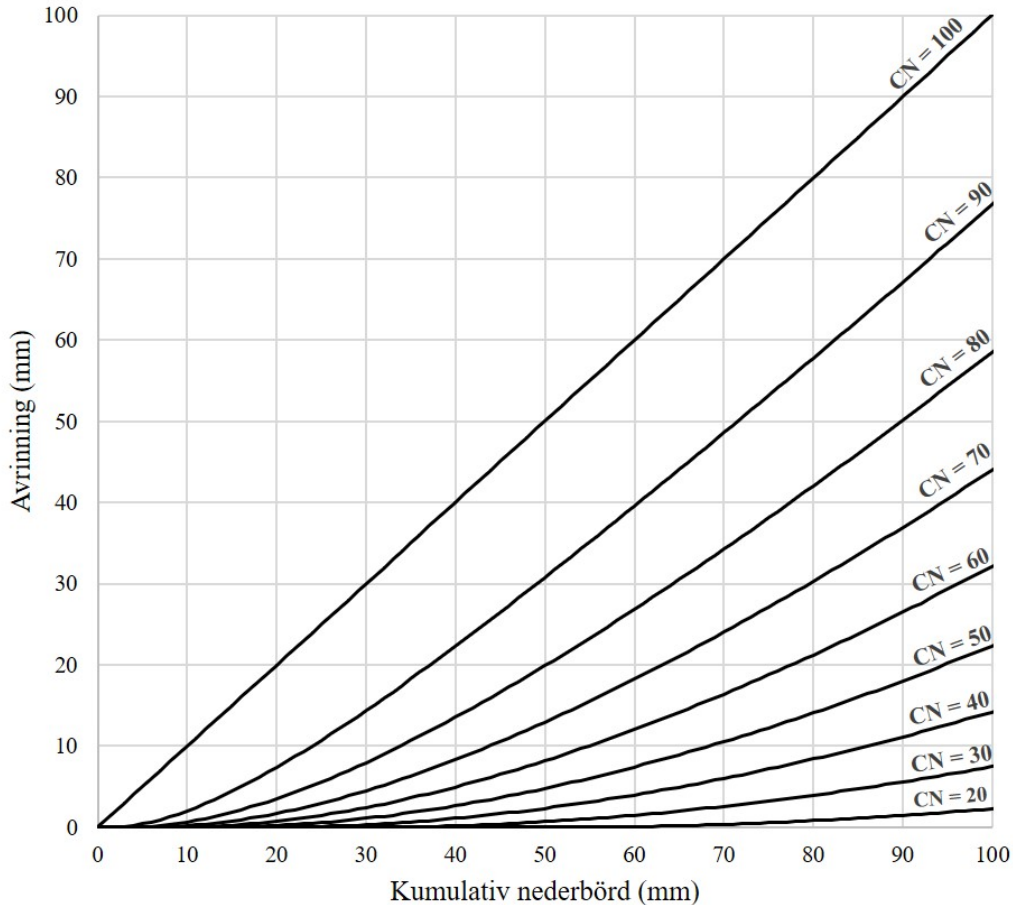
*Initial abstraction ratio* ( $r$ ) beskriver hur mycket nederbörd som måste falla innan marken genererar avrinning. Variabeln kan ses som en uppskattning av flera faktorer som exempelvis interception, infiltration och evaporation (Hjelmfelt 2004). Genom att kombinera ekvation 11 och 12 och kombinera dem enligt vattenbalansen  $P = I_a + F + Q$  får man en ekvation där avrinningen  $Q$  beror både på nederbörden  $P$  och *potential maximum soil retention* (ekvation 13) (Wang & Bi 2020).

$$Q = \frac{(P - rS)^2}{P + (1 - r)S} \quad (13)$$

*Potential maximum soil retention*  $S$  relaterar i sin tur med det ovan nämnda *Curve Number* (CN) med ekvation 14.

$$CN = \frac{1000}{10 + \frac{S}{25,4}} \quad (14)$$

*Curve Number* (CN) baseras på empirisk data och beror på faktorer som jordart, infiltrationskapacitet och markanvändning. Talet varierar vanligtvis mellan 20 och 100 där 100 betyder att all nederbörd bildar ytavrinning (Hjelmfelt 2004). Passande CN-värden delas upp beroende på jordart, markanvändning och i vissa fall hydrologiskt skick. Jordarterna delas in i fyra olika klasser beroende på infiltrationskapacitet: A, B, C och D. A motsvarar de jordarter som har högst infiltrationskapacitet, bland dessa tillhör bland annat isälvssediment. Infiltrationskapaciteten minskar sedan successivt i klass B respektive C. Klass D motsvarar de jordarter som har lägst infiltrationskapacitet och genererar en stor del avrinning, till exempel styva leror (USDA 2009a). Det hydrologiska skicket bör bestämmas i fält och beskriver till exempel om en gräsmatta har kala fläckar eller om en hagmark är överbetad. Tabellvärden för en mängd olika CN-tal finns beskrivet i bland annat *Urban Hydrology for Small Watersheds* (USDA 1986). Hur olika CN-tal rent praktiskt påverkar mängden avrinning kan ses i figur 10.



**Figur 10:** Avrinning baserat på kumulativ nederbörd beroende på CN-parametern. Initial abstraction ratio-parametern är i detta fall 0,05.

Avdraget beroende på CN-tal i SCS curve number-metoden görs direkt på nederbörds-mängden och sker inte dynamiskt över tid i skyfallsmodellen beroende på jordens infiltration kapacitet (Hawkins et al. 2009). HEC-RAS utvecklare har lagt till en extra parameter för att en infiltration som sker över tid ändå ska kunna räknas med, *minimum infiltration rate* (Brunner 2022).

### 3.6 Känslighetsanalys på modellen

I bästa fall kan en skyfallsmodell kalibreras med tidigare uppmätt nederbördsdata för att se hur väl modellen överensstämmer med ett verkligt översvämningstillfälle. Skyfall är relativt sällsynta och ofta dåligt dokumenterade förlopp så det är tyvärr sällan möjligt att använda verklig data. Detta leder till osäkerheter i resultatet som bör undersökas. Ett sätt att undersöka modellens trovärdighet är att göra en känslighetsanalys. En känslighetsanalys innebär att parametrar som påverkar flödet och som kan anpassas i modellen varieras mellan olika simuleringar för att se till vilken grad de påverkar översvämningens utbredning. Parametrar att variera som kan ge stor påverkan i modellen är till exempel infiltration och Mannings tal (markytans råhet), men andra faktorer som

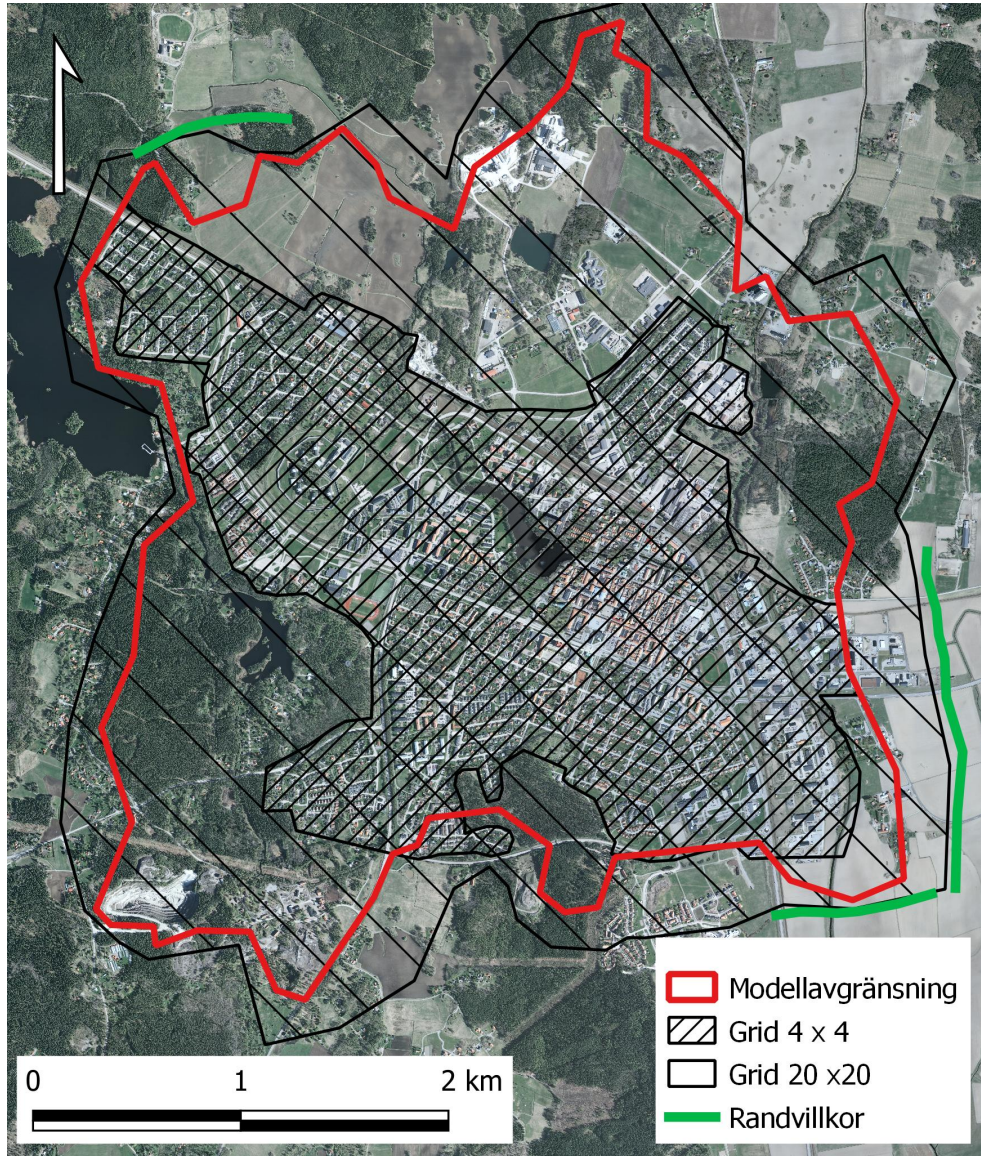
beräkningsnätets storlek och anpassningar i höjdmodellen kan även påverka slutresultatet (MSB 2014, 2017).

## 4 Metod

För själva skyfallskarteringen användes HEC-RAS version 6.3 och resultaten sammanställdes sedan med GIS-programmet QGIS version 3.26.2. Hela modelleringsprocessen i HEC-RAS gjordes steg för steg där modellen började så enkla inställningar som möjligt och Couranttal, volymfel i modellen och antal iterationer kontrollerades så fort nya detaljer lades till.

### 4.1 Modellavgränsning och beräkningsnät

Avgränsningen för skyfallsmodellen sattes med utgångspunkt i gränserna för avrinningsområdet som går igenom Sala. Dessa gränser uppskattades i programvaran Scalgo. För att modellområdet inte skulle bli för stort klipptes delar i avrinningsområdet uppströms Sala stad bort. Dessa delar av det verkliga avrinningsområdet låg utanför tätorten ansågs de inte vara relevanta att ha med i skyfallsmodellen. Detta gjordes vid Lillåns inlopp från Långforsen och vid Sagån i norra delen av modellen. De yttre gränserna för själva beräkningsnätet sattes sedan med god marginal utanför denna avgränsning (figur 11).



**Figur 11:** Område i modellen med 20 x 20 m respektive 4 x 4 m beräkningsnät. Modellens randvillkor ses i grönt. Ortofoto: RGB 0,5 m (2012) ©Lantmäteriet.

#### 4.1.1 Anpassning av beräkningsnät

Skyfallsmodellen delades upp i två olika delområden med en högre respektive lägre upplösning (figur 11). De centrala och bebyggda områdena kring Sala stad avgränsades med hjälp av satellitbilder och karta över markanvändning från Lantmäteriet. Upplösningen för denna del av modellen sattes till 4x4 m. En upplösning på 4x4 m rekommenderas av MSB (2017) vid översiktliga skyfallskarteringar över större områden då det håller nere beräkningstiderna samtidigt som upplösningen är tillräckligt hög för att urskilja mindre detaljer som vägar. Figur 12 visar ett exempel på hur beräkningsnätet såg ut i centrala Sala.



**Figur 12:** Exempel på beräkningsnät i centrala Sala. Ortofoto: RGB 0,25 m (2018)  
©Lantmäteriet.

Delområdet utanför den huvudsakliga bebyggelsen kring Sala stad består till stor del av skog och åkermark. Denna del bidrog till flöden i Sagån, Lillån och Pråmån vilka påverkade vattennivåer i de centralare delarna av Sala stad. Upplösningen i detta delområde sattes till 20x20 m för att hålla beräkningstiden nere.

Ytterligare anpassningar i beräkningsnätet gjordes sedan med breaklines. Dessa användes vid vägar och vattendrag så att vattenflöden ungefär var parallella med rutnätet. Detta gjordes för att förbättra stabiliteten och säkerställa att viktiga detaljer i höjdmodellen inte gick förlorade. Inlagda breaklines i modellen kan ses i bilaga A.

## 4.2 Randvillkor

För att vatten ska kunna flöda ut ur modellen behövs randvillkor längs med den yttre gränsen för beräkningsnätet. Detta modellerades genom att använda randvillkoret *normal depth* vilket motsvarar lutningen av terrängen. Lutningen togs fram genom att läsa av terrängen med RAS-mappers mätverktyg och gränsvillkor lades in i modellen på tre olika platser (tabell 2 och figur 11).

**Tabell 2:** Inlagda randvillkor i modellen

Plats	Lutning (m/m)
Utlopp Sagån	0,0003
Öst om Sala	0,004
Norr om Sala	0,003

### 4.3 Modellerat typregn

Samma nederbördstillfälle med bestämd intensitet och varaktighet användes över hela modelldomänen. Ett schablonmässigt avdrag gjordes för de delar av Sala som har ett dagvattennät. Kapaciteten för detta avdrag uppskattades i del 4.3.1. Nederbördstillfället modellerades som ett CDS-regn vilket beskrivs närmare i del 4.3.2.

#### 4.3.1 Dagvattennätets kapacitet

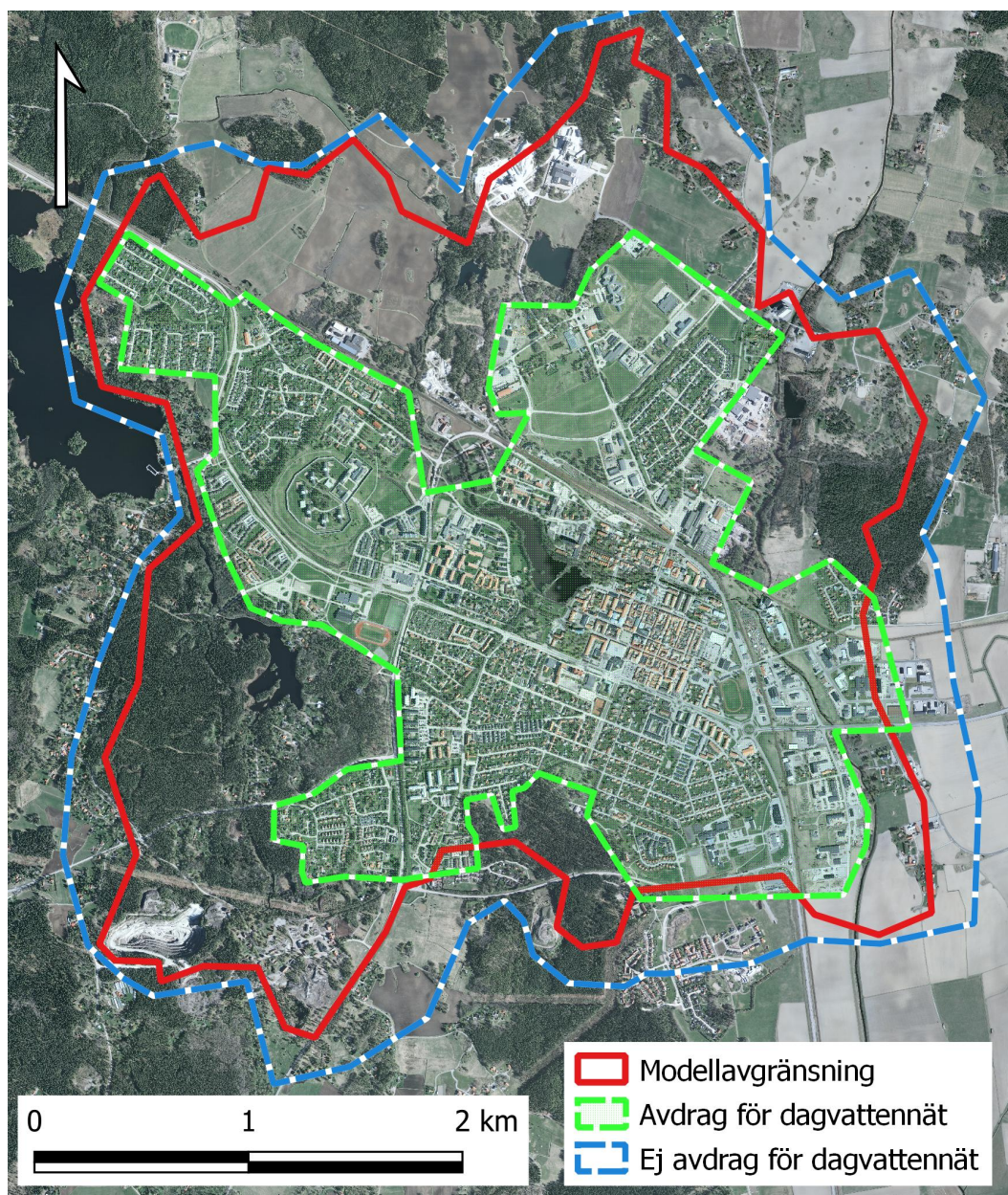
Dimensionen på dagvattennätet i Salas centrala delar uppskattades av Sala kommun kunna avleda ett regn med två till fem års återkomsttid. För att ta höjd för att kapaciteten kan variera på olika platser i kommunen och för att inte överskatta ledningsnätets kapacitet antogs att dagvattennätet klarar av att avleda ett regn med två års återkomsttid. Med hjälp av en översiktskarta på tekniska avrinningsområden i Sala kunde kapaciteten för dagvattennätet i olika delar av staden uppskattas (bilaga C). Detta gjordes med hjälp av rationella metoden (ekvation 3) och baserades på den längsta rinntiden i varje avrinningsområde. Rinntiden togs fram genom att mäta den längsta sträckan till utsläppspunkten i avrinningsområdet och anta att vattnet typiskt rinner med en hastighet på cirka 1,5 m/s vilket motsvarar hastigheten i en dagvattenledning (Svenskt Vatten 2016). Rinntiderna med respektive dimensionerande flöde presenteras i tabell 3.

**Tabell 3:** Uppskattade kapaciteter hos dagvattennätets olika delområden (bilaga C) vid dimensionering för ett tvåårsregn

Delområde	Sträcka (km)	Rinntid (min)	Kapacitet 2 års återkomsttid (mm/h)
1	1,1	12	8,6
2	1,5	17	12,6
3	1,9	21	12,4
4	1,6	18	6,9
5	1,5	17	7,2
6	1,2	13	16,4
7	0,7	8	24,1
8	1	11	18,2
9	1	11	9,1
<b>Medelvärde</b>	1,3	14	12,9



För att förenkla modellen och inte överskatta kapaciteten i nätet antogs hela dagvattennätets kapacitet motsvara kapaciteten i centrala Sala (delområde 3 i tabell 3 och bilaga C). Denna kapacitet ligger nära medelvärdet av alla uppskattade kapaciteter i Sala vid dimensionering efter ett tvåårsregn (tabell 3). Dimensioneringskraven för dagvattensystem har varierat historiskt och kapaciteten kan därför bero på när nätet byggdes. Dimensionering för ettregn med två års återkomsttid var minimumkravet från Svenskt Vatten innan rapport P90 som publicerades 2004. Därefter sattes dimensioneringskraven till fem respektive tio års återkomsttid. I P110 av Svenskt Vatten (2016) skärptes kraven för dagvattensystem ytterligare (Salomonsson et al. 2017).



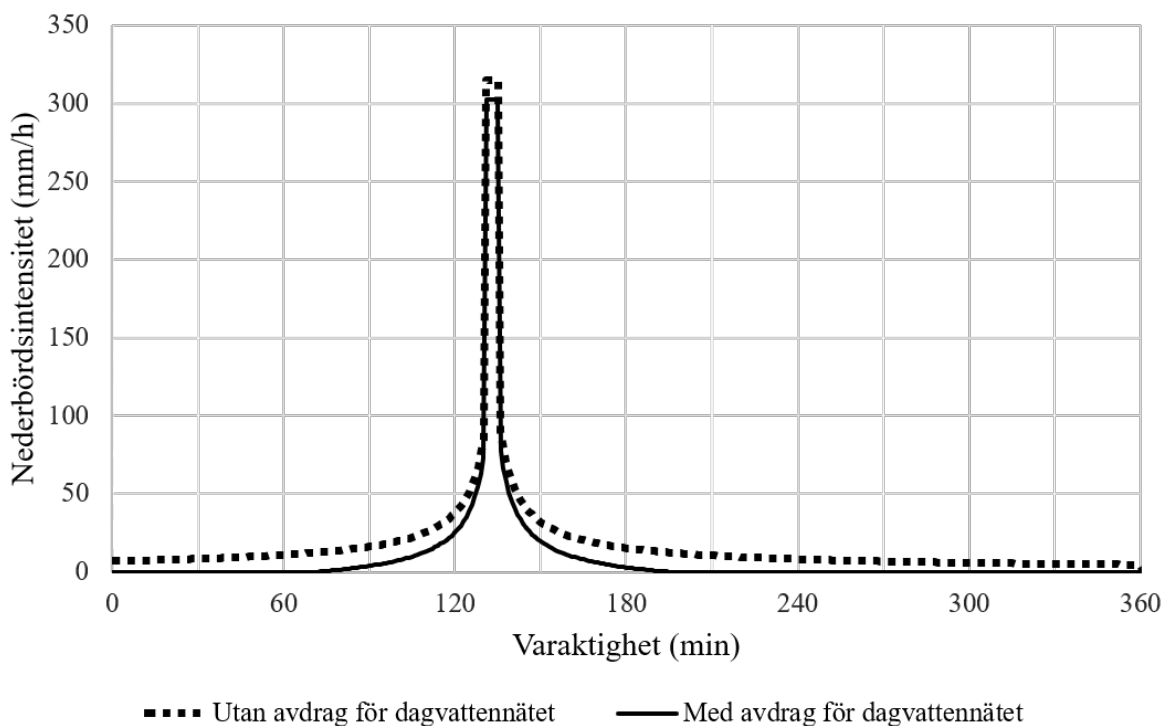
**Figur 13:** Område i modellen där avdrag för dagvattennät gjordes på typregnet. Ortofoto: RGB 0,5 m (2012) ©Lantmäteriet.

### 4.3.2 CDS-regn

Typregnet modellerades som ett CDS-regn med varaktigheten 6 timmar där skevheten på intensitetstoppen sattes till 0,37 enligt rekommendationer i P104 av Svenskt Vatten (2011). Bredden på intensitetstoppen var fem minuter och en klimatfaktor på 1,3 användes vilket ligger inom intervallet framtaget av Olsson, Berg et al. (2017). För områden med dagvattennät enligt figur 13 gjordes ett schablonavdrag på regnet motsvarande ledningskapaciteten. Typregnets intensitet och totala nederbörds mängd med respektive utan dagvattennät finns i tabell 4 och figur 14.

**Tabell 4:** Sammanlagd nederbörds mängd och maximal intensitet i modellen med respektive utan avdrag för dagvattennät

CDS-regn	Sammanlagd nederbörd (mm)	Maximal intensitet (mm/h)
Utan dagvattennät	109	315
Med dagvattennät	53	302



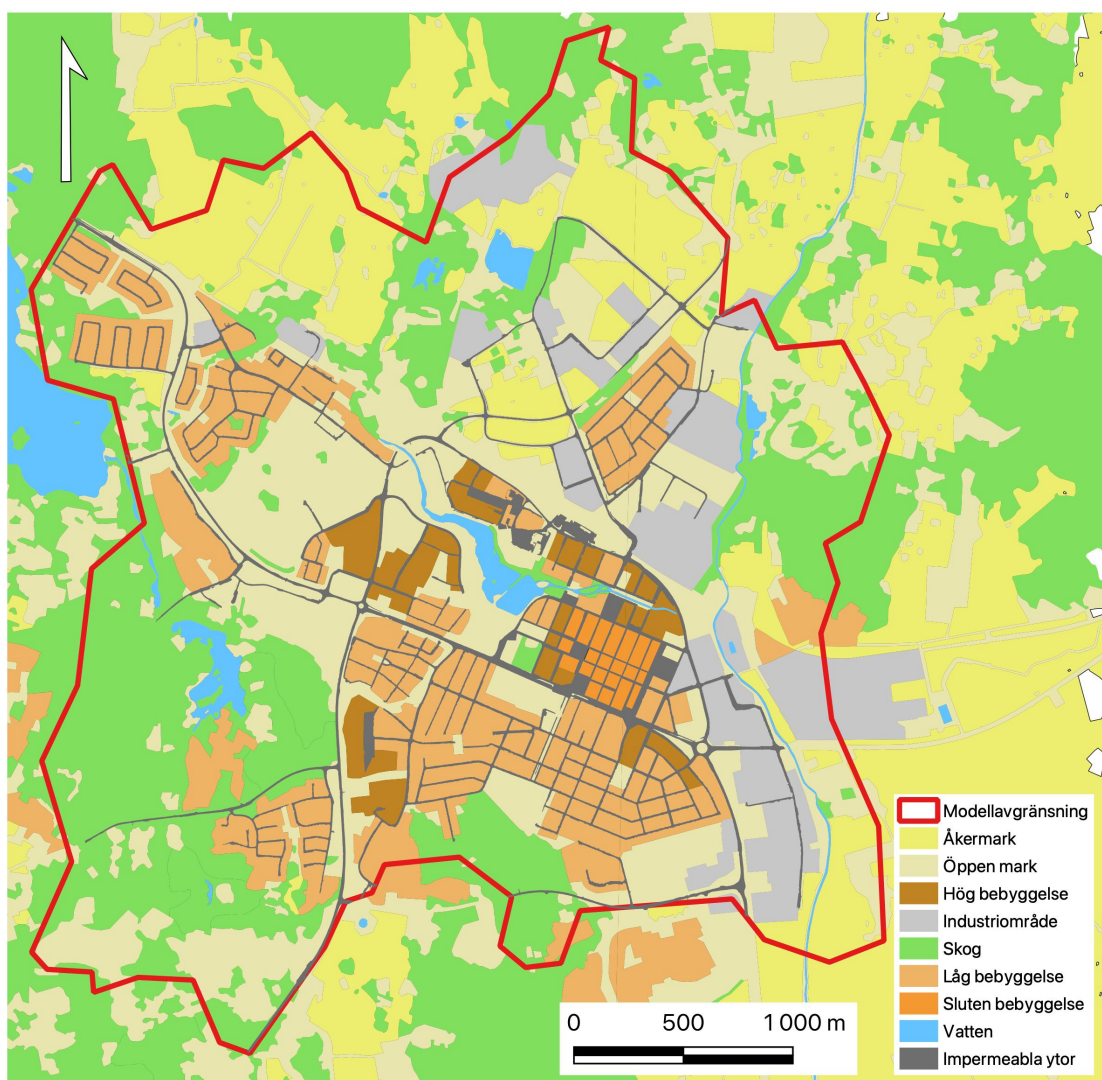
**Figur 14:** Typregnet som användes i modellen med respektive utan avdrag för dagvattennät.

## 4.4 Val av parametervärden i skyfallsmodellen

Parametervärden i modellen används för att beskriva flödesmotstånd och infiltration och beror på markanvändningen och jordarter i området. Denna del beskriver hur dessa parametrar togs fram.

#### 4.4.1 Markanvändning

Klassificering av markanvändning gjordes med hjälp av Lantmäteriets karta *Topografi 10 nedladdning, vektor* (hämtningsdatum 2022-09-16). Då potentiellt aktuella och intressanta områden som större hårdgjorda ytor och vägar inte finns med i detta lager lades de till manuellt. Detta gjordes genom att använda en karta över impermeabla ytor i Sala från Scalgo. I QGIS kunde sedan ploygonen som motsvarade vägnätet exporteras till en ny shapefil. Denna shapefil klipptes sedan till för att ta bort mindre ytor som uppfarter och cykelvägar så att de minsta detaljerna i markanvändningslagret motsvarade ungefär samma storleksordning som beräkningsnätet. Därefter sammanfogades shapefilen med markslagskartan från Lantmäteriet. Resultatet av klassificeringen kan ses i figur 15.



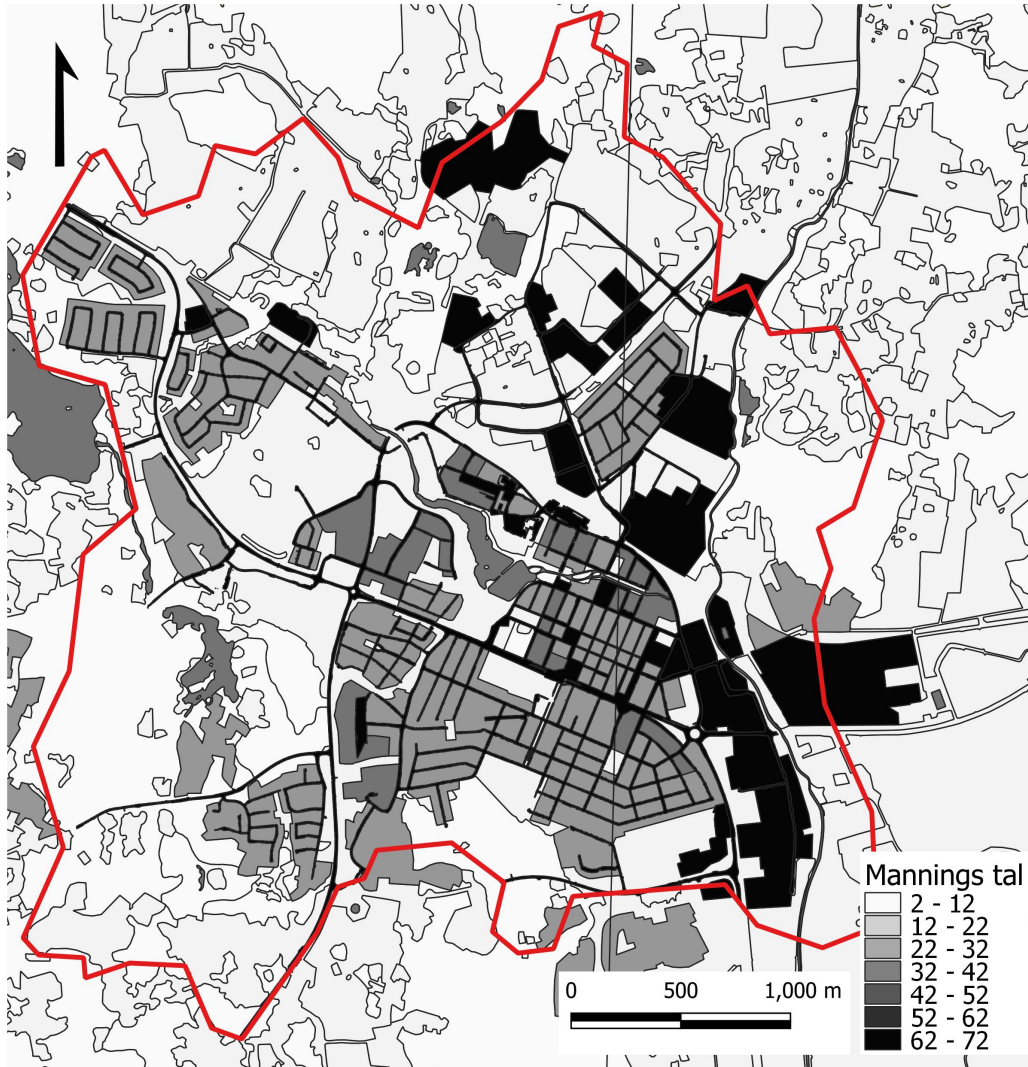
**Figur 15:** Markanvändning i Sala stad. Källa: Topografi 10 nedladdning, vektor (2022) ©Lantmäteriet.

#### 4.4.2 Mannings tal

Mannings tal är en variabel som beskriver råheten på markytan vilket i sin tur påverkar flödesmotståndet för vattnet. Ju högre Mannings tal är desto mindre blir flödesmotståndet (MSB 2017). Lämpliga Mannings tal bedömdes med litteratur från tidigare skyfallskarteringar och satellitbilder som grund. Rapporterna har små skillnader men stämmer relativt väl överens. Mannings tal för hårdgjorda ytor är för samtliga rapporter 70, innerstadsbebyggelse har mellan 40 och 50 i Mannings tal och villabebyggelse har 30 i Mannings tal i de två rapporter där det är definierat (Dyrestam & Hallerbäck 2019; Kaiser & Rieger 2019; Pramsten 2015; Risberg 2015; Åkesson 2021). Mannings tal som användes i denna rapport kan ses i tabell 5 och figur 16.

**Tabell 5:** Mannings tal i modellen för olika markanvändningar

<b>Markanvändning</b>	<b>Mannings tal</b>
Bebyggelse hög	40
Bebyggelse industri	70
Bebyggelse låg	30
Bebyggelse sluten	40
Åkermark	5
Öppen mark	5
Torg/hårdgjorda ytor	70
Barrskog	2
Lövskog	2
Vatten	40



**Figur 16:** Mannings tal i modellen. Källa: Topografi 10 nedladdning, vektor ©Lantmäteriet.

#### 4.4.3 Infiltration med SCS curve number-metoden

För att ge modellen olika *Curve Numbers* behöver markanvändningen och jordarterna klassas enligt *National Engineering Handbook* av USDA (2009). För att denna klassning ska bli så korrekt som möjligt krävs kunskap om markens beskaffenhet med avseende på bland annat djup till grundvatten, permeabilitet samt sand- och lerhalt (USDA 2009a). Flera antaganden har därför behövs göras med grund i SGU:s jordartskarta och satellitbilder (SGU 2022). Jordartsindelningen i SGU:s jordartskarta ger en antydning om ler- och sandhalter, men mer exakta lerhalter framgår inte. För att få en mer precis uppskattning av lerhalterna i Sala användes därför data ur digitala åkermarkskartan (Söderström & Piikki 2016). Lerhalten för åkermark i området ungefär låg runt 30 till 40 %. Leran i området antogs därför tillhöra klass D vilket motsvarar en lerhalt på 40 % (USDA 2009a). Resultatet av klassningen baserat på jordart ses i tabell 6.

**Tabell 6:** Klassificering av jordartsgrupper i modellen utifrån USDA (2009a)

Jordart	Klass	Minsta infiltrationskapacitet (mm/h)
Sandig morän	C	1,3
Postglacial lera	D	0
Glacial lera	D	0
Fyllning	C	1,3
Kärrtorv	D	0
Mossetorv	D	0
Isälvs sediment	A	7,6
Postglacial sand	B	3,8
Gyttjelera	D	0
Svåmsediment ler silt	C	1,3

Markanvändning enligt SCS curve number-metoden delades in baserat på markanvändningslagret som togs fram i del 4.4.1 och klassades mot motsvarande markanvändning från tabell 9-1 och 9-5 i *Hydrologic Soil-Cover Complexes* av USDA (2009b). För samtliga naturtytor antogs att det hydrologiska skicket var bra vilket motsvarar att mer än 75 % av markytan är täckt av växtlighet (USDA 2009b). Åkermarken antogs vara sådd med spannmål. Klassningen baserat på markanvändning ses i tabell 7.

**Tabell 7:** Klassificering av markanvändning i modellen utifrån USDA (2009b). Uppskattad klass är lämnad oöversatt för att överensstämma med källan

Markanvändning	Klass	Procent impermeabel
Odlad åker	Small grain straight row	0 %
Öppet torg	Impervious area	100 %
Öppen mark	Open space	0 %
Bebyggelse industri	Urban district - industrial	72 %
Bebyggelse låg	Residential district 1/2 acre	25 %
Bebyggelse hög	Residential district 1/8 acre or less	65 %
Bebyggelse sluten	Urban district - commercial and business	85 %
Skog	Woods	0 %
Vägar	Impervious area	100 %
Vatten	CN = 100	100 %

Klassningen av markanvändning respektive jordart kombinerades och CN-tal kunde utläsas från tabell 9-1 och 9-5 i *Hydrologic Soil-Cover Complexes* av USDA (2009b). Dessa tabeller räknar med att parametern initial abstraction är 0,2. Forskning av Woodward et al. (2003) tyder på att 0,05 är ett mer lämpligt värde. CN-talen modifierades därför för att få ett initial abstraction-värde på 0,05 med ekvation 15 (Woodward et al. 2003).

$$CN_{0,05} = \frac{100}{1,879\left(\frac{100}{CN_{0,2}-1}\right)^{1,15} + 1} \quad (15)$$

Där  $CN_{0,05}$  är CN-talet motsvarande ett initial abstraction-värde på 0,05 och  $CN_{0,2}$  är CN-talet för ett initial abstraction-värde på 0,2. Resultatet för samtliga CN-värden i modellen kan ses i bilaga B.

#### 4.4.4 Känslighetsanalys på CN-tal

CN-talen som används för att uppskatta infiltrationen är som nämnt i del 3.5.7 inte direkt kopplade till fysikaliska egenskaper i jorden utan baserade på empiriska data. För att få en uppskattning av osäkerheten i CN-talen och hur det påverkar översvämningsutbredningen justerades de utifrån tre olika så kallade *antecedent runoff conditions* (ARC) som ger ett lägre, högre eller medelscenario med direkta tabellvärden för infiltrationen. Dessa användes tidigare för att beskriva hur CN-talet påverkas beroende på jordens vattenmättnad (då kallat *antecedent moisture condition*). Senare forskning visade dock att CN-talet i större grad påverkades av andra faktorer än jordens vattenmättnad och begreppet ändrades då till att bli en uppskattning av osäkerhet i CN-parametern (Mulle et al. 2002).

De tre scenarierna som CN-talet delas upp i motsvarar den 10:e, 50:e och 90:e percentilen för parametern (Hawkins et al. 2009; Mullem et al. 2002). Den 10:e percentilen benämns som ARCI och är den undre fördelningsgränsen för CN-talet där man uppskattar att 10 % av de äkta värdena är mindre. 50:e percentilen är CN-talet enligt USDA (2009b) och benämns som ARCII. Den 90:e percentilen benämns ARCIII och är den övre fördelningsgränsen för CN-talet där uppskattningsvis 90 % av värdena för CN-talet är mindre. Dessa fördelningsgränser är framtagna baserat på statistik ifrån avrinningsområden med jordbruksmark i USA (Mulle et al. 2002). CN-talen omvandlades mellan de olika utfallen med sambanden enligt Hawkins et al. (2009) (ekvation 16 och 17).

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2,81 - 001281CN_{II}} \quad (16)$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,427 + 0,00573CN_{II}} \quad (17)$$

## 4.5 Anpassning av höjdmmodell

I skyfallsmodellen användes Lantmäteriets höjdmmodell *Grid 1+* med den horisontella upplösningen 1 x 1 m. Då en höjdmmodell endast läser av översta ytan av terrängen kan komplexa strukturer som till exempel broar och viadukter i vissa fall avbildas felaktigt. Byggnader och andra konstruktioner är även borttagna ur Lantmäteriets höjdmmodeller. Innan modellen kunde användas gjordes därför flera anpassningar i höjdsättningen så att flödet kunde modelleras på ett korrekt sätt vilket finns beskrivet i del 4.5.1 och 4.5.2. Anpassningarna gjordes i HEC-RAS funktion *RAS Mapper* där höjdmmodellen kan ändras direkt i kartvisaren.

### 4.5.1 Vattendrag och sjöar

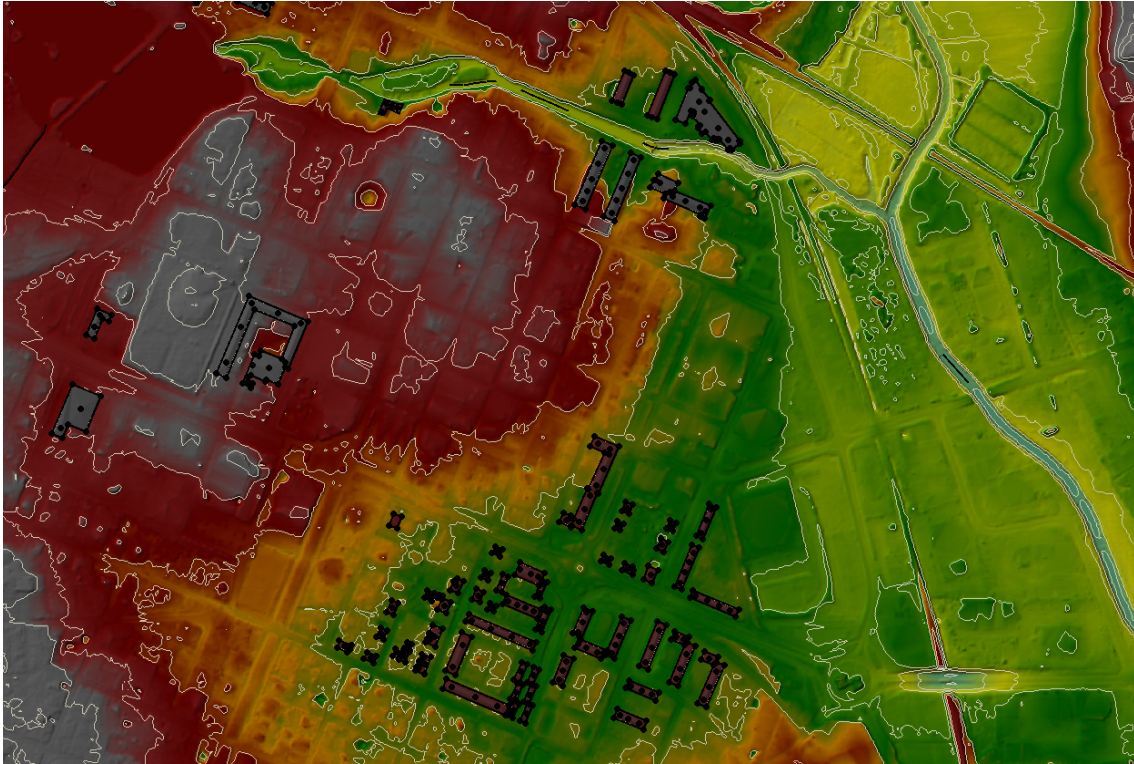
Då höjdmmodellen läser av vattenytan och inte botten på vattendragen kan det i vissa fall vara försvarbart att sänka ned ytan vid dammar och vattendrag så att flödet i dessa kan modelleras på ett mer exakt sätt. Detta förutsätter dock att batymetrin på vattendragen är känd och att ett trovärdigt gränsvärde för basflödet i vattendragen kan tas fram. I de fall som batymetrin inte är känd på vattendrag och sjöar rekommenderar MSB (2017) att lämna vattenytorna oredigerade för att den vattenförande kapaciteten inte ska riskera att överskattas. Då batymetrin för vattendrag och sjöar i Sala inte är känd antogs därför vattenytan som den ser ut i höjdmmodellen vara en normalvattenyta och allt flöde ifrån skyfallet rinner ovanpå denna.

För att flödet i vattendrag ska kunna passera broar i höjdmmodellen sänktes ytan ned vid alla broar över Lillån, Pråmån och Sagån. Vid övre Pråmån stördes den inskannade höjden på vattenytan av vegetationen, varför även denna togs bort från modellen.

### 4.5.2 Byggnader

Byggnader är inte med i höjdmmodellen från Lantmäteriet utan får läggas in för hand om det bedöms som nödvändigt. För att hålla modellen så enkel som möjligt lades endast byggnader in på platser där de antogs påverka flödet. De byggnader som lades in i modellen gjordes ungefär 4 m höga då det var tillräckligt högt för att nå över de största översvåmningsdjupen. Ett enkelt sadeltak modellerades även på dessa byggnader oavsett konstruktion så att ingen vattenyta skulle bildas ovanpå dem.





**Figur 17:** Höjdmodell i centrala Sala. Inlagda byggnader är markerade med svart linje. Källa: Markmodell grid 1+ ©Lantmäteriet.

## 4.6 Simuleringsscenarier

Fyra olika scenarier för infiltrationen modellerades. Tre scenarier baserades på osäkerheten i CN-talet som beskrivs i del 4.4.4 och ett scenario modellerades helt utan infiltration (tabell 8). Övriga parametrar är helt identiska mellan scenarierna.

**Tabell 8:** Scenarier för infiltration som användes för de olika simuleringarna

Modellscenario	Beskrivning
ARCI	10:e percentilen för CN-talet (hög infiltration)
ARCII	50:e percentilen för CN-talet (litteraturvärden för CN-talet)
ARCIII	90:e percentilen för CN-talet (låg infiltration)
Ingen infiltration	Ingen infiltration inlagd i modellen

## 4.7 Modelluppställning

Simuleringstiden valdes till totalt 14 timmar efter en kontroll att vattennivåerna hann avta under modellförloppet i bland annat Ekeby dammar och Sagån. Tidssteget styrdes av Courantvärdet i modellen vilket ledde till ett minsta tidssteg på 0,47 s. Simuleringsparametrar som valdes i HEC-RAS för samtliga simuleringsscenarier visas i tabell 9.

Tabell 9: Modelluppställning för samtliga simuleringar

<b>Modelleringsid:</b>	14 h
<b>Högst tillåtna Courantvärde:</b>	2,4
<b>Lägst tillåtna Courantvärde:</b>	0,9
<b>Minsta möjliga tidssteg:</b>	0,47 s
<b>Styrande ekvation:</b>	SWE-ELM (Shallow Water Equations)

## 4.8 Känslighetsanalys

### 4.8.1 Skillnad i översvämningsutbredning

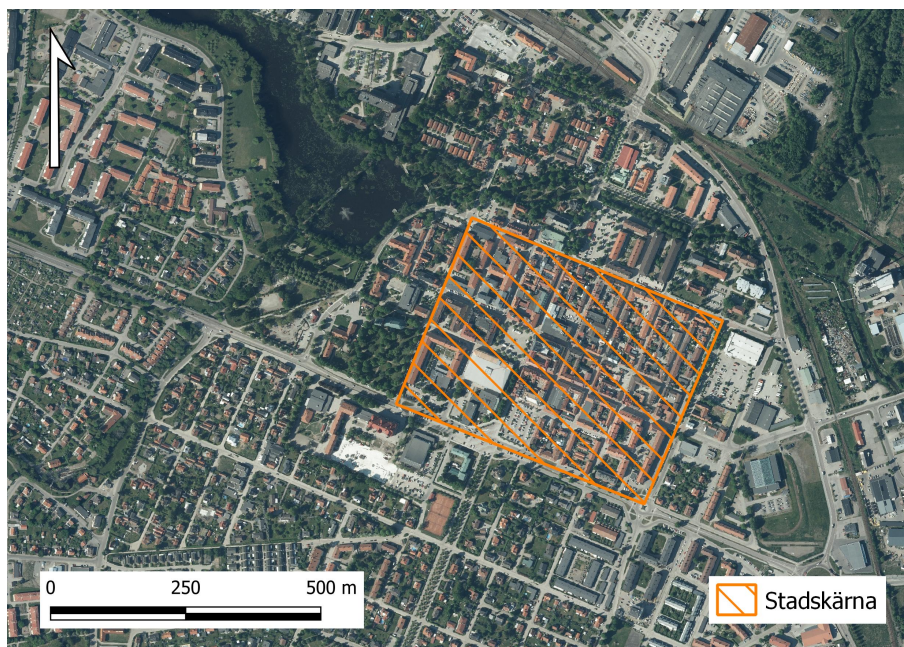
Total översvämmad yta för de fyra simuleringarna sparades från HEC-RAS som rasterfiler. Därefter sattes värdet på alla rasterceller med ett vattendjup större än 0,1 m till värdet 1 med verktyget *reclassify by table* i QGIS. Sedan summerades alla cellvärden med verktyget *raster layer statistics*. Genom att sedan multiplicera summan av alla celler med cellstorleken på rasterfilen erhöles den översvämmade arean.

Skillnaden på översvämningsutbredning för respektive infiltrationsfall visualiserades även direkt i modellen. Detta gjordes genom att lägga rasterfilerna med vattendjup större än 0,1 m ovanpå varandra.

### 4.8.2 Andel infiltrerad nederbörd

Rasterlager med total infiltrerad volym och total nederbörd under skyfallsförloppet kunde sparas från HEC-RAS. Därefter användes QGIS verktyg *raster calculator* för att få fram andel av nederbörden som infiltrerade enligt SCS curve number-metoden för infiltrationsfallen ARCI, ARCIII och ARCIII.

För att undersöka hur infiltrationen såg ut i Salas mest hårdgjorda och centrala delar klipptes denna del av rasterlagret ut och separat statistik togs fram för området motsvarande respektive infiltrationsfall. Områdets avgränsning kan ses i figur 18.

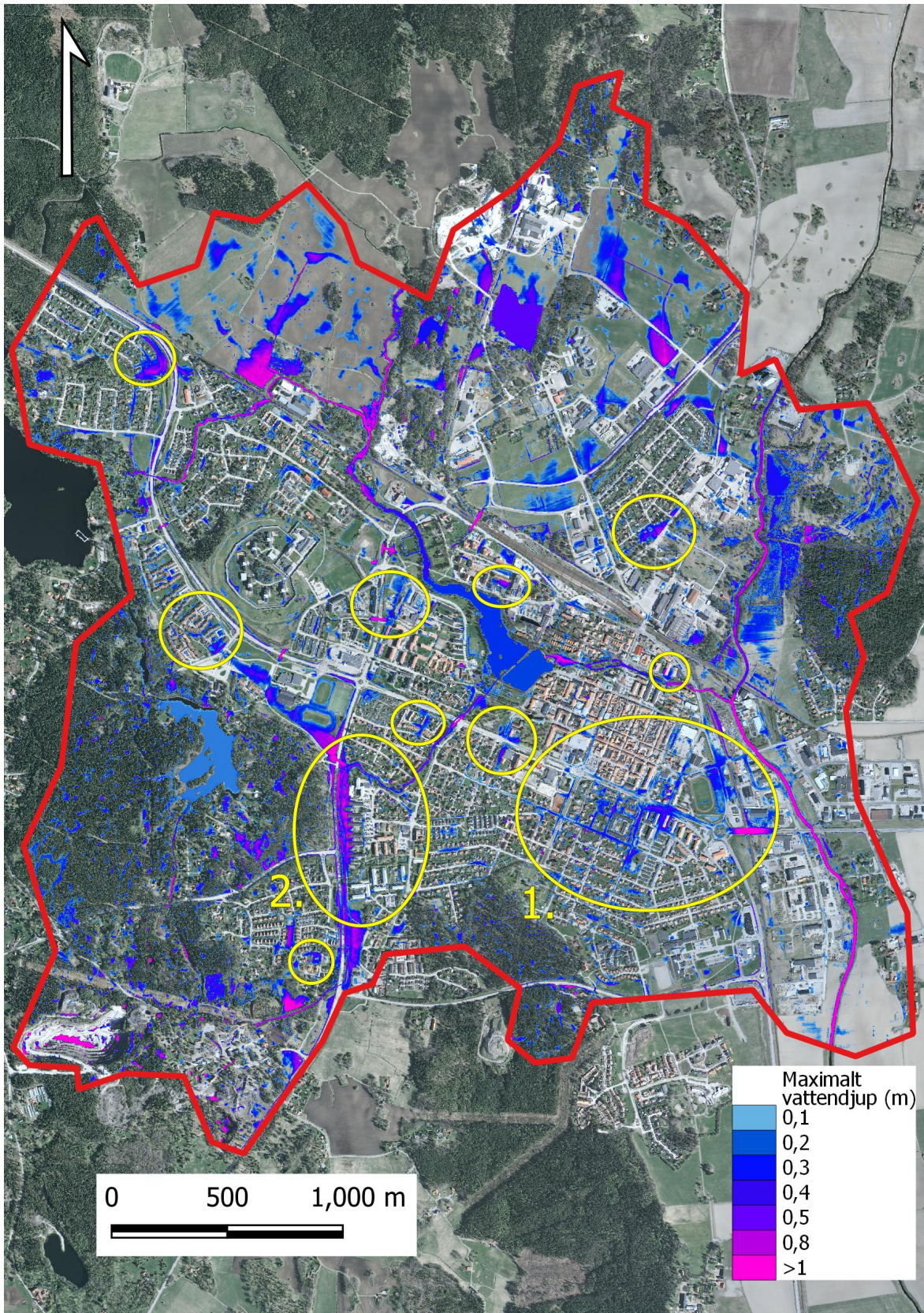


**Figur 18:** Området definierat som stadskärna. Ortofoto: RGB 0,25 m (2018) ©Lantmäteriet.

# 5 Resultat

## 5.1 Översvämningsutbredning till följd av ett skyfall i Sala

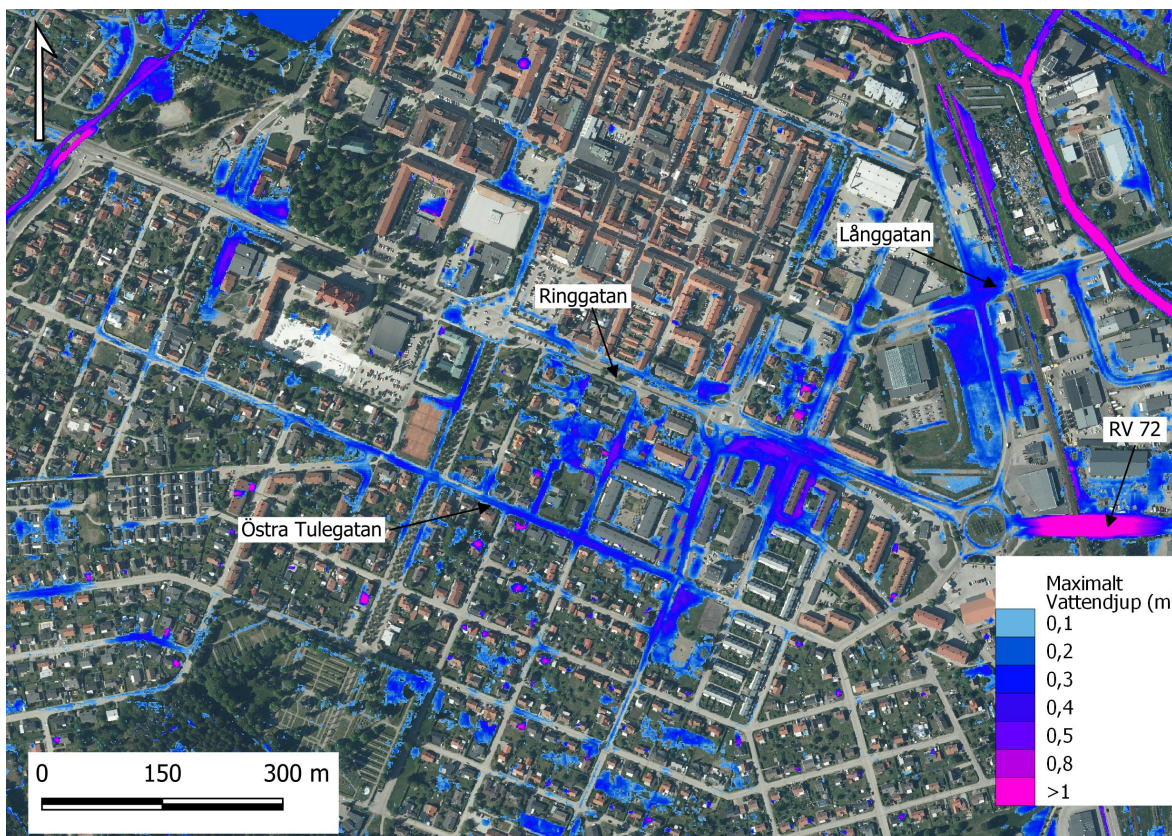
För vattendjup och rinnvägar visas i denna del medelfallet för infiltration enligt SCS curve number-metoden (ARCI). Maximala vattendjup på över 0,1 m i Sala stad till följd av ett 100-årsregn med klimatfaktor 1,3 kan ses i figur 19. Figuren visar en övergripande bild med flera områden där vattendjupet överskrider 0,1 m. Figuren speglar inte översvämningen i en specifik tidpunkt utan visar den maximala översvämningsutbredningen i varje beräkningscell från hela skyfallsförloppet. Detta innebär att de maximala djupen inträffar vid olika tidpunkter. De viktigaste identifierade riskområdena är markerade med gula ringar, där flera bostadshus eller viktig infrastruktur riskerar att översvämmas. Områdena markerade 1 och 2 i kartan visas med högre upplösning i figur 20 och 21.



**Figur 19:** Maximala vattendjup över 0,1 m i Sala till följd av ett 100-årsregn med klimatfaktor 1,3 och medelfall för infiltration. Viktiga potentiella riskområden med stora vattendjup intill byggnader är markerade med gula ringar. Ortofoto: RGB 0,5 m (2012) ©Lantmäteriet.

### 5.1.1 Område 1 - Söder om centrala Sala

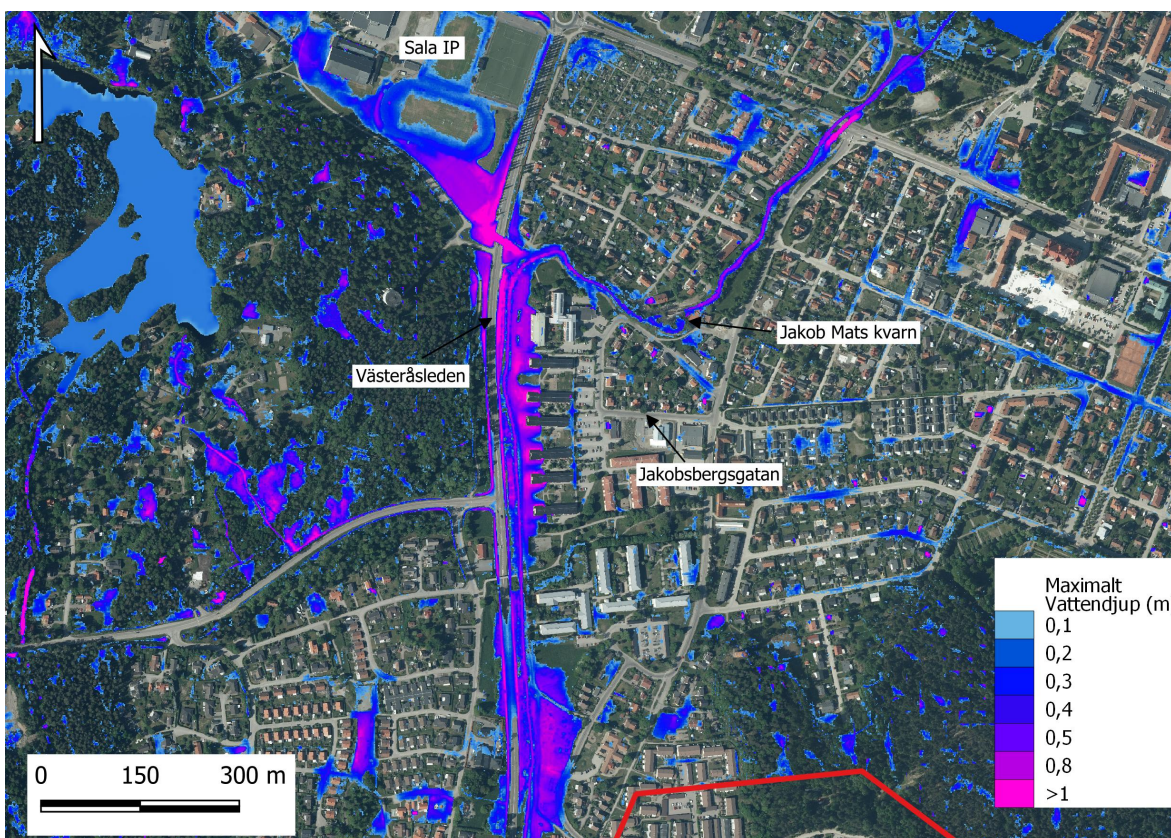
Figur 20 visar ett område strax söder om centrala Sala mellan Ringgatan och Östra Tulegatan. Vattendjupen når på vissa platser upp till ungefär 0,5 till 1 m och vattenmassorna står intill husfasader på ett flertal platser vilket tyder på att översvämmade källare och vattenskador på fastigheter kan uppstå.



**Figur 20:** Maximala vattendjup över 0,1 m strax söder om centrala Sala till följd av ett 100-årsregn med klimatfaktor 1,3. Ortofoto: RGB 0,25 m (2018) ©Lantmäteriet.

### 5.1.2 Område 2 - Pråmån

Figur 21 visar en överblick av de maximala vattendjupen vid Pråmån och närliggande bebyggelse. Vattendjupen här är bland de större i modellen. Fastigheterna väster om Jakobsbergsgatan har vattendjup på över 1 m stående intill husväggarna. Även Västeråsleden riskerar att översvämmas med ett djup på ungefär 0,3 meter. Området kring Sala IP har även stora vattendjup och ishallen riskerar att översvämmas då vatten står intill fasaden.

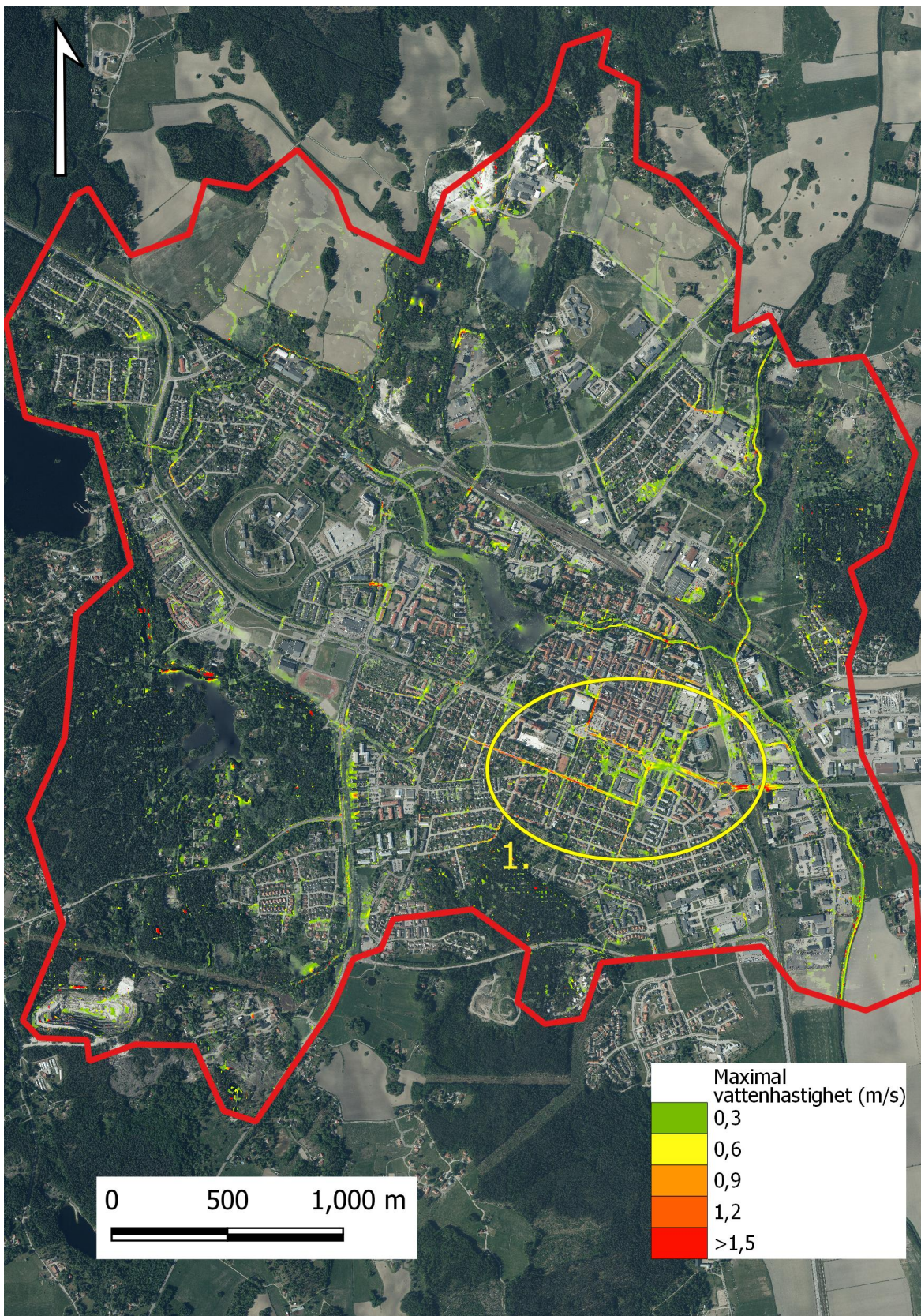


**Figur 21:** Maximala vattendjup över 0,1 m runt Pråmån till följd av ett 100-årsregn med klimatfaktor 1,3. Ortofoto: RGB 0,25 m (2018) ©Lantmäteriet.

### 5.1.3 Rinnvägar

Figur 22 visar en övergripande bild av de maximala flödeshastigheterna i Sala under det modellerade skyfallet. Precis som för maximalt vattendjup speglar maximal hastighet inte en specifik tidpunkt, utan kan ha inträffat vid olika tidpunkter. Figuren visar flera platser som agerar som huvudsakliga rinnvägar i modellen, bland annat Lillån och Sagån. Höga vattenhastigheter bildas även i ett område strax söder om centrala Sala.

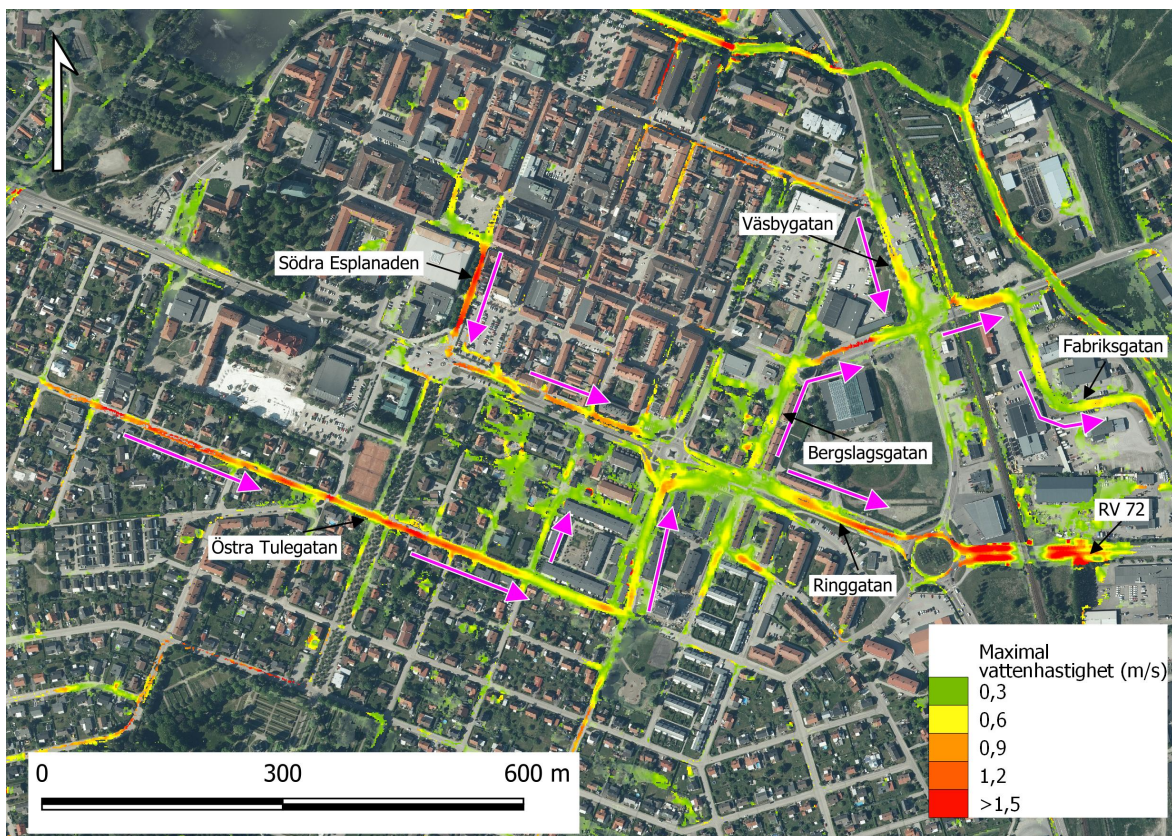




**Figur 22:** En översikt av huvudsakliga rinnvägar med maximal vattenhastighet i Sala till följd av ett 100-årsregn med klimatfaktor 1,3. Området markerat med gul ring visas närmare i del 5.1.4. Ortofoto: RGB 0,25 m (2018) ©Lantmäteriet.

### 5.1.4 Område 1 - Söder om centrala Sala

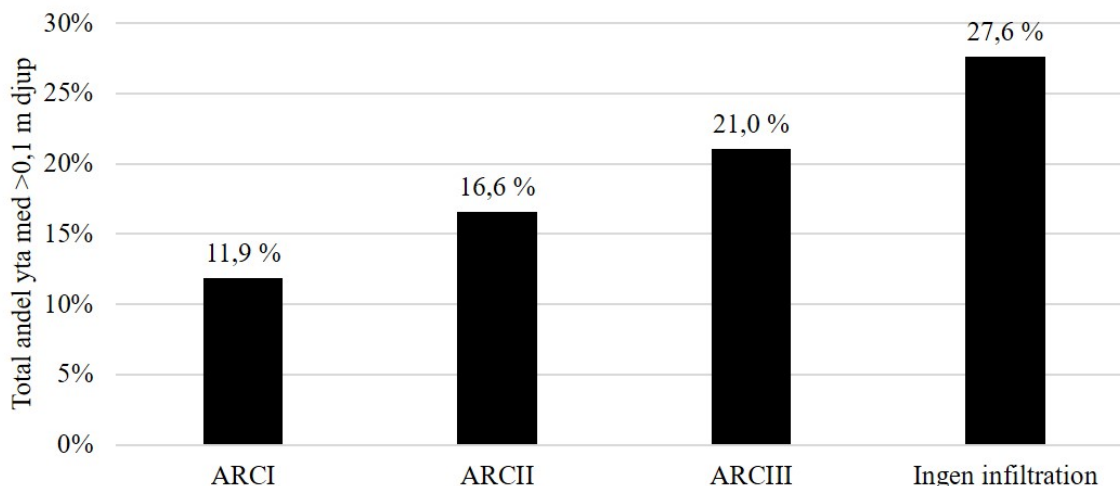
Figur 23 visar de maximala vattenhastigheterna i centrala Sala. Riktningen på flödet är markerat med pilar. Huvudsakliga rinnvägar är Östra Tulegatan, Södra Esplanaden, Bergslagsgatan och Ringgatan. En del av flödet går sedan mot viadukten vid riksväg 72 och en annan går nordost via Väsbygatan och Fabriksgatan mot Sagån.



**Figur 23:** Rinnvägar med maximal vattenhastighet i centrala Sala till följd av ett 100-årsregn med klimatfaktor 1,3. Flödesriktningar är markerade med rosa pilar. Ortofoto: RGB 0,25 m (2018) ©Lantmäteriet.

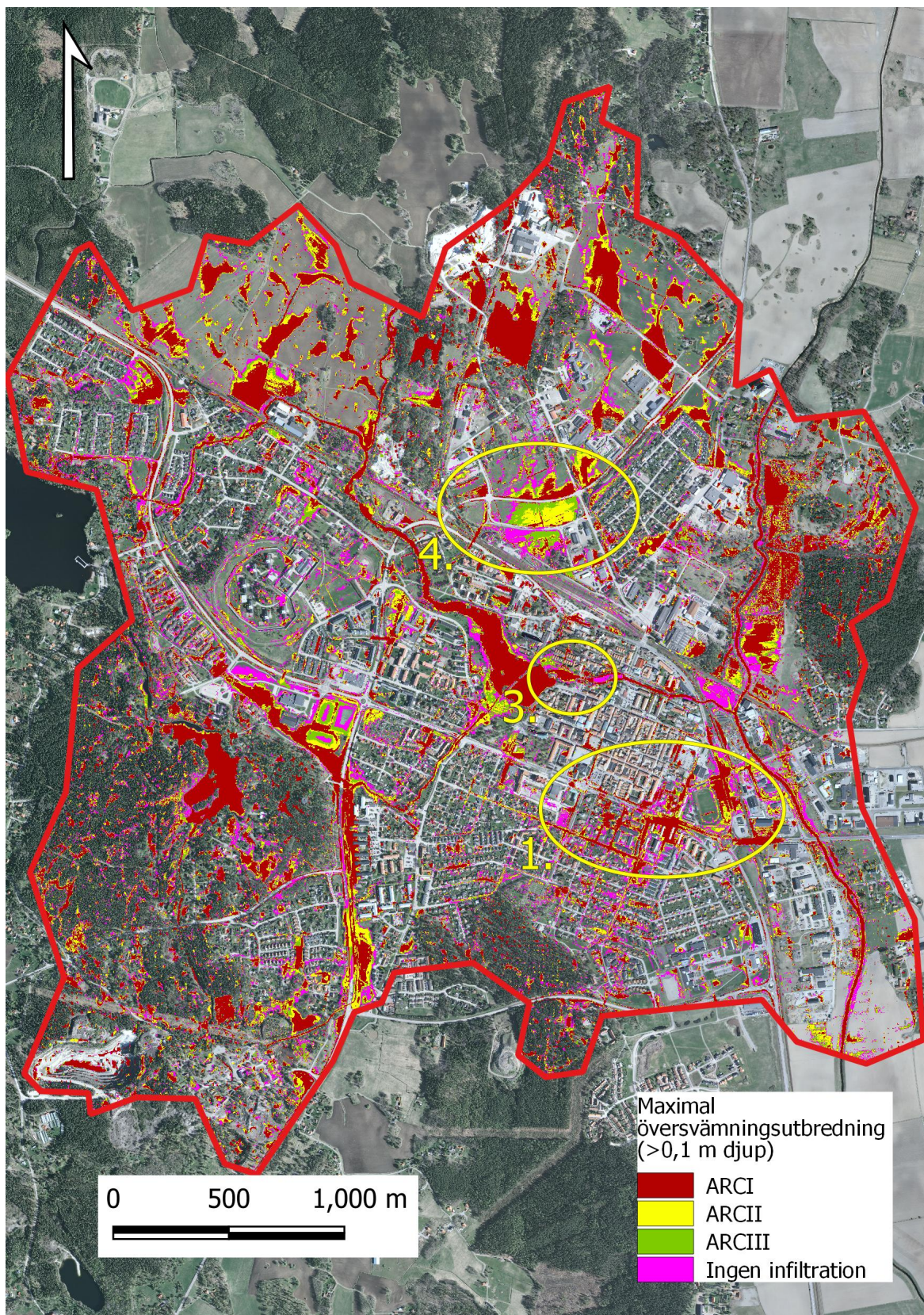
## 5.2 Infiltrationens påverkan på översvämningarnas utbredning

Figur 24 visar andelen av den totala ytan som är översvämmad med ett vattendjup större än 0,1 m för de olika infiltrationsfallen. ARCII är direkta litteraturvärden på CN-talet och motsvarar fördelningsgränsen för 50 % (medelfallet) och ARCI samt ARCIII motsvarar fördelningsgränsen för 10 % respektive 90 % för CN-talet (Mulle et al. 2002). ARCI som har störst infiltration ger upphov till lägst andel översvämmad yta. ARCIII som har lägst infiltration ger upphov till störst andel översvämmad yta och ligger därför närmast modellresultatet utan infiltration.



**Figur 24:** Andel av den totala ytan som är översvämmad med mer än 0,1 meters djup för de olika infiltrationsfallen. ARCII motsvarar medelfallet för infiltration och användes för resultatet i del 5.1.

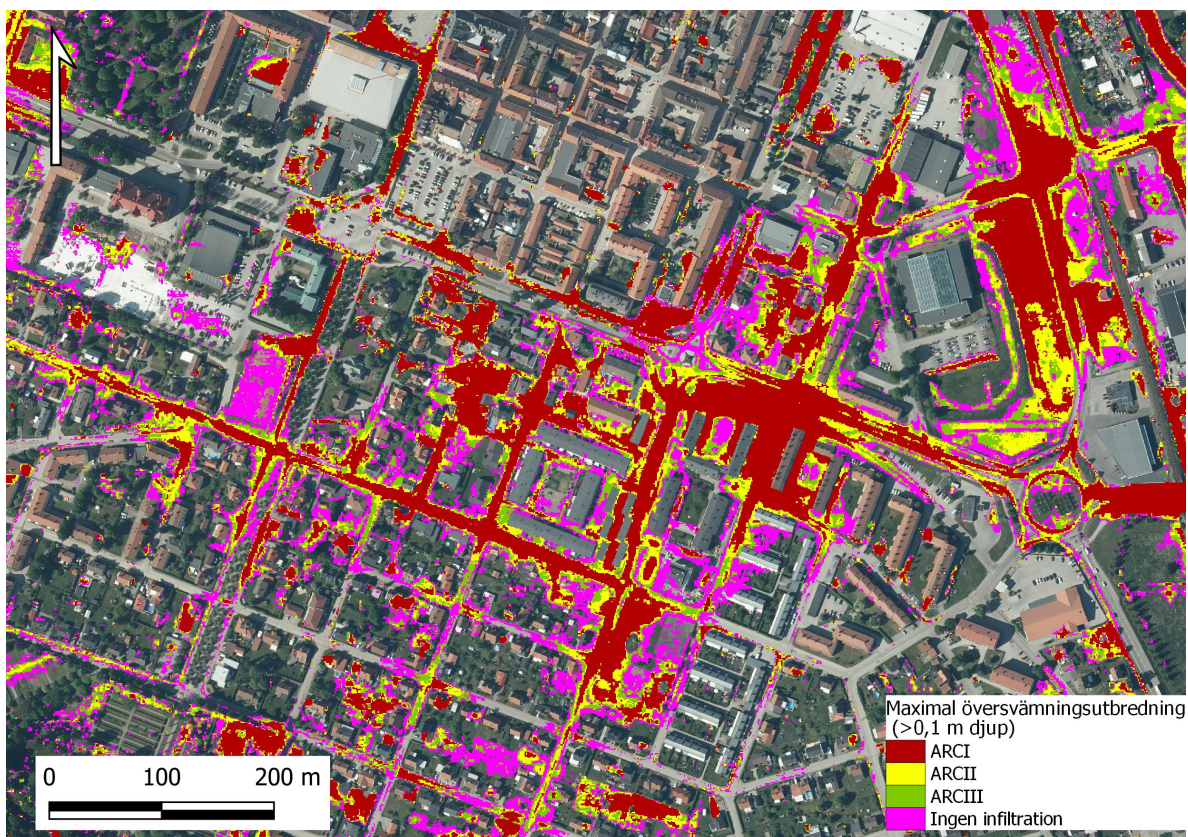
Figur 25 visar en övergripande bild av den maximala översvämningens utbredning för de fyra olika infiltrationsfallen. Infiltrationsfallen togs fram i del 4.4.4 där ARCI (rött i figur 25) motsvarar den undre fördelningsgränsen på 10 % och ARCIII (grönt i figur 25) motsvarar den övre fördelningsgränsen på 90 % för CN-talen (Mulle et al. 2002). Modellen kördes även helt utan infiltration vilket syns i magenta. ARCII syns i gult och motsvarar medelfallet (50 % fördelningsgräns) vilket även är infiltrationen som används i resultatet för översvämningens utbredning (del 5.1). Figuren visar en del tydliga skillnader i översvämningens utbredning på ett övergripande plan, speciellt mellan utfallet utan infiltration (i magenta) och de övriga fallen. Observera att översvämningens utbredning är lika stor i de fall då övre lager täcker undre lager.



**Figur 25:** Maximal översvämningsutbredning med djup större än 0,1 m i hela Sala för de olika infiltrationsfallen. Områden markerade med gula ringar visas närmare i del 5.2.1, 5.2.2 och 5.2.3. Ortofoto: RGB 0,5 m (2012) ©Lantmäteriet.

### 5.2.1 Område 1 - Söder om centrala Sala

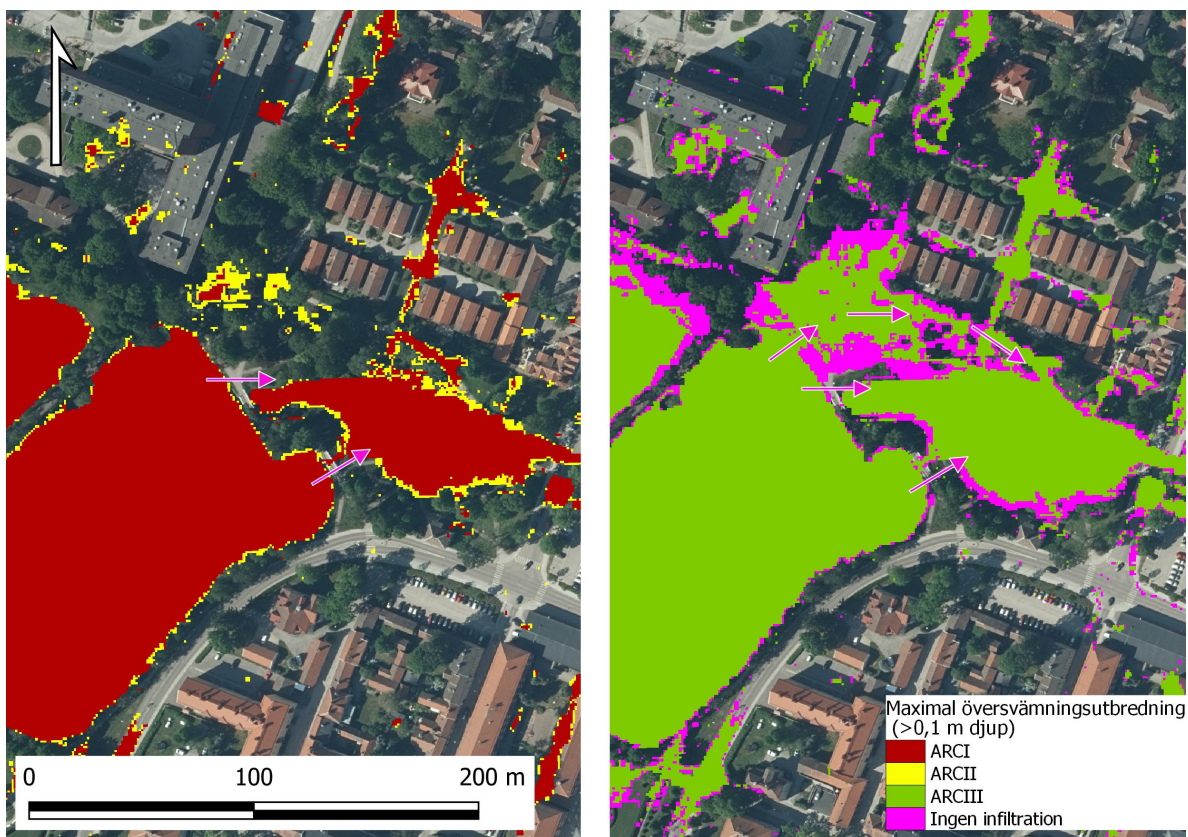
Figur 26 visar södra delarna av centrala Sala och visar skillnaden i översvämningssutbredning beroende på vilken infiltration som används. Relativt liten skillnad kan ses mellan fallen ARCI, ARCII och ARCIII. Modellerings helt utan infiltration ger den största översvämningssutbredningen. Vid järnvägen intill Långgatan står vatten med minst 0,1 m djup i samtliga fall utom ARCI. Vatten står intill en betydligt större del fastigheter när ingen infiltration används i modellen.



**Figur 26:** Maximal översvämningssutbredning med djup större än 0,1 m beroende på de olika infiltrationsfallen. Området är strax söder om centrala Sala. Ortofoto: RGB 0,25 m (2018) ©Lantmäteriet.

### 5.2.2 Område 3 - Utlopp från Ekeby dammar

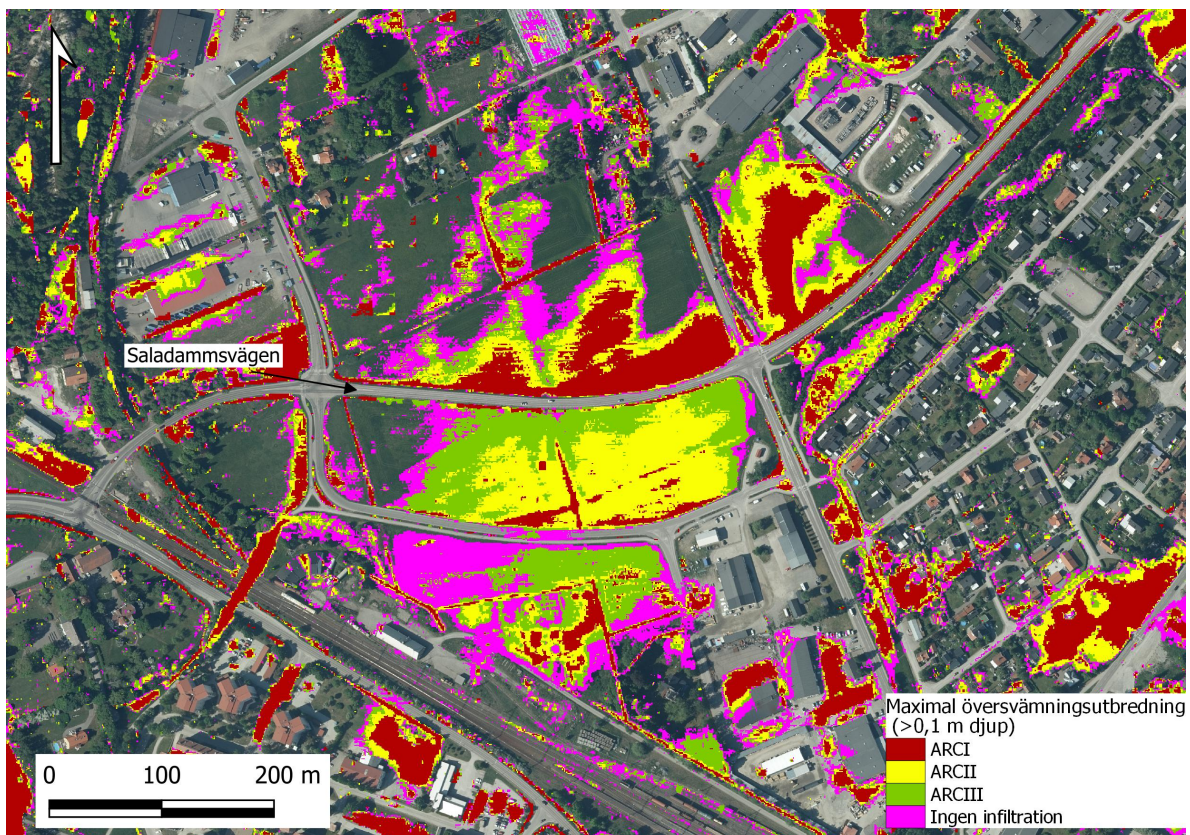
Figur 27 visar skillnad i översvämningsutbredning och flödesvägar vid utloppet från Ekeby dammar. Bilden är uppdelad i två för att tydligare påvisa skillnaden mellan infiltrationsfallen. Vid infiltrationsfallen ARCI och ARCII rinner vattnet endast via Ekeby dammars konstruerade utlopp. Vid ARCIII och modellering utan infiltration blir vattennivån i dammen så hög att vattnet tar en ny väg och även flödar runt norr om utloppen.



**Figur 27:** Maximal översvämningsutbredning med djup större än 0,1 beroende på infiltrationsfall. Flödesriktningar är markerade med rosa pilar. Området är vid utloppet av Ekeby dammar. Ortofoto: RGB 0,25 m (2018) ©Lantmäteriet.

### 5.2.3 Område 4 - Norr om Sala station

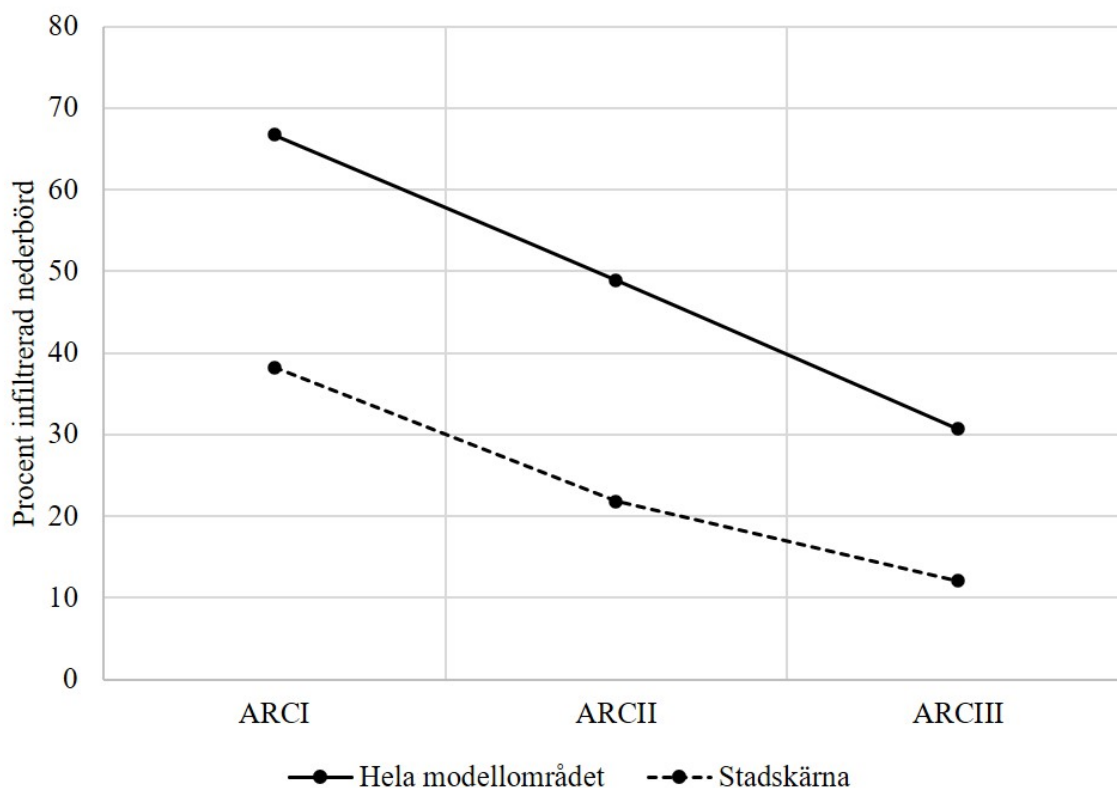
Figur 28 visar skillnaden i översvämningsutbredning i ett område norr om Sala station. Stora skillnader i översvämningsutbredning kan ses mellan samtliga utfall för infiltrationen, i synnerhet i södra delarna av figuren.



**Figur 28:** Maximal översvämningsutbredning med djup större än 0,1 m beroende på infiltrationsfall. Området är strax norr om Sala station. Ortofoto: RGB 0,25 m (2018) ©Lantmäteriet.

### 5.3 Andel infiltrerad nederbörd

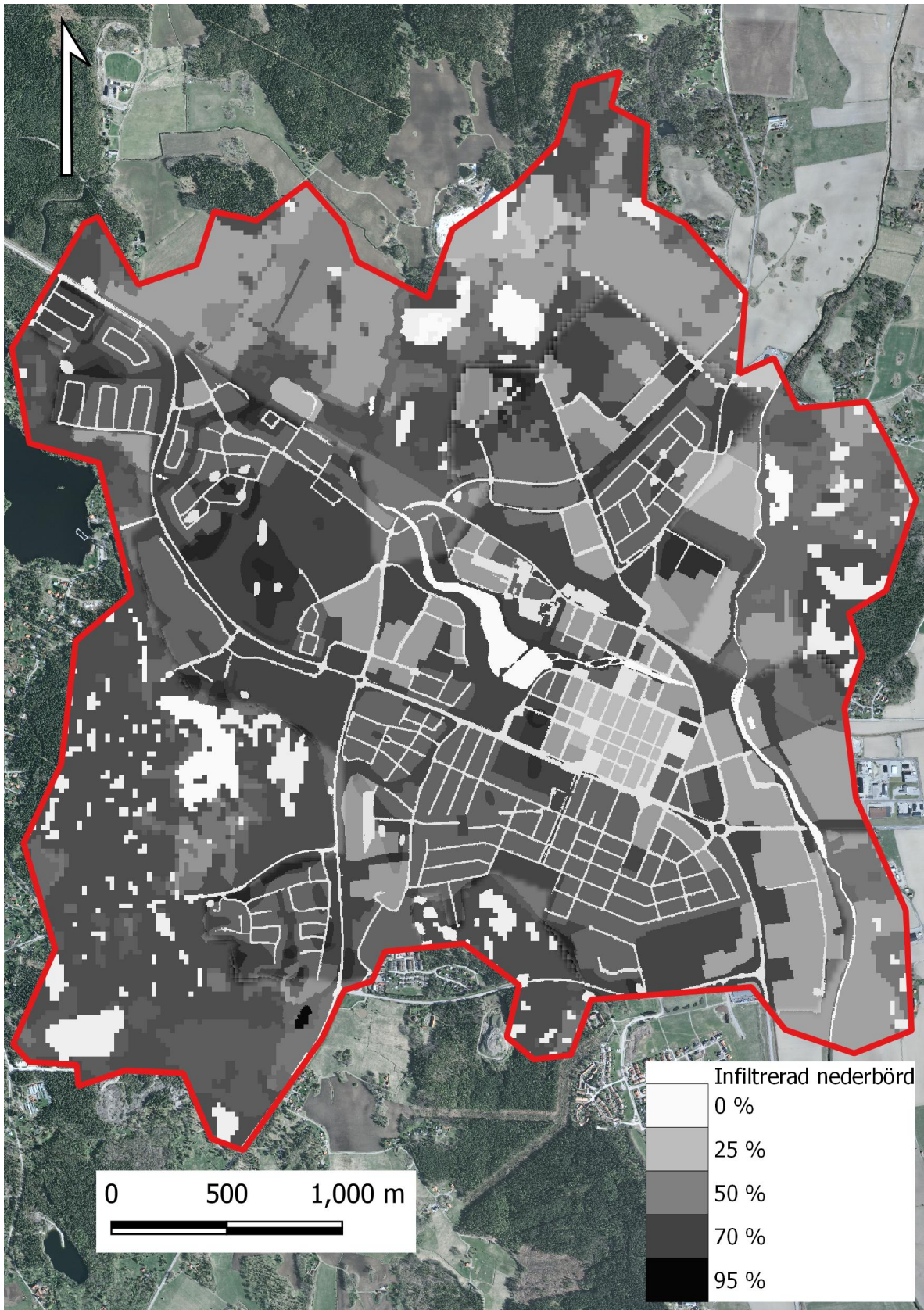
Figur 29 visar andelen av nederbörden som infiltrerar under tidsförloppet gång. Två olika områden visas, hela modellområdet och stadskärnan. Figuren visar att mellan 30 % och 66 % av nederbörden som faller under skyfallsförloppet infiltrerar i genomsnitt över hela modellen. I stadskärnan med hög andel hårdgjorda ytor infiltrerar i genomsnitt mellan 12 % och 38 % av nederbörden.



**Figur 29:** Andel av nederbörden som infiltrerar under tidsförloppets gång med SCS curve number-metoden för de olika infiltrationsfallen.

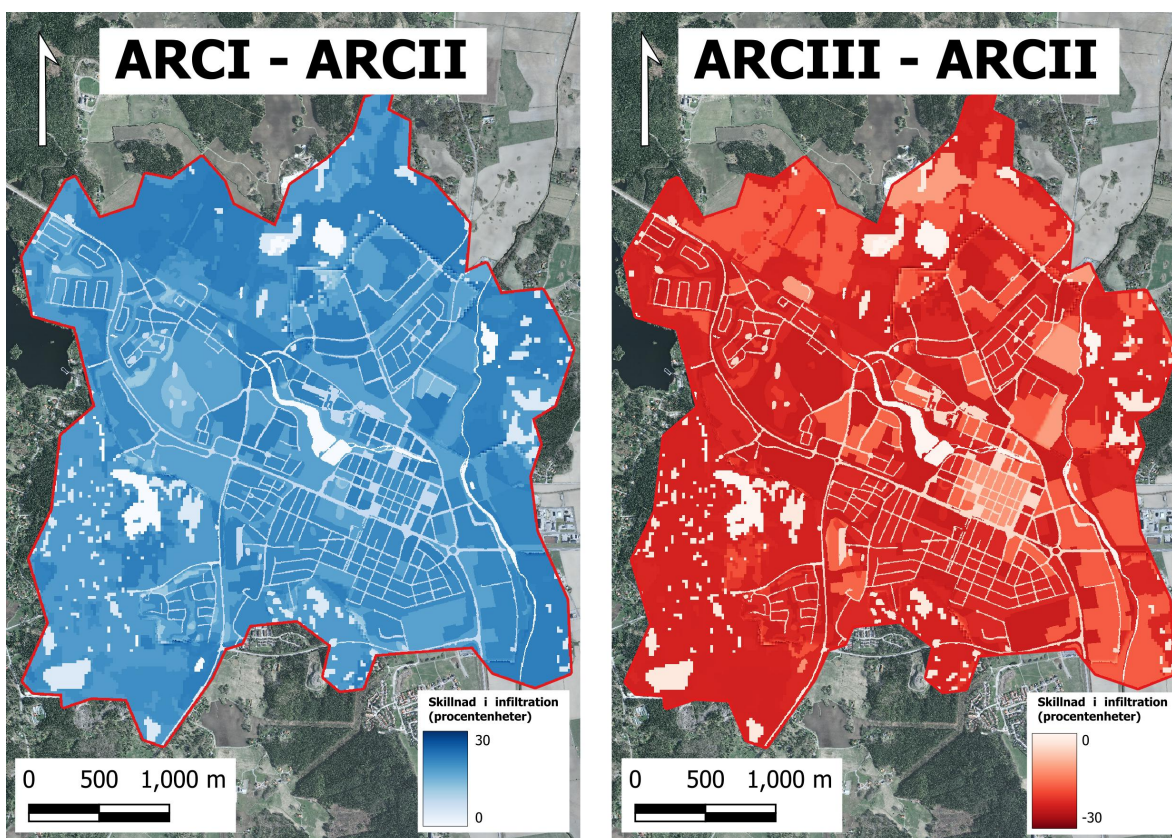
Figur 30 visar andelen av den totala nederbörden som infiltrerar under tidsförloppets gång enligt SCS curve number-metoden för infiltrationsfallet ARCII (medelfallet). Området i centrala Sala infiltrerade under 25 % av nederbörden. För industiområden och åkermark på lera infiltrerade ungefär 25 % av nederbörden i modellen. De områden som har högre infiltration är öppen gräsbeklädd mark där ungefär 70 % av nederbörden infiltrerade samt skogsområdena med morän som mellan 50 % och 70 % av nederbörden infiltrerade. Allra högst infiltration i modellen uppnås i ett litet område med isälvs-sediment öster om Sala silvergruva där 95 % av nederbörden infiltrerade (jordarter i modellen kan ses i figur 4).





**Figur 30:** Andel av den totala nederbörden som infiltrerar i modellen för ARCII (medelfall för infiltration) Ortofoto: RGB 0,5 m (2012) ©Lantmäteriet.

Figur 31 visar skillnaden mellan den procentuella infiltrationen för fallen ARCI och ARCIII jämfört med ARCII (medelinfiltrationen). Resultatet visar att ARCI ger upphov till cirka 30 procentenheter högre infiltration för exempelvis åkermark än ARCII. Infiltrationen i industriområden och innerstaden ökar även betydligt. För ARCIII är skillnaden i infiltration mindre i Salas centrala delar, industriområden och åkermark jämfört med ARCII. Skillnaden i infiltration på öppen mark och i skogsområdet i de södra delarna är däremot större.



**Figur 31:** Skillnad på den procentuella infiltrationen mellan de olika infiltrationsfallen. Ortofoto: RGB 0,5 m (2012) ©Lantmäteriet.

# 6 Diskussion

## 6.1 Översvämningsutbredning till följd av ett skyfall i Sala

Skyfallsmodellen visar att vid ett skyfall med 100 års återkomsttid är det flertalet områden i Sala som riskerar att drabbas av översvämnings med stora vattendjup. De två områden som får störst vattendjup och flertalet drabbade fastigheter samt potentiellt störd infrastruktur är området strax söder om centrala Sala samt området kring Pråmån (figur 19 och 20).

### 6.1.1 Område 1 - Söder om centrala Sala

Att området söder om centrala Sala får stora vattendjup och kraftig översvämningsutbredning kan bero på att en stor del av marken har helt eller delvis impermeabla ytor med relativt låg friktion (figur 16 och 29). Det mest drabbade området är även lägre beläget jämfört med kringliggande omgivning i samtliga vädersträck bortsett från öster. Detta får som följd att flera rinnvägar konvergerar i området och vattenmassorna blir stora (figur 23). Skillnaden i översvämningsutbredningen här är relativt liten mellan infiltrationsfallen. I det modellscenario där ingen infiltration användes drabbades dock flertalet nya fastigheter av översvämnings. Scenariot utan infiltration ska inte ses som ett rimligt utfall eftersom det är osannolikt att ingen nederbörd skulle infiltrera, men det är en intressant referens för att se infiltrationens påverkan på översvämningsutbredningen i området totalt. Då vattenmassorna i området består av avrinning som till stor del kommer från de centrala delarna av Sala så påverkas de i hög grad av hur stor infiltrationen är i detta område. Om infiltrationen generellt har överskattats för tätbebyggda områden i modellen så kan översvämningsutbredningen söder om centrala Sala därför riskera att underskattas som följd.

Tydliga störningar i infrastruktur och framkomlighet kan även ses i denna del av modellen. Järnvägen intill Långgatan översvämmas i samtliga infiltrationsfall förutom ARCI vilket kan leda till inställda avgångar och störningar i tågtrafiken genom Sala. Vidukten vid riksväg 72 fylls med ett vattendjup på över 1 m. Även Långgatan blir översvämmad med stående vatten som under skyfallsförloppet har ett maximalt djup på mellan 0,3 och 0,4 m beroende på infiltrationsfall. Dessa två vägar leder även till de enda två broarna över Sagån i Sala. Detta betyder att när de blir översvämmade med vattenmassor som blir stående efter skyfallsförloppet kan framkomligheten potentiellt hindras helt över Sagån. Detta kan ha stor påverkan på bland annat räddningstjänstens möjlighet att undsätta människor och all framkomlighet till och från Sala via riksväg 72. I Centrala Sala riskerar även framkomligheten att försvåras då vattenmassor blir stående på flera platser, bland annat på Ringgatan.

### 6.1.2 Område 2 - Pråmån

Området i anknytning till Pråmån har bland de största vattendjupen i modellen. Nästan hela sträckan i södra delarna av Pråmån har djup på runt 1 m och stora vattenmassor samlas och blir stående där. Även Västeråsleden riskerar att översvämmas med ett djup på ungefär 0,3 m. Då det finns alternativa vägar till södra delarna av Sala som inte är översvämmade hindras dock inte framkomligheten helt.

En anledning till de stora vattenmassorna är att ytavrinning från bostadsområden nordväst om Sala IP leder till detta område. Delar av avrinningen från skogsområdet öster om Pråmån samlas även här vilket betyder att översvämningsrisken potentiellt överskattas då infiltrationen i modellen var relativt låg för skogsområdena. Västeråsleden översvämmas i samtliga scenarier utom ARCI, men i övrigt var skillnaden i omfattning för drabbade fastigheter och infrastruktur förhållandevis liten i området mellan de olika infiltrationsfallen. En osäkerhet finns i modellen kring avvattningskapaciteten på dämnet vid Jakob Mats kvarn vilken troligtvis påverkar vattenytan i dessa områden. Om den avvattnande kapaciteten är underskattad i modellen kan vattendjupen uppströms dämnet vara överskattade och områden nedströms dämnet riskerar istället att drabbas av stora vattendjup.

### 6.1.3 Påverkan från antagande om dagvattennätets kapacitet

Som tidigare nämnt har ett avdrag för dagvattennätet gjorts i delar av modellen utifrån Salas karta över tekniska avrinningsområden (figur 13). Samma kapacitet har antagits över hela modellen, men dagvattennätet i Sala är inte homogent dimensionerat i verkligheten. Detta leder till att vattenmassorna i vissa områden troligtvis överskattas samtidigt som de potentiellt kan ha underskattas i andra områden. Detta kan leda till missvisande översvämningsdjup i modellen, speciellt i de områden som tar emot ytavrinning för en stor del av omgivningen. För området söder om centrala Sala bör den antagna kapaciteten stämma väl överens med verkligheten då på avdraget för dagvattennätet i modellen gjordes baserat på kapaciteten i denna del av Sala.

En större osäkerhet finns dock vid avrinningen från områdena som rinner till Pråmån uppströms Jakob Mats kvarn. Här kan dagvattennätets kapacitet ha felbedömts då dimensioneringen för dagvattennätet inte är känd. Dessa områden är bland annat bebyggelsen nordväst om Sala IP samt villaområdet väster om södra Pråmån vilka båda bidrar till avrinning och påverkar vattennivåerna kring Pråmån. Samtidigt som ett schablonmässigt avdrag för dagvattennätets kapacitet leder till osäkerheter i modellen så är det en etablerad och tidseffektiv metod för översvämningskarteringar (MSB 2014, 2017).

### 6.1.4 Vägar och vägtrummor

I modellen agerar vägar dämmande för ytavrinningen då de i många fall är upphöjda jämfört med kringliggande terräng. Detta resulterar i vattenmassor med kraftiga djup på flera platser, bland annat vid Målargränd väster om Sala IP och Industrigatan nordväst

om stationen (figur 19). Detta kan i vissa fall bero på att vägtrummor inte är inlagda i modellen och vattenytan överskattas därför potentiellt vid dessa platser. Då eventuella trummors dimension och placering inte är känd så behövs ytterligare utredningar för att bedöma hur stor risken för översvämning är i dessa områden. Man bör även ha i åtanke att eventuella vägtrummor som finns i Sala kan vara underdimensionerade för de flöden som uppstår vid ett 100-årsregn.

### 6.1.5 Påverkan av modellerat CDS-regn

I denna studie och skyfallskarteringar generellt modelleras ett typregn med en uniform intensitet över hela modellen, utan spatial variation. I verkligheten kan skyfallens intensitet och totala nederbörds mängder variera kraftigt på relativt liten spatial skala. Ett exempel är ett skyfall som föll i Malmö 31 augusti 2014 där nederbördsintensiteten varierade kraftigt i både tid och rum, i vissa fall varierade den uppskattade återkomsttiden på nederbördstillfället upp till flera hundra år mellan olika stadsdelar (MSB 2017). Hur spatial variation kan påverka resultatet av en skyfallskartering undersöktes av Jeppson (2022). I sitt arbete gjorde hon en jämförelse av översvämningsutbredningen efter skyfallet i Gävle 2021 om skyfallet modellerades med radardata respektive om ett CDS-regn med motsvarande volym användes. Resultatet av studien var att det lokalt kunde bli stora variationer i översvämningsutbredning och att ett uniformt regn riskerar att lokalt underskatta översvämningsdjupen (Jeppson 2022). I denna modell togs ingen hänsyn till potentiell intensitetsvariation spatialt i modellen, men det är en faktor som kommer att påverka översvämningsdjupen vid ett verkligt skyfall.

Varaktigheten på CDS-regnet är en faktor som påverkar den totala mängden vattenmassor i modellen. I denna skyfallsmodell valdes varaktigheten på skyfallet till 6 timmar. Skilberg (2020) undersökte i sitt exjobb hur val av varaktighet påverkar modellen. Arbetet kom fram till att varaktigheten till stor grad påverkar den totala mängden vattenmassor i modellen och att det kunde påverka översvämningsutbredningen mer än ändringar av Mannings tal och infiltrationskapacitet. Detta är en faktor som kan ha haft stor påverkan på modellen över Sala, speciellt i de översvämningsområden där stora mängder vatten blev stående så som vid Pråmån. En kortare varaktighet hade troligtvis lett till mindre vattenmassor vid dessa platser.

## 6.2 Infiltrationens påverkan på översvämningsområdenas utbredning

Resultatet i del 5.2 visade att infiltrationen har en tydlig påverkan på översvämningsutbredningen jämfört med det fall när ingen infiltration användes. Skillnaden i maximal översvämningsutbredning mellan ARCII (medelfallet) och fallet när ingen infiltration användes var 11 procentenheter totalt. Denna skillnad ledde till att flera helt nya områden översvämmades i fallet utan infiltration. Skillnaden hade även betydelse för vilka fastigheter och vilken infrastruktur som bedömdes drabbas av stora vattendjup bland annat i området söder om centrala Sala.

Skillnaden i översvämningsutbredning mellan ARC-fallen var nästan lika stor som

skillnaden mellan ARCII och fallet utan infiltration (9,1 procentenheter). På en övergripande nivå och i de centrala delarna av Sala är trots det översvämningsutbredningen relativt lik mellan ARC-fallen och få helt nya områden översvämmas beroende på vilken infiltration som användes. Det finns dock några platser i modellen där stora skillnader kan ses på en lokal nivå.

Ett exempel är området norr om Sala station där skillnaden mellan ARCI och ARCIII är påtaglig (figur 28). Detta beror på hur terrängen ser ut. Saladammsvägen är tillräckligt hög för att dämna i stort sett all ytavrinning som bildas uppströms i ARCI. I de övriga fallen med mindre infiltration så blir vattennivåerna så stora att de i större grad rinner över vägen till det lägre belägna området söder om vägen. Ytterligare en anledning till att skillnaderna i detta område är relativt stora kan vara att området är flackt vilket leder till att djupskillnaderna syns över större områden jämfört med hur väl de syns i till exempel Sagån. Denna skillnad skulle även potentiellt kunna bli ytterligare förstärkt av att beräkningsnätet i övre delen av området har storleken 20 x 20 m. Ett för stort beräkningsnät kan leda till att översvämningsutbredningen blir mer utspridd med ett mindre djup (MSB 2014).

På en plats gjorde skillnaden mellan infiltrationsfallen att helt nya flödesvägar bildades vilket eventuellt skulle kunna ha en stor betydelse i bedömning av lokala risker. Denna plats var vid utloppet till Ekeby dammar (figur 27). Där blir vattennivåerna så stora i ARCIII att vattnet börjar flöda norr om utloppen och ett helt nytt område översvämmas. Observera att osäkerheten i denna del av modellen dock är väldigt stor (del 6.4.3).

### 6.3 Osäkerhet med avseende på andel infiltrerad nederbörd

Den totala andelen nederbörd som infiltrerade i modellen hade stor variation beroende på infiltrationsfall och var mellan 30 och 66 % (figur 29). Skillnaden i infiltration mellan infiltrationsfallen var dock inte jämnt fördelad över hela modellen. För fallet ARCIII (låg infiltration) skiljde sig andelen infiltrerad nederbörd från ARCII (medelfallet) minst i de områden som generellt hade en låg infiltration som centrala Sala och åkermarken i modellens norra delar (figur 31). Detta beror antagligen på att CN-värdena redan var relativt höga i dessa områden för ARCII och en justering uppåt fick därför inte en stor påverkan på infiltrationen. För skillnaden mellan ARCI (hög infiltration) och ARCII var förhållandet det motsatta och skillnaden var som störst på samma platser. Detta samband kan även ses i figuren över andel infiltrerad nederbörd i stadskärnan då förhållandet mellan infiltrationsfallen inte är helt linjärt (figur 29). Lokalt bör detta kunna påverka översvämningsutbredningen mellan de olika infiltrationsfallen. Skillnaden är dock svår att kvantifiera i kartorna över skillnad i översvämningsutbredning då vattennivåerna kan påverkas av avrinning från flera olika områden.

Infiltrationen i stadskärnan var ungefär hälften så stor jämfört med hela modellen (figur 29). Infiltrationen i denna del av modellen skulle kunna ha påverkats av hur

området definierades med SCS curve number-metoden. I detta fall användes CN-värden där andelen impermeabla ytor var inkluderade i markanvändningen. Ett alternativt sätt hade varit att definiera alla tak, uppfarter och parkeringsplatser som impermeabla separat och sätta resterande ytor till en passande helt permeabel markanvändning. Om detta hade gjorts skulle avrinningen potentiellt kunnat bli högre tidigt i modellen då påverkan från parametern *initial abstraction*, det vill säga markens vattenhållande förmåga, inte hade blivit lika stor (Brunner 2022).

En viktig aspekt när man ser till resultatet med andel infiltrerad nederbörd i SCS curve number-metoden är även hur jordarterna klassades i metoden. Många antaganden om ler- och sandhalter samt djup till grundvattennivån har gjorts efter bästa förmåga. Felaktiga antaganden kan därav ha lett till missvisande resultat för infiltrationen och den kan som följd ha blivit både över- eller underskattad på vissa platser i modellen. I bästa fall bör klassningen av jordarter och markanvändning göras av en geotekniskt kunnig person som har erfarenhet av SCS curve number-systemet (USDA 2009a).

### 6.3.1 Jämförelse med avrinningskoefficienter

Ett sätt att ta hänsyn till infiltration i en skyfallsmodell är att använda avrinningskoefficienter som beskriver markens infiltrationsförmåga (MSB 2014). Om infiltrationen enligt SCS curve number-metoden jämförs med avrinningskoefficienter för ett 100-årsregn som används vid dimensionering av dagvattensystem kan en enkel uppskattning av hur metoderna skiljer sig åt göras. Avrinningskoefficienterna är framtagna av Trafikverket för att uppskatta hur stor del av nederbörden vid ett 100-årsregn som bildar ytavrinning (Vägverket 2008). Dessa avrinningskoefficienter används även delvis som grund för att uppskatta infiltrationen i skyfallskarteringar av bland annat Dyrestam & Hallerbäck (2019) och Wallinder (2015). Genom att ta den kvarvarande delen av nederbörds mängden i modellen efter infiltration för respektive område kan man få vad en ungefärlig motsvarande avrinningskoefficient är i modellen beroende på markanvändning. Jämförelsen av Vägverkets avrinningskoefficienter med modellens infiltration kan ses i tabell 10.

**Tabell 10:** Avrinningskoefficienter från Vägverket (2008) vid ett 100-årsregn jämfört med uppskattade avrinningskoefficienter från skyfallsmodellen

Markanvändning	Avrinningskoefficient	Uppskattning från skyfallsmodell		
	Vägverket (2008)	ARCI	ARCII	ARCIII
Odlad mark	0,125	0,44	0,65	0,83
Ängsmark och gräsytor	0,125	0,12	0,3	0,53
Tätbevuxen skogsmark	0,125	0,15	0,34	0,56
Sluten bebyggelse	0,875	0,55	0,75	0,86
Villor (tomtarea <1000 m <sup>2</sup> )	0,3125	0,22	0,41	0,63
Industriområden	0,625	0,45	0,66	0,82

Avrinningen i skyfallsmodellen är generellt högre för bevuxna områden som odlad

mark, gräsytor och skogsmark jämfört med Trafikverkets avrinningskoefficienter. Enda undantaget är för ARCI med högst infiltration, där infiltrationen för ängsmark och gräsytor samt skogsmark är ungefär lika stora. Att avrinningen i skyfallsmodellen generellt är högre för odlad mark och ängsmark skulle kunna bero på att SCS curve number-metoden tar hänsyn till permeabiliteten på jorden. En stor del av jordarterna i områdena med gräsmark och odlad mark bedömdes ha höga lerhalter och var i modellen definierad som den minst permeabla klassen vilket kan vara en anledning till skillnaden i avrinning gentemot Trafikverkets avrinningskoefficienter. Ponce & Hawkins (1996) uppger att SCS curve number-metoden generellt presterar bra för odlad mark, men ytterligare studier skulle behövas där fler jordartsklasser undersöks för att utvärdera vad skillnaden i dessa områden beror på.

Avrinning från den slutna bebyggelsen är generellt lägre i modellen jämfört med Trafikverkets avrinningskoefficienter för samtliga infiltrationsfall. Detta skulle kunna tyda på att skyfallsmodellen möjligtvis överskattade infiltrationen i Salas stadskärna vilket kan påverka översvämningsnivåerna i området söder om centrala Sala. Som tidigare nämnt kan detta bero på hur infiltrationslagret definierades i skyfallsmodellen.

Det är svårt att dra en direkt slutsats kring om skillnader mellan metoderna beror på hur jordarterna klassades i modellen eller någon annan faktor. Ponce & Hawkins (1996) anger att ARCIII i vissa fall tillämpas för att beskriva avrinning vid regntillfällen med återkomsttider på över 100 år. I denna modell blir dock de motsvarande avrinningskoefficienterna för ARCIII betydligt högre än Trafikverkets uppskattade avrinning vid ett 100-årsregn. Samtidigt så var skillnaden i översvämningsutbredning mellan infiltrationsfallen inte så pass stor att den i stor grad påverkade bedömningen av vilka fastigheter som drabbades av översvämnning i centrala Sala. Användningen av ARCI vid bedömning av översvämningsnivåer i Sala får alltså i detta fall ses som försvarbar. I ett modellområde med mer permeabla jordar kan dock infiltrationen påverka modellen i större utsträckning och en annan bedömning kan vara motiverad.



## 6.4 Osäkerheter och felkällor i modellen

### 6.4.1 Mannings tal och markanvändning

Mannings tal påverkar översvämningsutbredningen som en följd av att flödesmotståndet ändras. Ett för lågt Mannings tal innebär stort flödesmotstånd och kan leda till att översvämningsytan blir konkav. Detta får som konsekvens att en större yta blir översvämmad med ett mindre djup. Ett för högt Mannings tal leder till motsatsen (MSB 2014).

Då skyfallsmodellen var stor och översiktlig blev detaljriekdomen begränsad med avseende på Mannings tal. Mannings tal uppskattades baserat på vägnätet och markanvändningsdata från Lantmäteriet. Bortsett från vägar var därför detaljer som tak, mindre parkeringar och övriga hårdgjorda ytor inte definierade med separata Mannings tal i modellen. Detta kan ha lett till att flödesmotstånd feluppskattades lokalt, i synnerhet bland bebyggda områden. Som exempel hade alla industritomter ett Mannings tal på 70 vilket motsvarar en hårdgjord yta (Vägverket 2008). Industritomterna i Sala har dock viss variation vilket kan ha lett till att Mannings tal blev överskattat på de platser som inte utgjordes av hårdgjorda ytor.

### 6.4.2 Beräkningsnät

I modellen valdes två cellstorlekar i beräkningsnätet, 4 x 4 m och 20 x 20 m. Då områdena utanför bebyggelsen inte är lika relevanta ur ett riskperspektiv så gjordes en avvägning att ha större cellstorlek där för att kunna hålla beräkningstiderna nere. En 20 x 20 m cellstorlek leder till att resultaten i denna del av modellen har stora osäkerheter och bör tolkas med försiktighet om det används i en riskanalys. HEC-RAS beräkningsnät använder sig dock av en metod där höjdvariationer inom cellen inte går förlorade när vattendjupet i cellen beräknas. Detta betyder att programmet har en relativt avancerat cellhanteringssystem jämfört med vissa alternativa metoder. Dessa metoder antar att höjden är konstant inom cellen vilket leder till att HEC-RAS jämförelsevis inte kräver en lika stor cellstorlek (Forest 2020). Trots detta är cellstorleken är fyra gånger större än den största rekommenderade storleken enligt MSB (2014) och fem gånger större än rekommendationerna i MSB (2017). En risk med ett för stort beräkningsnät är att viktiga detaljer som påverkar flödet inte fångas upp. Ett för stort beräkningsnät kan även leda till att översvämningsarna får en större utbredning och mindre djup jämfört med ett väl anpassat beräkningsnät (MSB 2014). I HEC-RAS bestäms hela cellens egenskaper med avseende på Mannings tal och infiltration utifrån mittpunkten i cellen (Brunner 2022). Detta kan leda till osäkerheter i de fall då cellen innehåller flera olika markanvändningar och var en av anledningarna till att Salas vägnät modellerades med breaklines.

Den mindre cellstorleken som användes för beräkningsnätet i tätorten var 4 x 4 m. Denna storlek på beräkningsnät är den största rekommenderade storleken av MSB för översiktliga skyfallskararteringar (MSB 2017). Viktiga detaljer som vägar får då en bredd på ungefär 2-4 celler och övriga detaljer i den storleksordningen kunde fås med

i modellen. För att göra riskanalyser på detaljnivå bör dock ett mindre beräkningsnät användas för att säkerställa att detaljer i terräng och markanvändning inte har fallit bort. MSB (2017) rekommenderar en cellstorlek på två meter eller bättre för analyser på detaljnivå.

### 6.4.3 Terräng

Att inte ha upphöjda byggnader i modellen kan leda till att översvämningsdjupet underskattas då vatten kan rinna över byggnader eller stanna i lågpunkter i terrängen som egentligen utgörs av en huskropp (MSB 2014). Vid anpassning av terrängen i denna modell gjordes ingen höjning för samtliga byggnader, istället lades endast större byggnader till på de platser där de bedömdes kunna påverka en större flödesväg eller översvämningsdjup. I centrala Sala fanns det en viss höjdskillnad mellan avtrycket av huskropparna och vägar och torg i höjdmodellen. Detta ledde till att flödesvägarna i denna del huvudsakligen gick längs med gatorna under skyfallsförloppet och inte genom byggnader trots att huskropparna inte var upphöjda. På grund av detta så är endast ett fåtal byggnader inlagda i centrala Sala.

Då vattendrag och sjöars batymetri inte inkluderades i modellen finns det en osäkerhet kring översvämningsnivåer och rinnhastigheter vid dessa. Att ingen modifiering gjordes för vattenytan får som följd att den antagna normalvattennivån i vattendragen riskerar att vara missvisande då den beror på vilken flödessituation som rådde när skanningen av terrängen gjordes (MSB 2014). Detta antagande kan ha en betydande påverkan för mindre vattendrag där regnvolymer från ett skyfall kan leda till en stor påverkan av vattennivåerna (MSB 2014). En korrigering av vattenytan rekommenderas dock inte av MSB (2017) vid översiktliga skyfallskarteringar då vattendragets kapacitet riskerar att överskattas.

Samma antaganden kring vattenytan påverkar även platser med dämmen längs vattenförekomsterna i Sala. I modellen fanns främst två platser med dämmen som bedöms kunna ha stor påverkan på översvämningsutbredningen uppströms, vid Jakob Mats kvarn längs Pråmån och Ekeby dammars utlopp till Lillån. Om förenklingen i batymetri på dämnet vid Jakob Mats kvarn ledde till att avvattningskapaciteten underskattades så kan översvämningsutbredningen i direkt anslutning till dämnet uppströms vara överskattad. Nedströms dämnet så riskerar vattennivåerna på samma sätt att underskattas om dämmets avvattningskapacitet underskattas.

### 6.4.4 SCS curve number-metoden vid skyfallsmodeller

Ett tillkortakommande med SCS curve number-metoden i samband med skyfallskarteringar är att den styrande ekvationen inte tar hänsyn till intensiteten och varaktigheten på nederbördstillfället (King, Arnold & Bingner 1999; Wang & Bi 2020). En lika stor förlust beräknas alltså för den totala nederbördsmängden oavsett om det faller över en vecka eller en timme (Brunner 2016). I en studie av Wang & Bi (2020) kom man fram till att parametrar för *curve number*, *potential maximum soil retention*

och *initial abstraction ratio* varierar beroende på vilken intensitet som nederbörden har. Tabellvärden från bland annat USDA (1986) därför kan vara missvisande vid kraftiga nederbördstillfällen. Osäkerheten i infiltrationen som har undersökts i detta arbete kan alltså påverkas av andra faktorer än markens egenskaper och detta visar ytterligare vikten av att använda och värdera de olika fördelningsgränserna för SCS curve number-metoden.

## 6.5 Vidare studier

I detta arbete undersöktes hur osäkerheten i CN-talet påverkade infiltration och översvämningsnivåer i modellen. Jordarterna i Sala stad var relativt homogena och bestod dock till största delen av leror med låg infiltrationskapacitet. För att få en mer omfattande bild av hur osäkerheter i CN-talet påverkar översvämningsnivåer i markavrinningsmodeller skulle liknande studier på tätorter med mer permeabla jordarter kunna genomföras. Möjligtvis kan en mer generell slutsats då dras kring vilket infiltrationsscenario som är bäst lämpat vid skyfallskarteringar.

Fortsatta undersökningar kan även göras på hur SCS curve number-metoden presterar jämfört med alternativa infiltrationsmetoder. Exempelvis skulle det vara intressant att göra ytterligare jämförelser med avrinningskoefficienter eller infiltrationsmoduler i alternativa modelleringsprogram så som MIKE 21.

## 7 Slutsatser

I detta arbete har en skyfallsmodell över Sala stad gjorts där potentiella riskområden tagits fram. För att undersöka hur infiltrationen påverkar modellen har även en känslighetsanalys på infiltrationsparametrar med SCS curve number-metoden gjorts. Från arbetet har följande slutsatser dragits:

- Vid ett 100-årsregn riskerar ett flertal platser i Sala att översvämmas och framkomligheten att begränsas. De största potentiella problemområdena var söder om centrala Sala kring korsningen Kungsängsgatan-Ringgatan och längs Pråmån uppströms Jakob Mats kvarn.
- Skillnaden i total översvämmad yta mellan scenariot med högst infiltration och lägst infiltration var totalt 9,1 procentenheter i modellen. För scenariot med högst infiltration blev 11,9 % av totala ytan i modellen översvämmad och i scenariot med lägst infiltration blev 21,0 % av den totala ytan i modellen översvämmad. Lokalt varierade översvämningsutbredningen mellan scenarierna men på större skala var utbredningen relativt lik oberoende av vilket infiltrationsscenario som användes.
- Den modellerade infiltrationen hade betydelse vid bedömningen av vilka fastigheter och vilken infrastruktur som drabbades av översvämmning då flera nya områden blev översvämmade i det scenario där ingen infiltration användes i modellen.
- I scenariot med högst infiltration infiltrerade det totalt 45 % mer nederbörd jämfört med scenariot med lägst infiltration. Vid scenariot med högst infiltration infiltrerade i genomsnitt 66 % av nederbörden. I medelscenario som motsvarar direkta litteraturvärden för CN-parametern infiltrerade 49 % av nederbörden. För scenariot med minst infiltration infiltrerade 30 % av nederbörden.
- Då infiltrationen till viss grad berodde på hur jordarterna klassades i modellområdet är det svårt att dra en generell slutsats om vilket infiltrationsscenario som är bäst lämpat att använda vid ett skyfall. Infiltrationsscenarierna kan dock vara ett bra sätt att se hur osäkerheten i metoden kan påverka modellen.

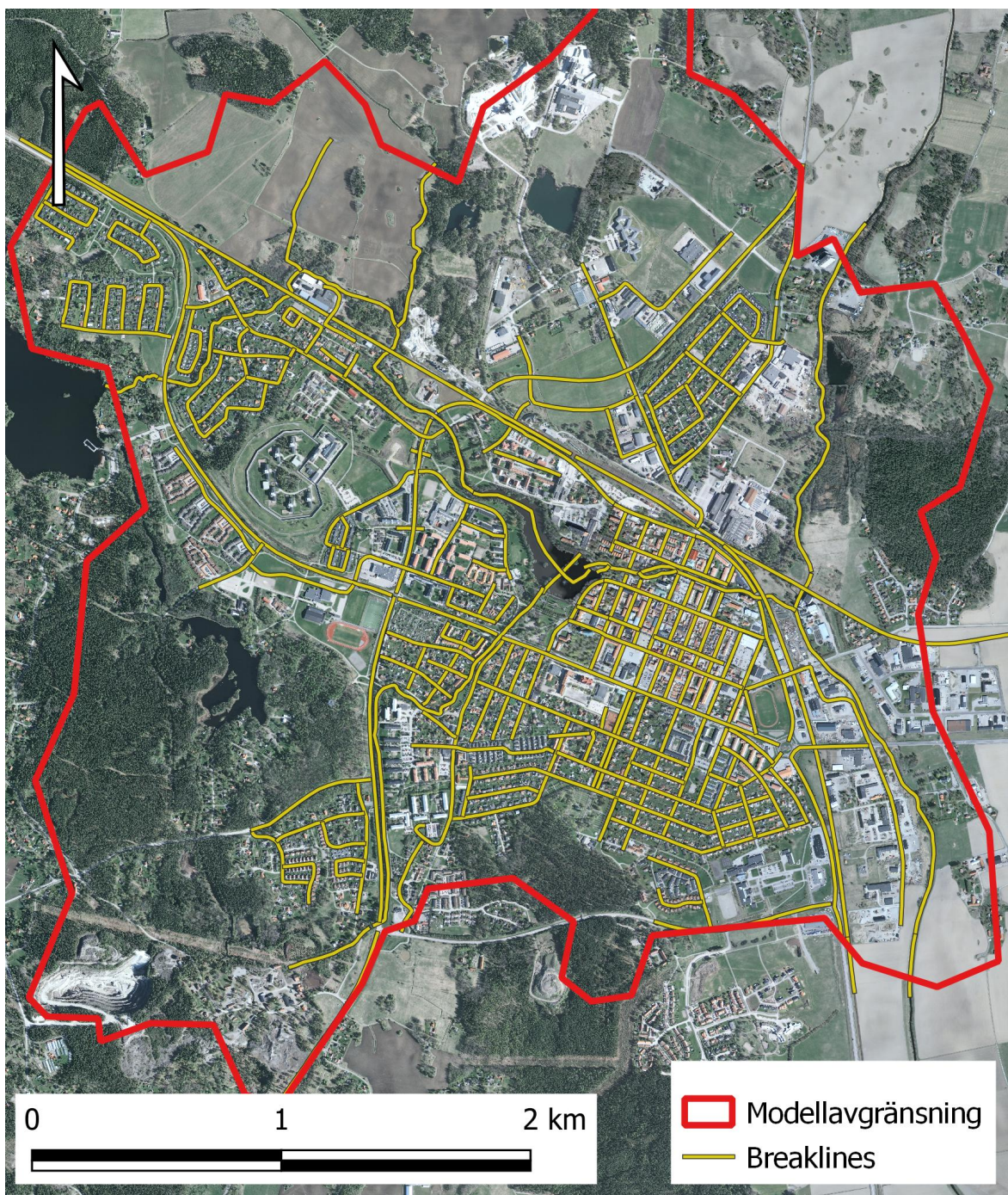
# Referenser

- Blomquist, D., Hammarlund, H., Härle, P. & Karlsson, S. (2016). *Riktlinjer för modellering av spillvattenförande system och dagvattensystem*. Stockholm: Svenskt Vatten Utveckling.
- Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual*.
- Brunner, G. W. (2022). *HEC-RAS River Analysis System HEC-RAS 2D User's Manual*.
- Casulli, V. (2009). A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. *INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN FLUIDS*, vol. 60, ss. 391–408.
- Dahlström, B. (2010). *Regnintensitet - en molnfysikalisk betraktelse*. Stockholm: Svenskt Vatten Utveckling. Tillgänglig: [http://vav.griffel.net/filer/Rapport\\_2010-05.pdf](http://vav.griffel.net/filer/Rapport_2010-05.pdf) [2022-08-30].
- Douville, H., Raghavan, K., Renwick, J., Allan, R., Arias, P., Barlow, M., Cerezo-Mota, R., Cherchi, A., Gan, T., Gergis, J. et al. (2021). Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. *Climate Change*, ss. 1513–1766.
- Dyrestam, K. & Hallerbäck, S. (2019). *SKYFALLSKARTERING OCH DAGVATTENRENING FÖR VÄSTRA STADEN*. WSP. Tillgänglig: <https://norrkoping.se/download/1851f29b5b17605588f77a71/1607084324203/vattenutredning.pdf> [2022-10-10].
- Eriksson, B. (1981). *Den potentiella evapotranspirationen i Sverige (RHO 27)*. Norrköping: SMHI.
- Forest, M. (2020). *HEC-RAS Subgrid Bathymetry Theory and Application - Kleinschmidt*. Tillgänglig: <https://www.kleinschmidtgroup.com/ras-post/hec-ras-subgrid-bathymetry-theory-and-application/> [2022-09-09].
- Goodell, C. (2018). *Terrain modification and direct rainfall: video walk-through - Kleinschmidt*. Tillgänglig: <https://www.kleinschmidtgroup.com/ras-post/terrain-modification-and-direct-rainfall-video-walk-through/> [2022-09-13].
- Gävle Kommun (2022). *Så drabbades Gävle av skyfallet 2021*. Tillgänglig: <https://www.gavle.se/kommunens-service/sa-drabbades-gavle-av-skyfallet-2021/> [2022-12-13].
- Hawkins, R. H., Ward, T. J., Woodward, D. E. & Mullem, J. A. V. (2009). *Curve number hydrology : state of the practice*. American Society of Civil Engineers, s. 10–20.
- Hjelmfelt, A. T. (2004). *Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall*. National Engineering Handbook Part 630 Hydrology. United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service.
- Jeppson, F. S. (2022). ”The influence of spatial variations in rain intensity for cloudburst modelling - a case study of the Gävle cloudburst”. Uppsala universitet. Tillgänglig: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1654566/FULLTEXT01.pdf> [2022-12-20].
- Jun, L., Changming, L., Zhonggen, W. & Kang, L. (2015). Two universal runoff yield models: SCS vs. LCM, vol. 25 (3), ss. 41330529. Tillgänglig: [www.geogsci.comwww.springerlink.com/content/1009-637x](http://www.geogsci.comwww.springerlink.com/content/1009-637x) [2022-09-30].
- Kaiser, G. & Rieger, S. (2019). *Skyfallsmodellering Slakthusområdet*. WSP. Tillgänglig: <https://edokmeetings.stockholm.se/welcome-sv/namnder-styrelser/radet-till-skydd-for-stockholms-skonhet/mote-2019-11-04/protocol/skyfallskarteringpdf?downloadMode=open> [2022-10-10].
- Karlsson, C., Sohlenius, G. & Becher, G. P. (2021). *Handledning för jordartsgeologiska kartor och databaser över Sverige (2021:17)*. Sveriges geologiska undersökning.
- King, K. W., Arnold, J. & Bingner, R. (1999). Comparison of Green-Ampt and curve number methods on Goodwin Creek watershed using SWAT. *Transactions of the ASAE*, vol. 42 (4), ss. 919.
- Lenderink, G., Barbero, R., Loriaux, J. M. & Fowler, H. J. (aug. 2017). Super-Clausius–Clapeyron Scaling of Extreme Hourly Convective Precipitation and Its Relation to Large-Scale Atmospheric Conditions. *Journal of Climate*, vol. 30 (15), ss. 6037–6052. Tillgänglig: <https://journals-ametsoc-org.ezproxy.its.uu.se/view/journals/clim/30/15/jcli-d-16-0808.1.xml> [2022-09-15].
- Loriaux, J. M., Lenderink, G., Roode, S. R. D. & Siebesma, A. P. (nov. 2013). Understanding Convective Extreme Precipitation Scaling Using Observations and an Entraining Plume Model. *Journal of*

- the Atmospheric Sciences*, vol. 70 (11), ss. 3641–3655. Tillgänglig: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/70/11/jas-d-12-0317.1.xml> [2022-09-15].
- Länsstyrelsen i Västmanlands län (2022). *Länsstyrelsen i Västmanlands läns externa webbGIS*. Tillgänglig: <https://ext-geoportal.lansstyrelsen.se/standard/?appid=7807aad2ab547798a2918cf2433c0f3>.
- Länstyrelsen Gävleborg (2022). *Utredning av skyfall och översvämningar i Gävleborgs län, augusti 2021*. Tillgänglig: <https://www.lansstyrelsen.se/download/18.74b418a31817ff11b11152a4/1656404563637/Utredning%20av%20skyfall%20och%20%C3%B6versv%C3%A4mningar%20i%20G%C3%A4vleborgs%20l%C3%A4n,%20augusti%202021.pdf> [2022-12-13].
- MSB (maj 2014). *Kartläggning av skyfalls påverkan på samhällsviktig verksamhet : framtagande av metodik för utredning på kommunal nivå (MSB694)*. Malmö: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. Tillgänglig: <https://rib.msb.se/filer/pdf/27365.pdf> [2022-09-20].
- MSB (2017). *Vägledning för skyfallskartering : tips för genomförande och exempel på användning (MSB1121)*. Tillgänglig: <https://rib.msb.se/filer/pdf/28389.pdf> [2022-08-30].
- MSB (nov. 2020). *Händelsescenario skyfall*. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. Tillgänglig: <https://rib.msb.se/filer/pdf/29399.pdf> [2022-09-14].
- Mullem, J. A. V., Woodward, D. E., Hawkins, R. H. & Jr, A. T. H. (2002). "RUNOFF CURVE NUMBER METHOD: BEYOND THE HANDBOOK". Proceedings of Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, USA.
- Ohlsson, A., Asp, M., Berggreen-Clausen, S., Berglöv, G., Björck, E., Johnell, A., Mårtensson, J. A., Nylén, L., Persson, H. & Sjökvist, E. (2015). Framtidsklimat i Västmanlands län enligt RCP-scenarier. *KLIMATOLOGI Nr*, vol. 19.
- Olsson, J., Berg, P., Eronn, A., Simonsson, L., Södling, J., Wern, L. & Yang, W. (2017). Extremregn i nuvarande och framtida klimat Analyser av observationer och framtidsscenarier. *KLIMATOLOGI Nr*, vol. 47.
- Olsson, J. & Josefsson, W. (2015). Skyfallsuppdraget ett regeringsuppdrag till SMHI. *KLIMATOLOGI Nr*, vol. 37.
- Pachauri, R. K., Meyer, L., France, S. H., Bank, W., Hegerl, G., Brinkman, S., Kesteren, L. van, Leprince-Ringuet, N. & Boxmeer, F. van (2015). *Climate Change 2014 - Synthesis Report*. IPCC. Tillgänglig: [https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_wcover.pdf](https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf) [2022-09-20].
- Ponce, V. M. & Hawkins, R. H. (jan. 1996). Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 1 (1), ss. 11–19.
- Pramsten, J. (2015). *Skyfallsmodellering för Stockholms stad*. Stockholm Vatten AB. Tillgänglig: <https://www.stockholmvattenochavfall.se/globalassets/dagvatten/pdf/skyfallsmodellering-huvudrapport-svab.pdf> [2022-10-10].
- Risberg, A. (2015). *Bilaga D - Framtagande av råhetstal för olika markanvändningar*. WSP. Tillgänglig: <https://miljobarometern.stockholm.se/content/docs/tema/klimat/skyfall/skyfallsmodellering/Bilaga-D-Framtagande-av-r%C3%A5hetstal-f%C3%B6r-olika-markanv%C3%A4ndningar-WSP.pdf> [2022-10-10].
- Sala Silvergruva (u.å.). *Historia fakta*. Tillgänglig: <https://www.salasilvergruva.se/?huvudlink=0m4LQKDU84JFoss&underlink=Historia4LQKDU84JF4MASL49DFJ4LQKDU84JFfakta> [2022-09-28].
- Salomonsson, M., Larsson, M., Karlsson, S., Alexandersson, H. & Andreasson, M. (2017). *Beredskapsplanering för skyfall*. Svenskt Vatten Utveckling. Tillgänglig: [https://www.svensktvatten.se/contentassets/9fda8707312944ba8968f374e54c418a/svu-rapport\\_2017-03.pdf](https://www.svensktvatten.se/contentassets/9fda8707312944ba8968f374e54c418a/svu-rapport_2017-03.pdf) [2022-09-01].
- SCB (2021). *Statistiska tätorter 2020, befolkning, landareal, befolkningstäthet per tätort*. Tillgänglig: <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/miljo/markanvandning/tatorter/> [2022-09-28].
- SGU (2022). *Sala. Jordarter 1:25 000 - 1:100 000 [Kartografiskt material]*. Tillgänglig: <https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-jordarter-25-100.html> [2022-09-28].
- Skilberg, L. (2020). "Utredning kring val av varaktighet vid skyfallskarteringar". Uppsala Universitet. Tillgänglig: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1392813/FULLTEXT01.pdf> [2022-12-14].

- SMHI (2021a). *Skyfall Och Rotblöta*. Tillgänglig: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/regn/rotblota-1.17339> [2022-09-11].
- SMHI (2021b). *Återkomsttider*. Tillgänglig: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/extremer/aterkomsttider-1.89085> [2022-09-11].
- SMHI (2021c). *RCP scenarier*. Tillgänglig: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/klimatmodeller-och-scenarier/rcp-er-den-nya-generationen-klimatscenarier-1.32914> [2022-09-11].
- SMHI (2022). *Hur mäts nederbörd?* Tillgänglig: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/regn/hur-mats-nederbord-1.637> [2022-08-16].
- Sparrenbom, C. & Jeppsson, H. (2022). *Grundvattenboken*. Swedish. Upplaga 1:1. Lund: Studentlitteratur.
- Svenskt Vatten (2011). *Nederbördsdata vid dimensionering och analys av avloppssystem (P104)*. 1. utgåvan. Vol. 104. Stockholm: Svenskt vatten.
- Svenskt Vatten (2016). *Avledning av dag-, drän-och spillvatten (P110)*. Stockholm.
- Söderström, M. & Piikki, K. (2016). *Digitala åkermarkskartan. Lerhalt i södra Sveriges matjord*. Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU). Tillgänglig: <https://gis-slu.maps.arcgis.com/apps/Viewer/index.html?appid=438a4fb4422442068bed6b539ec6e596> [2022-11-11].
- USDA (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds (TR-55)*. United States Department of Agriculture. Tillgänglig: [https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf) [2022-10-07].
- USDA (2009a). *Hydrologic Soil Groups*. National Engineering Handbook Part 630 Hydrology. United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service.
- USDA (2009b). *Hydrologic Soil-Cover Complexes*. National Engineering Handbook Part 630 Hydrology. United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service.
- Wallinder, S. (2015). "Skyfall över Västerås - en konsekvensstudie". Uppsala Universitet. Tillgänglig: <http://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:823649/FULLTEXT01.pdf> [2022-12-20].
- Wang, X. & Bi, H. (juni 2020). The effects of rainfall intensities and duration on SCS-CN model parameters under simulated rainfall. *Water (Switzerland)*, vol. 12 (6).
- Woodward, D. E., Hawkins, R. H., Jiang, R., Hjelmfelt, A. T., Mullem, J. A. V. & Quan, Q. D. (2003). "Runoff curve number method: Examination of the initial abstraction ratio". American Society of Civil Engineers (ASCE), s. 691–700.
- Vägverket (nov. 2008). *VVMB 310 Hydraulisk dimensionering*. Vägverket. Tillgänglig: [https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/11208/RelatedFiles/2008\\_61\\_vvmb\\_310\\_hydraulisk\\_dimensionering.pdf](https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/11208/RelatedFiles/2008_61_vvmb_310_hydraulisk_dimensionering.pdf) [2022-12-05].
- Åkesson, A. (2021). *SKYFALLSKARTERING GNOSJÖ*. WSP. Tillgänglig: <https://www.lansstyrelsen.se/download/18.746760b71768421ad551bd94/1611566470264/Skyfallskartering%20Gnosj%C3%B6%20210115.pdf> [2022-10-10].

# A Bilaga: Breaklines



Figur 32: Placering av breaklines i modellen. Ortofoto: RGB 0,5 m (2012) ©Lantmäteriet.

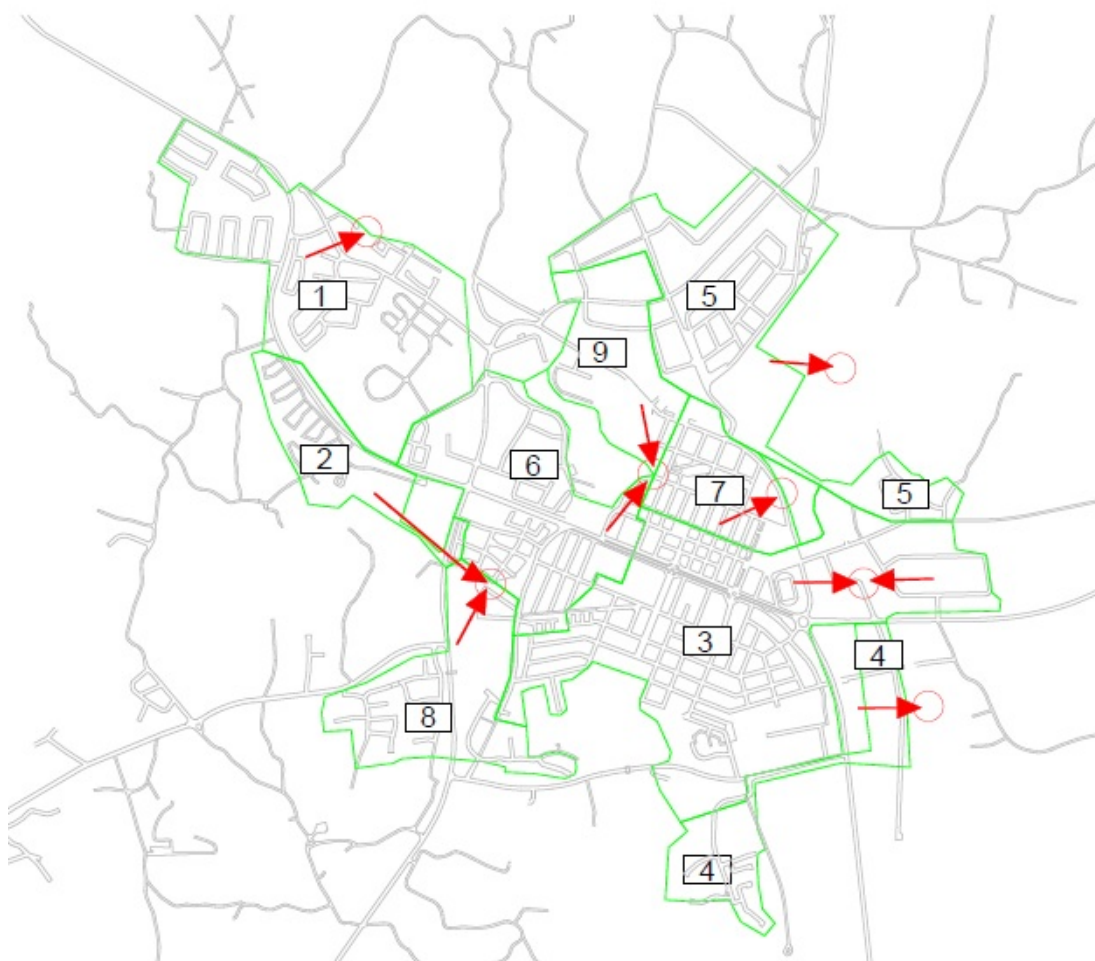
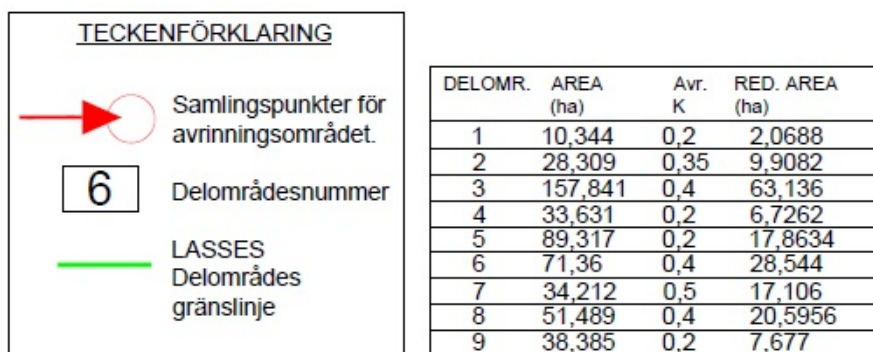


# B Bilaga: CN-tal

Markanvändning	Jordlager	Soil Group	Abstraction ratio	Minimum infiltration rate (mm/h)	ARCI	ARCII	ARCIII
NoData			0	0	96	98	99
NoData	Sandig_morar	C	0,05	1,3	96	98	99
NoData	Postglacial_le	D	0,05	0	96	98	99
NoData	Glacial_lera	D	0,05	0	96	98	99
NoData	Fyllning	C	0,05	1,3	96	98	99
NoData	Vatten		0	0	100	100	100
NoData	Urberg		0	0	96	98	99
NoData	Karrtorv	D	0,05	0	96	98	99
NoData	Isalvsedimen	A	0,05	7,6	96	98	99
NoData	Gyttjelera	D	0,05	0	96	98	99
NoData	Mossetorv	D	0,05	0	96	98	99
NoData	Postglacial_sa	B	0,05	3,8	96	98	99
NoData	Svamsedimen	C	0,05	1,3	96	98	99
IMPERMEAB	NoData	Ingen data	0	0	96	98	99
IMPERMEAB	Sandig_morar	C	0	0	96	98	99
IMPERMEAB	Postglacial_le	D	0	0	96	98	99
IMPERMEAB	Glacial_lera	D	0	0	96	98	99
IMPERMEAB	Fyllning	C	0	0	96	98	99
IMPERMEAB	Vatten		0	0	100	100	100
IMPERMEAB	Urberg		0	0	96	98	99
IMPERMEAB	Karrtorv	D	0	0	96	98	99
IMPERMEAB	Isalvsedimen	A	0	0	96	98	99
IMPERMEAB	Gyttjelera	D	0	0	96	98	99
IMPERMEAB	Mossetorv	D	0	0	96	98	99
IMPERMEAB	Postglacial_sa	B	0	0	96	98	99
IMPERMEAB	Svamsedimen	C	0	0	96	98	99
ODLAKER	NoData	Ingen data	0,05	0	96	98	99
ODLAKER	Sandig_morar	C	0,05	1,3	59	77	89
ODLAKER	Postglacial_le	D	0,05	0	68	83	92
ODLAKER	Glacial_lera	D	0,05	0	68	83	92
ODLAKER	Fyllning	C	0,05	1,3	59	77	89
ODLAKER	Vatten		0	0	100	100	100
ODLAKER	Urberg		0	0	96	98	99
ODLAKER	Karrtorv	D	0,05	0	68	83	92
ODLAKER	Isalvsedimen	A	0,05	7,6	30	50	70
ODLAKER	Gyttjelera	D	0,05	0	68	83	92
ODLAKER	Mossetorv	D	0,05	0	68	83	92
ODLAKER	Postglacial_sa	B	0,05	3,8	45	65	81
ODLAKER	Svamsedimen	C	0,05	1,3	59	77	89
OPMARK	NoData	Ingen data	0,05	0	96	98	99
OPMARK	Sandig_morar	C	0,05	1,3	44	64	81
OPMARK	Postglacial_le	D	0,05	0	53	72	86
OPMARK	Glacial_lera	D	0,05	0	53	72	86
OPMARK	Fyllning	C	0,05	1,3	44	64	81
OPMARK	Vatten		0	0	100	100	100
OPMARK	Urberg		0	0	96	98	99
OPMARK	Karrtorv	D	0,05	0	53	72	86
OPMARK	Isalvsedimen	A	0,05	7,6	16	30	50
OPMARK	Gyttjelera	D	0,05	0	53	72	86
OPMARK	Mossetorv	D	0,05	0	53	72	86
OPMARK	Postglacial_sa	B	0,05	3,8	28	47	67
OPMARK	Svamsedimen	C	0,05	1,3	44	64	81
BEBIND	NoData	Ingen data	0,05	0	96	98	99
BEBIND	Sandig_morar	C	0,05	1,3	76	88	94
BEBIND	Postglacial_le	D	0,05	0	82	91	96
BEBIND	Glacial_lera	D	0,05	0	82	91	96
BEBIND	Fyllning	C	0,05	1,3	76	88	94
BEBIND	Vatten		0	0	100	100	100
BEBIND	Urberg		0	0	96	98	99
BEBIND	Karrtorv	D	0,05	0	82	91	96
BEBIND	Isalvsedimen	A	0,05	7,6	56	74	87
BEBIND	Gyttjelera	D	0,05	0	82	91	96
BEBIND	Mossetorv	D	0,05	0	82	91	96
BEBIND	Postglacial_sa	B	0,05	3,8	70	84	92
BEBIND	Svamsedimen	C	0,05	1,3	76	88	94
SKOGBARR	NoData	Ingen data	0,05	0	96	98	99
SKOGBARR	Sandig_morar	C	0,05	1,3	39	59	77
SKOGBARR	Postglacial_le	D	0,05	0	48	68	83
SKOGBARR	Glacial_lera	D	0,05	0	48	68	83
SKOGBARR	Fyllning	C	0,05	1,3	39	59	77
SKOGBARR	Vatten		0	0	100	100	100
SKOGBARR	Urberg		0	0	96	98	99
SKOGBARR	Karrtorv	D	0,05	0	48	68	83
SKOGBARR	Isalvsedimen	A	0,05	7,6	16	30	50
SKOGBARR	Gyttjelera	D	0,05	0	48	68	83
SKOGBARR	Mossetorv	D	0,05	0	48	68	83
SKOGBARR	Postglacial_sa	B	0,05	3,8	23	40	61
SKOGBARR	Svamsedimen	C	0,05	1,3	39	59	77

BEFLAG	NoData	Ingen data	0,05	0	96	98	99
BEFLAG	Sandig_morar	C	0,05	1,3	53	72	86
BEFLAG	Postglacial_le	D	0,05	0	64	80	90
BEFLAG	Glacial_lera	D	0,05	0	64	80	90
BEFLAG	Fyllning	C	0,05	1,3	53	72	86
BEFLAG	Vatten		0	0	100	100	100
BEFLAG	Urberg		0	0	96	98	99
BEFLAG	Karrtorv	D	0,05	0	64	80	90
BEFLAG	Isalvsedimen	A	0,05	7,6	22	39	60
BEFLAG	Gyttjelera	D	0,05	0	64	80	90
BEFLAG	Mossetorv	D	0,05	0	64	80	90
BEFLAG	Postglacial_sa	B	0,05	3,8	39	59	77
BEFLAG	Svamsedimen	C	0,05	1,3	53	72	86
SKOGLOV	NoData	Ingen data	0,05	0	96	98	99
SKOGLOV	Sandig_morar	C	0,05	1,3	39	59	77
SKOGLOV	Postglacial_le	D	0,05	0	48	68	83
SKOGLOV	Glacial_lera	D	0,05	0	48	68	83
SKOGLOV	Fyllning	C	0,05	1,3	39	59	77
SKOGLOV	Vatten		0	0	100	100	100
SKOGLOV	Urberg		0	0	96	98	99
SKOGLOV	Karrtorv	D	0,05	0	48	68	83
SKOGLOV	Isalvsedimen	A	0,05	7,6	16	30	50
SKOGLOV	Gyttjelera	D	0,05	0	48	68	83
SKOGLOV	Mossetorv	D	0,05	0	48	68	83
SKOGLOV	Postglacial_sa	B	0,05	3,8	23	40	61
SKOGLOV	Svamsedimen	C	0,05	1,3	39	59	77
BEBHOG	NoData	Ingen data	0,05	0	96	98	99
BEBHOG	Sandig_morar	C	0,05	1,3	75	87	94
BEBHOG	Postglacial_le	D	0,05	0	80	90	95
BEBHOG	Glacial_lera	D	0,05	0	80	90	95
BEBHOG	Fyllning	C	0,05	1,3	75	87	94
BEBHOG	Vatten		0	0	100	100	100
BEBHOG	Urberg		0	0	96	98	99
BEBHOG	Karrtorv	D	0,05	0	80	90	95
BEBHOG	Isalvsedimen	A	0,05	7,6	48	68	83
BEBHOG	Gyttjelera	D	0,05	0	80	90	95
BEBHOG	Mossetorv	D	0,05	0	80	90	95
BEBHOG	Postglacial_sa	B	0,05	3,8	64	80	90
BEBHOG	Svamsedimen	C	0,05	1,3	75	87	94
VATTEN	NoData	Ingen data	0	0	100	100	100
VATTEN	Sandig_morar	C	0	0	100	100	100
VATTEN	Postglacial_le	D	0	0	100	100	100
VATTEN	Glacial_lera	D	0	0	100	100	100
VATTEN	Fyllning	C	0	0	100	100	100
VATTEN	Vatten		0	0	100	100	100
VATTEN	Urberg		0	0	100	100	100
VATTEN	Karrtorv	D	0	0	100	100	100
VATTEN	Isalvsedimen	A	0	0	100	100	100
VATTEN	Gyttjelera	D	0	0	100	100	100
VATTEN	Mossetorv	D	0	0	100	100	100
VATTEN	Postglacial_sa	B	0	0	100	100	100
VATTEN	Svamsedimen	C	0	0	100	100	100
BEBSLUT	NoData	Ingen data	0,05	0	96	98	99
BEBSLUT	Sandig_morar	C	0,05	1,3	85	93	97
BEBSLUT	Postglacial_le	D	0,05	0	87	94	97
BEBSLUT	Glacial_lera	D	0,05	0	87	94	97
BEBSLUT	Fyllning	C	0,05	1,3	85	93	97
BEBSLUT	Vatten		0	0	100	100	100
BEBSLUT	Urberg		0	0	96	98	99
BEBSLUT	Karrtorv	D	0,05	0	87	94	97
BEBSLUT	Isalvsedimen	A	0,05	7,6	71	85	93
BEBSLUT	Gyttjelera	D	0,05	0	87	94	97
BEBSLUT	Mossetorv	D	0,05	0	87	94	97
BEBSLUT	Postglacial_sa	B	0,05	3,8	80	90	95
BEBSLUT	Svamsedimen	C	0,05	1,3	85	93	97
OPTORG	NoData	Ingen data	0,05	0	96	98	99
OPTORG	Sandig_morar	C	0,05	0	96	98	99
OPTORG	Postglacial_le	D	0,05	0	96	98	99
OPTORG	Glacial_lera	D	0,05	0	96	98	99
OPTORG	Fyllning	C	0,05	0	96	98	99
OPTORG	Vatten		0	0	100	100	100
OPTORG	Urberg		0	0	96	98	99
OPTORG	Karrtorv	D	0,05	0	96	98	99
OPTORG	Isalvsedimen	A	0,05	0	96	98	99
OPTORG	Gyttjelera	D	0,05	0	96	98	99
OPTORG	Mossetorv	D	0,05	0	96	98	99
OPTORG	Postglacial_sa	B	0,05	0	96	98	99
OPTORG	Svamsedimen	C	0,05	0	96	98	99

# C Bilaga: Tekniska avrinningsområden i Sala



**Figur 33:** Tekniska avrinningsområden i Sala tätort<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Personlig kommunikation: projekteringsingenjör på Sala kommun. E-post 25:e oktober 2022