



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 26009

Examensarbete 30 hp

Februari 2026

Utredning av olika skyfallsåtgärder i Älvdansen, Enköping

Elina Hanson





Abstract

Cloudburst causes major and costly problems in Sweden every year, such as flooded basements and traffic disruptions. To deal with the problem cloudburst and flood mitigation measures are needed. However, cloudburst measures require large areas, which create goal conflicts when they are implemented in urban areas where space is already limited. For example, the areas can be developed or used for recreation. To address this challenge, nature-based stormwater solutions can be used. Nature-based stormwater solutions can provide several additional ecosystem services, such as improved water quality, increased biodiversity, recreation and health. However, cloudburst measures are a complex challenge, and there are still considerable uncertainties about which measures are suitable for which places.

This project examines how different flood mitigation measures can reduce cloudburst-related floods in the residential area of Älvdansen using a 2D-hydraulic model in HEC-RAS. The modelling was essential for determining how different subcatchments contributed to high flows, where it was appropriate to implement cloudburst measures and how the measures should be dimensioned. To redesign existing dikes to swales, or in other ways increase the volume of the dikes, can be a key flood measure in Älvdansen and other similar areas. If this measure is not sufficient, its effectiveness can be improved by adding a dry pond adjacent to the main problem area. Nature-based cloudburst measures have great potential, both in terms of reducing pluvial floods and providing ecosystem services. However, more studies are needed to determine how the measures should be located and designed to achieve optimal performance.

Keyword: cloudburst, nature-based solutions, flood mitigation measures, HEC-RAS, 2D-hydraulic modeling, ecosystem services

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten

Uppsala universitet, Uppsala

Handledare: Lukas Wallberg Rehn Ämnesgranskare: Roger Herbert

Examinator: Veijo Pohjola

REFERAT

Utredning av olika skyfallsåtgärder i Älvdansen, Enköping

Elina Hanson

Skyfall orsakar varje år stora, kostsamma problem i Sverige, så som källaröversvämningar och trafikstörningar. För att komma till rätta med problemen behövs skyfallsåtgärder. En utmaning med skyfallsåtgärder är dock att de kräver stora ytor, vilket skapar målkonflikter när åtgärderna implementeras i urbana miljöer där det redan råder platsbrist. Till exempel skulle ytorna kunna bebyggas eller användas för rekreation. För att lösa denna utmaning kan naturbaserade skyfallslösningar användas. Naturbaserade skyfallslösningar kan bidra med flera olika mervärden, såsom förbättrad vattenkvalitet, ökad biologisk mångfald, rekreation och hälsa. Skyfallsåtgärder är dock en komplex utmaning och det råder fortfarande stor osäkerhet kring vilka lösningar som är lämpliga på vilka platser.

I det här arbetet undersöktes hur olika typer av skyfallsåtgärder kan minska skyfallsrelaterade översvämningar i bostadsområdet Älvdansen i Enköping, med hjälp av en hydraulisk tvådimensionell modell i HEC-RAS. Modelleringen var avgörande för att kunna fastställa hur de olika avrinningsområdena bidrog till höga flöden, var det är lämpligt att anlägga skyfallsåtgärder och hur åtgärderna bör dimensioneras. Att göra om befintliga diken till svackdiken, eller på något annat sätt öka dikenens volym, kan vara en viktig översvämningståtgärd i Älvdansen och i andra liknande områden. Om denna åtgärd inte räcker kan dess effektivitet ökas genom att den kombineras med en överdämningsyta i anslutning till det största problemområdet. Naturbaserade skyfallsåtgärder har en stor potential både sett till att minska skyfallsrelaterade översvämningar och att bidra med mervärden. Det behövs dock fler studier om hur åtgärderna bör placeras och dimensioneras för att uppnå högsta funktion.

Nyckelord: skyfall, naturbaserade lösningar, översvämningståtgärder, HEC-RAS, 2D-hydraulisk modellering, ekosystemtjänster

Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala universitet, Villavägen 16, 752 36 Uppsala, Sverige

FÖRORD

Detta examensarbete markerar avslutningen mina studier på civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet. Arbetet har utförts i samarbete med Water Revival Systems (WRS) i Uppsala med Lukas Wallberg Rehn som handledare. Ämnesgranskare har varit Roger Herbert vid Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet.

Det är många personer som har bidragit till detta examensarbete. Jag vill börja med att tacka alla på WRS som från första dagen har bjudit in mig i er härliga gemenskap och positiva miljö. Ni har gjort det här halvåret till en mycket rolig och lärorik tid. Tack Roger, för din tydliga och positiva vägledning och dina goda råd. Ett extra stort tack till min handledare Lukas för allt ditt tålamod, omtanke och kloka synpunkter.

Sist men inte minst vill jag tacka min familj och mina vänner för att ni har stöttat mig och bidragit med så mycket glädje under hela utbildningen.

Elina Hanson,

Uppsala 2026

Copyright © Elina Hanson och Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala universitet

UPTEC W 26 009, ISSN 1401-5765

Digitalt publicerad i DiVA, 2026, genom institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet. (<http://www.diva-portal.org/>)

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Den svenska sommaren bjuder på sol, bad och ljusa kvällar, men också skyfall. Varje år orsakar skyfall stora skador runt om i Sverige, i form av exempelvis källaröversvämningar och trafikstörningar. Under sommaren 2021 drabbades Gävle av ett kraftigt skyfall som skadade 5 % av alla villor i länet och kostade nästan två miljarder kronor. Går det riktigt illa kan skyfall till och med orsaka dödsfall, vilket inträffade så sent som i september 2025 då en man omkom i en bilolycka när skyfallet spolade bort vägen. Skyfallsproblematiken förväntas dessutom bli ännu vanligare och mer omfattande på grund av klimatförändringarna. Men, vad är lösningen? Hur skyddar vi oss från framtida skyfallsrelaterade översvämningar? Svaret är: skyfallsåtgärder.

I normalfallet kan dagvattenssystemet, såsom gatubrunnar och ledningsnätet, avleda regnvattnet som faller på vägar och tak. Regn som faller direkt på jorden rinner ner i marken genom så kallad infiltration. Vid kraftiga skyfall räcker varken dagvattenssystemets eller markens kapacitet till och översvämningar uppstår. Då behövs skyfallsåtgärder, vilka har till uppgift att avleda vattnet från känsliga ytor till ytor som kan översvämmas utan allvarliga konsekvenser. Skyfallsåtgärder är dock en komplex utmaning och det råder fortfarande stor osäkerhet om vilka lösningar som är lämpliga på vilka platser. Det finns därför ett behov av fler fallstudier för att avgöra hur åtgärdstypernas effektivitet varierar mellan olika platser, samt hur åtgärderna bör placeras och dimensioneras utifrån detta.

I den här studien används en skyfallsmodell för att utvärdera fyra olika typer av skyfallsåtgärder för bostadsområdet Älvdansen i Enköping med omnejd. Älvdansen är idag ett mycket översvämningsutsatt område, vilket gör det till ett utmärkt studieområde. Studien visar att Älvdansen kommer att drabbas av stora översvämningar vid ett kraftigt skyfall utifrån nuvarande förutsättningar. Det finns en betydande fara för att översvämningsrisken i Älvdansen kan öka kraftigt i framtiden. Mindre förändringar i områdets höjdsättning eller markanvändning, såsom att bygga om E18 eller bebygga mark norr om E18, kan få allvarliga konsekvenser vid ett framtida skyfall. Samtidigt finns det goda möjligheter att minska översvämningsriskerna i Älvdansen. Studien visar att en effektiv och relativt enkel översvämningsåtgärd är att göra om Skvalbäcken och andra befintliga diken i området till svackdiken, ett bredare gräsbeklätt dike med en svag släntlutning. Åtgärden blir extra effektiv om den kombineras med en så kallad överdämningsyta i anslutning till det största problemområdet. En överdämningsyta, också kallad torr damm, är en nedsänkt grönyta som vid mycket nederbörd tillfälligt fylls med vatten.

Två andra åtgärdstyper som utvärderades var genomsläpplig beläggning och en vall runt Älvdansen. Genomsläpplig beläggning är en markbeläggning som kan ersätta vanlig beläggning, så som asfalt, och ökar dräneringen av regnvatten på platsen. Enligt modelleringen är genomsläpplig beläggning inte en effektiv översvämningsåtgärd på den här platsen, men detta resultat är mycket osäkert. Noggrannare studier av markegenskaperna på platsen behövs för att det ska vara möjligt att säkert avgöra om åtgärdstypen passar området eller inte. En vall runt Älvdansen kan minska översvämningar i området, men de tidigare nämnda kombinationen med svackdike och överdämningsyta är en effektivare översvämningsåtgärd. Det största problemet med vällen är att det inte bara stänger vatten ute, den stänger också in vatten.

Studien har fokuserat på naturbaserade skyfallslösningar. Naturbaserade lösningar är ett samlingsbegrepp för åtgärder som utgår från naturens egen förmåga att lösa olika

samhällsproblem, så som översvämningar, höga temperaturer, buller och spridning av föroreningar. Åtgärderna är multifunktionella och kostnadseffektiva, eftersom de inte bara löser det aktuella samhällsproblemet, utan bidrar också till en ökad biologisk mångfald och mänskligt välbefinnande. Detta gör att naturbaserade skyfallslösningar passar bra i urbana miljöer där det redan råder platsbrist och där skyfallsåtgärder som kräver stora ytor riskerar att prioriteras bort till förmån för exempelvis ny bebyggelse och rekreationsytor.

Svackdiken, överdämningsytor och genomsläpplig beläggning räknas alla som naturbaserade lösningar och kan alla bidra med flertalet mervärden, så som till exempel förbättrad vattenkvalitet. En vall är inte en naturbaserad lösning, men det är en översvänningsåtgärd som Enköpings kommun tidigare bedömt vara lämplig att anlägga i området och vallen som åtgärd studerades därför ändå. Svackdiken och överdämningsytor har potential att bidra med flest mervärden. Förutom förbättrad vattenkvalitet kan de bidra med värden så som kunskap och utbildning, rekreation och hälsa samt en ökad biologisk mångfald. De båda åtgärdstyperna är gröna, tydligt synliga åtgärder, vilket gör att de kan bidra till att personerna som passerar får en ökad medvetenhet om översvämningar. Om åtgärderna och miljön runt omkring utformas med en vacker och lugn gestaltning skapas dessutom en naturnära plats där människor kan vistas för att få återhämtning. Det är mycket viktigt att ta hänsyn till mervärdena under designprocessen för att optimera vinsterna. I området runt Älvdansen finns stora designmöjligheter. Exempelvis kan områdets tillgänglighet och förutsättningar för rekreation förbättras genom att nya promenadstigar anläggs i anslutning till svackdikena och överdämningsytorna samtidigt som estetiskt tilltalande och funktionella växter används. Om åtgärderna dessutom kombineras med informationsskyltar bidrar det till ytterligare kunskap. Tekniska mervärden så som vattenrening kan också förbättras om åtgärdsdesignen optimeras. Det är dock också viktigt att vara medveten om att det svårt att avgöra i vilken omfattning ett mervärde tillgodoses, såsom hur väl vattnet renas eller hur mycket folk reflekterar och lär sig om översvänningsåtgärdernas syfte.

En central del av denna studie är modellering av skyfall, både utifrån områdets nuvarande förutsättningar och utifrån hypotetiska scenarier där olika skyfallsåtgärder är anlagda. Modellering är ett mycket användbart verktyg, där ovanliga händelser kan simuleras och olika scenarier testas. Men, det finns också alltid osäkerheter kopplade till modellering, särskilt i skyfallsmodeller som denna där det inte finns historiska data som kan bekräfta modellens resultat. Osäkerheterna påverkar resultatets tillförlitlighet negativt och det är därför viktigt att förstå inom vilket spann som resultatet kan variera. I den här studien gör osäkerheterna det svårt att avgöra exakt hur stor översvämningen i Älvdansen skulle bli vid ett kraftigt skyfall. Det är dock möjligt att i framtida studier minska flera av osäkerheterna i modellen för att få ett noggrannare resultat. Det vi utifrån den här studien redan idag kan säga är att svackdiken och överdämningsytor kan vara viktiga översvänningsåtgärder i Älvdansen och andra liknade områden.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	Inledning.....	1
1.1	Syfte	2
1.2	Frågeställningar.....	2
2	Bakgrund.....	3
2.1	Regn och skyfall.....	3
2.1.1	Återkomsttid.....	3
2.1.2	Klimatfaktor	5
2.1.3	Skyfallskartering	5
2.2	Skyfallsåtgärder.....	6
2.2.1	Svackdiken	7
2.2.2	Överdämningsytor.....	7
2.2.3	Genomsläpplig beläggning.....	8
2.3	Mervärden	8
3	Skyfallsmodellering	10
3.1	Hydraulisk 2D-modellering i HEC-RAS	10
3.1.1	Saint-Venant-ekvationerna.....	10
3.1.2	Beräkningsnät.....	11
3.1.3	Cellstorlek och tidssteg	12
3.2	Indata.....	13
3.2.1	Höjdmodell.....	13
3.2.2	Typregn	13
3.2.3	Råhet.....	14
3.2.4	Infiltration.....	14
3.2.5	Modellering av dagvattennätet.....	15
4	Metod	16
4.1	Områdesbeskrivning.....	16
4.1.1	Avrinning runt Älvdansen.....	17
4.2	Uppsättning av nulägesmodell	20
4.2.1	Modellavgränsning, beräkningsnät och tidssteg	20
4.2.2	Höjdmodell.....	21
4.2.3	Råhet.....	22
4.2.4	Infiltration.....	22
4.2.5	Externa och interna randvillkor.....	23
4.2.6	Simulering av skyfall	24

4.3	Bedömning av lämpliga åtgärdsplatser och åtgärdstyper.....	25
4.4	Modellering av åtgärder	25
4.4.1	Utvärdering av åtgärdernas effekt	26
4.5	Känslighetsanalys	27
5	Resultat.....	29
5.1	Översvämningsutbredning – Nulägesmodellen	29
5.1.1	Översvämningsutbredning i Älvdansen	30
5.2	Flödesvägar och flödesstorlekar	31
5.3	Åtgärdsbehov	32
5.3.1	Utformning och dimensionering av åtgärder.....	32
5.4	Översvämningsutbredning – med åtgärder	35
5.5	Känslighetsanalys.....	36
6	Diskussion	38
6.1	Översvämningsutbredning utan åtgärder	38
6.2	Modellerade åtgärder.....	38
6.3	Mervärden	41
6.4	Osäkerheter i modellen.....	42
6.4.1	Känslighetsanalysen	42
6.4.2	Andra felkällor	43
6.5	Vidare studier	44
7	Slutsatser	46
8	Referenser.....	47
	Bilaga A: Tidsteg	i
	Bilaga B: Råhet	ii
	Bilaga C: Infiltrationsparamterar.....	iii
	Bilaga D: Översvämningsutbredning vid <i>S1, S2 och DP2_2</i>	viii
	Bilaga E: Flödet i Mellersta diket vid PP	x

1 INLEDNING

Skyfall medför i Sverige varje år stora problem, till exempel källaröversvämningar och trafikstörningar, och stora kostnader till följd av dessa (Olsson et al. 2017). Ett exempel är skyfallet över Gävle sommaren 2021 som orsakade skador på nästan två miljarder kronor och skadade 5 % av alla villor i Gävleborg (Finansinspektionen 2023). I värsta fall kan skyfallen leda till dödsfall, vilket inträffade vid skyfallet i Västernorrland i början av september 2025, där en person omkom i bilolycka på grund av en bortspolad väg (Krisinformation 2025). Problemen kommer troligtvis bli ännu vanligare och mer omfattande i framtiden på grund av klimatförändringarna. Enligt Intergovernmental Panel on Climate Change:s (IPCC) sjätte utvärderingsrapport förväntas den extrema nederbörden i Europa öka i framtiden till följd av den globala uppvärmningen (Seneviratne et al. 2023).

I normalfallet är det dagvattensystemets uppgift att avleda regnvatten. Men systemet klarar inte att hantera skyfallens höga regnintensitet och stora volymer (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) 2017). För att minska risken för skyfallsrelaterade skador behövs därför särskilda skyfallsåtgärder för dagvattensystem. Med hjälp av dessa åtgärder kan vattnet avledas från känsliga områden till ytor som kan översvämmas utan allvarliga konsekvenser (MSB 2017).

En utmaning med skyfallsåtgärder är att de kräver stora ytor, vilket medför att det skapas målkonflikter när dessa ska implementeras i urbana miljöer där det redan råder platsbrist (MSB 2017). Till exempel skulle ytorna kunna bebyggas eller användas för rekreation. Åtgärderna som implementeras i sådana miljöer bör därför vara multifunktionella (MSB 2017). Ett sätt att uppnå multifunktionaliteten är att använda naturbaserade skyfallslösningar. Naturbaserade lösningar är ett samlingsbegrepp för åtgärder som utgår från naturens egna förmåga att lösa olika samhällsproblem, så som översvämningar, höga temperaturer, buller och spridning av föroreningar (Naturvårdsverket 2021). Åtgärderna är multifunktionella och kostnadseffektiva, eftersom de inte bara löser det aktuella samhällsproblemet, utan bidrar också till en ökad biologisk mångfald och mänskligt välbefinnande (Naturvårdsverket 2021). Studier visar att naturbaserade översvänningsåtgärder kan vara effektiva och är ett viktigt verktyg för att skydda samhällen från översvämningar kopplade till kraftigt regn (Liu et al. 2014; Haghighatafshar et al. 2018; Kourtis et al. 2020). Skyfallsåtgärder är dock en komplex utmaning och det råder fortfarande en stor osäkerhet kring vilka lösningar som är lämpliga på vilka platser. Åtgärdernas effektivitet är svår att bedöma eftersom den bland annat är platsberoende (Zellner et al. 2016; Green et al. 2021).

Arbetet med skyfall i Sverige har under de senaste 10 åren gått framåt på flera fronter. Mellan åren 2015 och 2017 genomförde Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI) på uppdrag av regeringen en omfattande studie om kraftig nederbörd i nuvarande och framtida klimat (Olsson et al. 2017). MSB publicerade år 2017 och år 2023 två vägledningar med tips och riktlinjer kring hur och när skyfallskarteringar bör genomföras (MSB 2017; 2023). Det saknas dock fortfarande nationella riktlinjer kring vilka skyfallsåtgärder som bör användas för att motverka de problem som skyfallskarteringarna identifierar. Naturbaserade översvänningsåtgärder har studerats i Sverige och runt om i världen (Esraz-UI-Zannat et al. 2024). Men fler fallstudier behövs för att det ska vara möjligt att beskriva hur åtgärdstypernas effektivitet varierar utifrån givna platsspecifika förutsättningarna, samt hur åtgärderna bör placeras och dimensioneras utifrån detta.

I den här studien utvärderas olika skyfallsåtgärder genom en modelleringsstudie över bostadsområdet Älvdansen i Enköping. Älvdansen är idag ett mycket översvämningsutsatt område, som drabbas av översvämningar redan vid små regn (Wallin Nilsson 2024). Området riskerar därför drabbas mycket hårt vid ett kraftigt skyfall, vilket gör det till ett lämpligt studieområde.

1.1 SYFTE

Syftet med detta projekt är att undersöka hur olika typer av skyfallsåtgärder, med fokus på naturbaserade lösningar, kan minska skyfallsrelaterade översvämningar i bostadsområdet Älvdansen. Detta görs genom att upprätta en skyfallsmodell över Älvdansen med omnejd med hjälp av programvaran HEC-RAS. Arbetet inkluderar också förslag på placering och dimensionering av åtgärderna. Syftet är också att undersöka hur åtgärderna kan tillgodose flera olika mervärden, såsom dagvattenrening, rekreation och förstärkt biodiversitet.

1.2 FRÅGESTÄLLNINGAR

För att uppnå syftet ska följande frågeställningar besvaras:

- Hur omfattande blir översvämningarna vid Älvdansen till följd av ett skyfall motsvarande ett 100-årsregn om inga åtgärder anläggs?
- Vilka olika typer av åtgärder kan vara relevanta för att minska skyfallsrelaterade översvämningsrisker i området?
- Hur påverkar åtgärdernas placering och dimensionering förmågan att minska de modellerade översvämningarna?
- Vilka andra typer av mervärden kan de föreslagna åtgärderna tillgodose?

2 BAKGRUND

2.1 REGN OCH SKYFALL

Enligt SMHI:s definition är ett skyfall ett regntillfälle då det kommer minst 50 mm regn på en timme eller 1 mm på en minut (Olsson et al. 2017), men ofta uppfattas även mindre regn från 40 mm per dygn som skyfall (SMHI u.å.a). Det är mycket ovanligt att det nederbördstillfällena uppfyller den första delen av SMHI:s definition (Ohlsson & Josefsson 2015). Under perioden år 1996-2017 har SMHI bara uppmätt nio tillfällena då det regnat minst 50 mm på en timme (Olsson et al. 2017). Den andra delen av definitionen, 1 mm regn på en minut, uppfylls desto oftare. I genomsnitt kommer det minst 1 mm regn på en timme drygt två gånger per år i Sverige (Olsson et al. 2017).

När nederbördsintensiteten överskrider markens infiltrationsförmåga och vatten inte kan rinna bort uppstår pluviala översvämningar (Ohlsson & Josefsson 2015). En pluvial översvämning syftar på att det är en översvämning orsakad av regn, till skillnad från en fluviala översvämning som syftar på översvämning från sjöar och vattendrag (SMHI u.å.b). Pluviala översvämningar är vanligast i städer, där det finns många hårdgjorda ytor (Ohlsson & Josefsson 2015), och under sommaren (SMHI u.å.a; u.å.c). Kraftiga skyfall över urbana miljöer kan orsaka mycket stora skador och bli väldigt kostsamma. Ett exempel är skyfallet över Skåne år 2014 som resulterade i 2200 översvämmade källare, 3000 förstörda bilar och skadekostnader på över 300 miljoner kronor (Hernebring et al. 2015). Skyfall har också lett till att samhällsviktig verksamhet skadas, exempelvis översvämmades delar av Akademiska sjukhuset i Uppsala i samband med ett kraftigt skyfall sommaren 2018 (Forsell 2018; Hallqvist & Idemar 2019).

Skyfall kan också leda till erosion och föroreningstransport, vilket i sin tur också kan påverka vattenkvaliteten negativt (Ohlsson & Josefsson 2015). Andra risker associerade med skyfall är jordskred och slamströmmar (Olsson et al. 2022), flytande massor av sediment, organiskt material och vatten som rinner ner för branta slutningar (Hungr 2005). Erosionen kan leda till omfattande skador på infrastrukturen. Exempelvis orsakade skyfallet i Västernorrland år 2025 stora trafikstörningar när vägar och banvallar spolades bort vilket bland annat ledde till att två tåg spårade ut (Carlzén et al. 2025).

Hur stora konsekvenser ett skyfall får påverkas av dess storlek, men också av många andra faktorer (Olsson et al. 2017). I urbana miljöer finns det ofta en tydlig koppling mellan översvämningarna och regnintensiteten. Faktorer som exempelvis topografi, markanvändning och avloppsnät påverkar också (Olsson et al. 2017).

2.1.1 Återkomsttid

För att beskriva hur ofta en ovanlig händelse, så som skyfall, sker används ofta begreppet återkomsttid (SMHI u.å.d). Återkomsttiden säger att händelsen i genomsnitt inträffar eller överskrider en gång under tidsperioden (Ohlsson & Josefsson 2015). Till exempel kan ett 100-årsregn förväntas inträffa en gång under en 100-årsperiod, medan ett 10-årsregn förväntas inträffa tio gånger under samma period. Återkomsttider är dock endast ett mått på sannolikhet och säger inget om huruvida en specifik händelse faktiskt kommer att inträffa under en given tidsperiod (Ohlsson & Josefsson 2015). Under längre perioder ackumuleras också sannolikheten för att händelsen ska inträffa (MSB 2023). Sannolikheten, P_T , för att en händelse med återkomsttiden T år ska inträffa under ett år beräknas på följande sätt:

$$P_T = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Den ackumulerade sannolikheten, $P_{T,t}$, för att en händelse med återkomsttiden T år ska inträffa under tidsperioden t blir därmed:

$$P_{T,t} = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^t \quad (2)$$

Detta innebär att sannolikheten för att ett 100-årsregn ska inträffa under ett år är 1 % medan ackumulerade sannolikheten för att det ska inträffa under en 100-årsperiod är 63 %.

För att beräkna återkomsttider behövs långa tidsserier med mätdata (Wehner et al. 2024). Återkomsttiden för ett extremt regn påverkas både av regnets volym och varaktighet (Olsson et al. 2017). Regnvolymen för en given återkomsttid och varaktighet kan beräknas med hjälp av formler framtagna från historisk nederbördsstatistik (MSB 2023). I Sverige är det vanligt att använda Dahlströms formel från år 2010. Dahlströms formel beskriver sambandet mellan regnintensiteten uttryckt i l/(s ha), i_τ , återkomsttiden i månader, τ , och varaktigheten i antal minuter, Δt_j , enligt följande ekvation (Dahlström 2010):

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

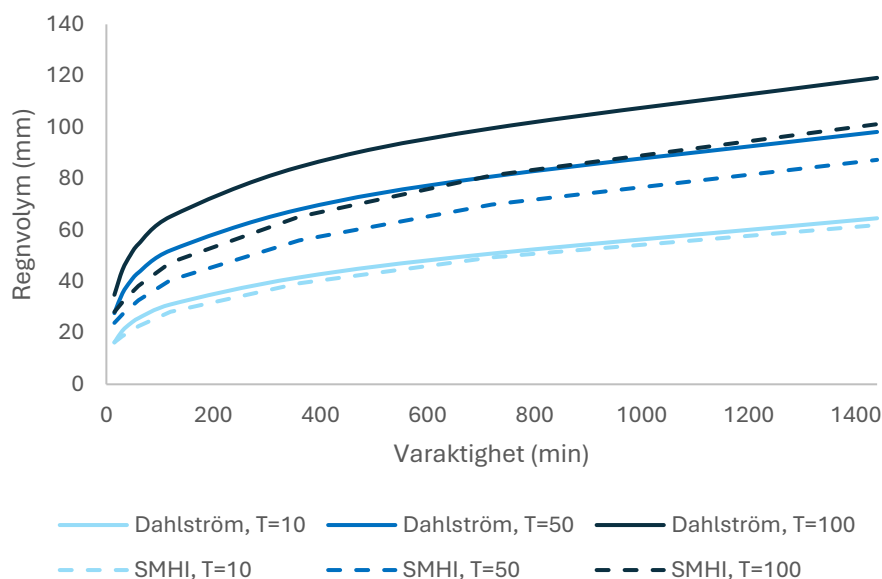
Den totala regnvolymen från regntillfället uttryckt i mm, R , kan sedan beräknas genom följande ekvation:

$$R = i_\tau \cdot 60 \cdot \Delta t_j / 1000. \quad (4)$$

Sedan år 2017 finns det dock nyare statistik från SMHI (MSB 2023). SMHI:s nya statistik visar att Dahlströms formel stämmer för återkomsttider på mindre än tio år (Olsson et al. 2017). För längre återkomsttider ger Dahlströms formel dock en överskattning av regnvolymen för områden som inte ligger i sydvästra Sverige (Figur 1) eftersom Sverige inte har ett homogent regnklimat. Både den genomsnittliga magnituden och frekvensen för kraftig korttidsnederbörd (≥ 5 mm/15 min) ökar söderut i landet (Olsson et al. 2019). Med hjälp av den nya nederbördsstatistiken har SMHI delat upp Sverige i fyra olika regioner: sydvästra, sydöstra, mellersta och norra Sverige, samt tagit fram en ny formel anpassad efter dessa regioner (Olsson et al. 2017). Regnvolymen, R , uttrycks på följande sätt med SMHI:s formel:

$$R = M(V) \cdot k(T) \cdot V^{p(T)} \quad (5)$$

där V är varaktigheten [min], T är återkomsttiden [år], $M(V)$ är en skalningsfaktor och $k(T)$ och $p(T)$ är två regionala parameterfunktioner (Olsson et al. 2017).



Figur 1: Total nederbördsvolym för regn med varierande varaktighet och återkomsttid (10 år, 50 år och 100 år) beräknat med hjälp av Dahlströms formeln (ekvation 4) och SMHI:s formel (ekvation 5) för den sydöstra regionen av Sverige.

2.1.2 Klimatfaktor

Enligt IPCC förväntas den extrema nederbörden i Europa öka i framtiden till följd av klimatförändringarna (Seneviratne et al. 2023). Hur stora klimatförändringarna blir beror på nuvarande och framtida utsläpp av växthusgaser (Pachauri & Mayer 2015). Därför har IPCC tagit fram olika klimatscenarioer, RCP (Representative Concentration Pathways), som beskriver hur växthusgaskoncentrationen förändras med tiden och hur det påverkar den globala uppvärmningen. RCP 4,5 innebär att koldioxidutsläppen ökar långsamt fram tills år 2040 och RCP 8,5 innebär fortsatt höga utsläpp av koldioxid fram tills år 2100 (Pachauri & Mayer 2015). För skyfall innebär RCP 4,5 en ökning av regnmängden med 20 % och RCP 8,5 en ökning med 40 %, för tidsperioden år 2071-2100 (Olsson et al. 2017). MSB (2023) rekommenderar generellt att RCP 8,5 används vid skyfallskarteringar, men att det kan vara relevant att titta på andra klimatscenarioer också. Klimatscenarioerna bidrar med osäkerhet och när dessa används bör osäkerhetens storlek uppskattas (MSB och SMHI 2020).

Nederbördsförändringen kan modelleras genom att den förväntade regnmängden utifrån dagens klimat multipliceras med en klimatfaktor (MSB 2023). En klimatfaktor på exempelvis 1,4 motsvarar en ökning med 40 % jämfört med dagens klimat.

2.1.3 Skyfallskartering

För att samhället ska kunna vidta åtgärder och skyddas från negativa konsekvenser till följd av ett skyfall måste man först veta vilka områden som riskeras att drabbas. När erfarenhet från tidigare översvämningar saknas kan en skyfallskartering användas för att beskriva vilka områden i samhället som riskerar att översvämmas i samband med ett givet extremt regn (MSB 2017). Under karterningen beräknas översvämningsutbredningen och flödesvägarna som uppstår vid ett skyfall (MSB 2017). Det finns flera olika syften till att en skyfallskartering utförs. Några exempel är översiktliga studier där potentiella problemområden identifieras, underlag för fysisk planering, så som översikts- eller detaljplaner, och dimensionering av åtgärder (MSB 2023). Beroende på syftet används olika karterningsmetoder. Karterningen sker antingen genom en

lågpunktskartering eller med hjälp av en två dimensionell hydraulisk modell (MSB 2017; 2023).

En lågpunktskartering är ett statistiskt verktyg där det antas att allt vatten rinner som ytavrinning och fyller alla fördjupningar med vatten (MSB 2023). Vid en lågpunktskartering tas ingen hänsyn till tidsaspekten eller dagvattenätet. Kartering av lågpunkter är den enklaste metoden och bör endast användas vid förenklade analyser (MSB 2017; 2023). Lågpunktskarteringen kan till exempel användas för att avgöra vilka riskområden som behöver studeras närmare eller som ett underlag vid val av skyfallsmodell (MSB 2023).

Vid skyfallskararteringar för detaljerade och fördjupade analyser används tvådimensionella (2D) hydrauliska modeller (MSB 2023). Modellen är dynamisk vilket innebär att den beräknar översvämningsutbredningen och vattenflödena förändras med tiden under ett givet regn. I modellen kan markanvändningen, infiltrationen såväl som ledningsnätet beskrivas. Modellen kan byggas upp med olika noggrannhet, anpassat efter syftet med skyfallskararteringen (MSB 2023). Hydraulisk 2D-modellering i HEC-RAS beskrivs mer ingående i avsnitt 3.

2.2 SKYFALLSÅTGÄRDER

Skyfallsåtgärder bygger på två principer: fördröjning och avledning av regnvattnet (MSB 2017). Åtgärderna kan kategoriseras efter deras funktion, i kategorierna skyfallsleder, skyfallsytor och styrningsåtgärder (Stockholms stad 2021). Skyfallsleder är utpekade stråk där vatten kan avledas vid ett skyfall, till exempel vägar, diken och rännor. Skyfallsytor är utpekade ytor där vattnet kan magasineras utan att orsaka skada under skyfallet (Stockholms stad 2021), till exempel översvämningsytor, dammar och underjordiska magasin (Göteborgs Stad 2022). Stockholms stad (2021) rekommenderar att styrningsåtgärder som vallar eller murar bör i huvudsak användas som ett komplement till de två övriga åtgärdstyperna.

Översvämningsåtgärder har olika funktion beroende på i vilken skala (mikro-, meso- eller makroskala) de implementeras (Haghighatafshar et al. 2018). Mikroskala syftar till enskilda tomter eller byggnader och den närmaste omgivningen (Green et al. 2021). Mesoskala är flera områden i mikroskala tillsammans, till exempel ett kvarter eller ett litet samhälle. Makroskala syftar till större urbana områden, till exempel en kommun (Green et al. 2021).

Det här arbetet fokuserar på skyfallsåtgärder som klassas som naturbaserade lösningar, inte grå lösningar så som underjordiska betongmagasin och ledningar. Naturbaserade lösningar är ett samlingsbegrepp för åtgärder som utgår från naturens egna förmåga att lösa olika samhällsproblem, så som översvämnings- och höga temperaturer, buller och spridning av föroreningar (Naturvårdsverket 2021). Begreppet ”naturbaserade lösningar” är relativt nytt och därför används ibland andra begrepp för att beskriva lösningarna, så som klimatanpassning, riskreducering och grön infrastruktur (Naturvårdsverket 2021). Esaraz-UI-Zannat et al. (2024) har i sin översiktsartikel identifierat 16 olika typer av naturbaserade lösningar mot urbana översvämnings- och höga temperaturer, så som klimatanpassning, riskreducering och grön infrastruktur (Naturvårdsverket 2021). Esaraz-UI-Zannat et al. (2024) har i sin översiktsartikel identifierat 16 olika typer av naturbaserade lösningar mot urbana översvämnings- och höga temperaturer, så som klimatanpassning, riskreducering och grön infrastruktur (Naturvårdsverket 2021). Esaraz-UI-Zannat et al. (2024) har i sin översiktsartikel identifierat 16 olika typer av naturbaserade lösningar mot urbana översvämnings- och höga temperaturer, så som klimatanpassning, riskreducering och grön infrastruktur (Naturvårdsverket 2021). Esaraz-UI-Zannat et al. (2024) har i sin översiktsartikel identifierat 16 olika typer av naturbaserade lösningar mot urbana översvämnings- och höga temperaturer, så som klimatanpassning, riskreducering och grön infrastruktur (Naturvårdsverket 2021).

Studier visar att naturbaserade översvämningsåtgärder kan vara effektiva och är viktiga verktyg för att skydda samhällen från översvämnings- och höga temperaturer kopplade till kraftigt regn (Liu et al. 2014; Haghighatafshar et al. 2018; Kourtis et al. 2020). Exempelvis visar en fallstudie i Malmö, där

några naturbaserade lösningar studerades, att lösningarna vid ett skyfall med en återkomsttid på över 100 år kan minska flödestoppen med 80 % och jämna ut avrinningen (Haghighatafshar et al. 2018). Det är dock svårt att bedöma effektiviteten hos de naturbaserade lösningarna eftersom den beror på regnets omfattning och lösningarnas rumsliga skala (Green et al. 2021).

I det här projektet kommer följande naturbaserade skyfallslösningar studeras: svackdiken, överdämningsytor och genomsläppliga beläggningar. Dessa åtgärdstyper valdes ut utifrån ett antal urvalskriterier, se avsnitt 4.3. Åtgärdernas funktion och rekommendationer för dimensionering av dessa beskrivs i avsnitten nedan.

2.2.1 Svackdiken

Ett svackdike är ett grunt och brett gräsbeklätt dike med svagt lutande slänter (Larm & Blecken 2019) (Figur 2). Den tydligaste skillnaden mellan ett svackdike och ett ”vanligt” dike är den flacka släntlutningen. Svackdikets flacka släntlutning skapar ett brett tvärsnitt vilket leder till lägre flödes hastigheter samt en större volym där vatten kan fördröjas vid högre flöden (Larm & Blecken 2019). Det finns en stor variation i släntlutningen hos svackdiken runt om i världen från 1:2 till 1:40 (Bhat et al. 2024). I Sverige rekommenderar Svenskt Vatten att svackdiken bör utformas med en släntlutningen på < 1:4-5 (Larm & Blecken 2019).

Utöver att bidra med flödesutjämning kan svackdiken också rena dagvattnet från föroreningar, så som näringsämnen och metaller (Yuan et al. 2019). Till exempel visa en studie av Saniei et al. (2021) visar att svackdiken kan minska den totala mängden partiklar (TSS) och kväve (TN) med över 40 %. Reningen sker i huvudsak genom sedimentering, filtrering och adsorption (Fardel et al. 2019).



Figur 2: Exempelbild på ett svackdike. Foto: WRS 2016.

2.2.2 Överdämningsytor

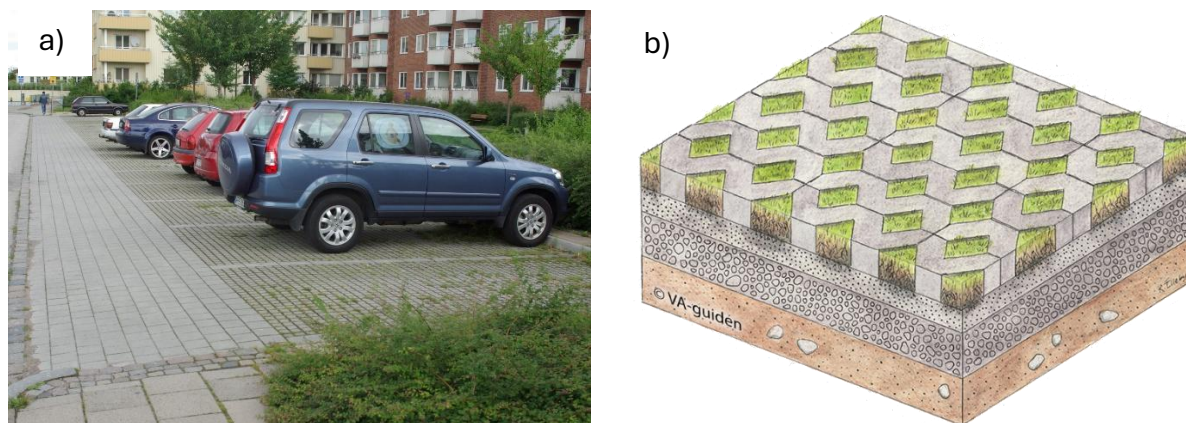
En överdämningsyta, också kallad torr damm, är en fördröjningsåtgärd som består av en nedsänkt grönyta som vid höga dagvattenflöden tillfälligt fylls med vatten (Larm & Blecken 2019) (Figur 3). Anläggningen bör ha ett djup på minst 0,5 m (Stockholm vatten och avfall 2025b). En studie av Bhusal et al. (2023) visar att det kan vara effektivare att ha flera mindre fördröjningsanläggningar utsprida i avrinningsområdet jämfört med en större anläggning centralt i området. När överdämningsytan fylls med vatten kan det renas genom sedimentation (Moazzem et al. 2024).



Figur 3: Exempelbild på en överdämningsyta. Foto: WRS 2021.

2.2.3 Genomsläpplig beläggning

Genomsläppliga beläggningar kan ersätta vanlig markbeläggning så som asfalt, på exempelvis parkeringsplatser (Figur 4a), och öka dräneringen av regnvatten på platsen. Beläggningen är uppbyggd av flera olika dränerbara lager (Zhou et al. 2024) (Figur 4b). Överst finns ett genomsläppligt ytmaterial så som genomsläpplig asfalt eller marksten i rutnät med mellanrum mellan stenarna där regnvattnet kan dränera till de undre lagren (Zhou et al. 2024). Vid användning av marksten är det möjligt att planera grönska i mellanrummen mellan stenarna (VA-guiden u.å.). Vissa typer av genomsläppliga beläggningar kan klara en mycket hög trafikbelastning (Stockholm vatten och avfall 2025a). Om beläggningen ska tåla högre trafikbelastningar än parkeringsytor kräver konstruktionen ett förstärkningslager (Stockholm vatten och avfall 2025a). Beläggningarna behöver underhållas genom rengöring för inte sättas igen och få en försämrad infiltrationsförmåga (Zhou et al. 2024).



Figur 4: a) En parkeringsplats med genomsläpplig beläggning. Foto: WRS 2007. b) En genomsläpplig beläggning i genomskärningen. Beläggningen på bilden har ett ytlager av marksten. Illustration: VA-guiden.

2.3 MERVÄRDEN

Ut över att motverka översvämningar kan skyfallsåtgärder bidra med andra värden. I det här projektet har mervärden avgränsats till att omfatta ekosystemtjänster. Det finns flera olika klassificeringar av ekosystemtjänster. Den här studien kommer att fokusera på den svenska klassificeringen (Naturvårdsverket 2017).

Naturbaserade skyfallsåtgärder har potential att bidra med många olika ekosystemtjänster. Prudencio och Null (2018) och García och Santamarta (2022) har identifierat tio ekosystemtjänster som naturbaserade dagvatten- och skyfallsåtgärder kan bidra med:

- vattenförsörjning för olika ändamål
- vattenreglering (inklusive översvämningsskydd)
- erosionsskydd
- förbättrad vattenkvalitet
- förbättrad luftkvalitet
- kolbindning
- temperatur och klimatreglering
- rekreation och hälsa
- utbildning och kunskap
- habitat och biodiversitet

Genomsläpplig beläggning, svackdiken och överdämningsytor uppfyller alla minst fyra av dessa ekosystemtjänster (Tabell 1). Genomsläpplig beläggning kan exempelvis bidra till ökad vattenförsörjning genom infiltration och grundvattenbildning och en förbättrad vattenkvalitet genom att den kan rena vattnet från partiklar och näringsämnen (Zhou et al. 2024). Svackdiken kan som tidigare nämnts (avsnitt 2.1.1) bidra till en förbättrad vattenkvalitet. Utöver detta kan svackdiken bidra med ett ekosystemtjänster så som erosionsskydd genom lägre vattenhastigheter (García & Santamarta 2022) och utbildning och kunskap genom att bidra till en ökad medvetenhet om dagvatten (Church 2015). Överdämningsytor kan precis som genomsläpplig beläggning och svackdiken bidra till en förbättrad vattenkvalitet. Åtgärdstypen kan också bidra med andra ekosystemtjänster så som rekreation och hälsa genom att ytan används till andra ändamål när det inte är fylld med vatten, till exempel en fotbollsplan eller lekplats (Larm & Blecken 2019).

Tabell 1: Översikt över vilka ekosystemtjänster som åtgärderna: genomsläpplig beläggning, svackdiken samt överdämningsytor, bidrar med. Tabellen bygger på studier av García och Santamarta (2022), Petsinaris et al. (2020), Griffiths et al. (2024) och Zhou et al. (2024). Om minst två av studierna visar på att åtgärden bidrar med ekosystemtjänsten markeras denna med ett kryss (x).

Ekosystemtjänst	Genomsläpplig beläggning	Svackdiken	Överdämningsytor
Vattenförsörjning	x		
Vattenreglering	x	x	x
Erosionsskydd		x	x
Förbättrad vattenkvalitet	x	x	x
Förbättrad luftkvalitet		x	
Kolbindning		x	x
Temperatur och klimatreglering	x		x
Rekreation och hälsa		x	x
Utbildning och kunskap		x	x
Habitat och biodiversitet		x	x

3 SKYFALLSMODELLERING

Skyfall är ovanliga händelser och det finns därför brist på tillräckliga data för att beskriva konsekvenserna av ett skyfall på en plats. Modellering är därför ett lämpligt angreppssätt för att utforska skyfallsproblematik. I detta avsnitt beskrivs teorin bakom skyfallsmodellering med hjälp av en hydraulisk 2D-modell i programvaran HEC-RAS och vilken typ av indata som skyfallsmodellen behöver.

3.1 HYDRAULISK 2D-MODELLERING I HEC-RAS

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) är en programvara av US Army Corps of Engineers som kan användas för göra hydrauliska beräkningar av stationärt flöde i en dimension samt varierat flöde i en och två dimensioner (Hydrologic Engineering Center u.å.). Programvaran togs fram år 1995 och sedan dess har det lanserats många uppdaterade versioner (Brunner 2020). I det här projektet används programmet (version 6.5) för att ta fram en hydraulisk två-dimensionell modell.

I modellen beror vattenytans höjd av dess topografiska placering samt vattendjupet (Brunner 2020). Vattenytans höjd vid koordinaten (x,y) vid tidpunkten t , $H(x, y, t)$, kan beskrivas enligt följande ekvation:

$$H(x, y, t) = z_b(x, y) + h(x, y, t) \quad (6)$$

där $z_b(x, y)$ är markhöjden på platsen och $h(x, y, t)$ är vattendjupet på platsen vid tidpunkten.

3.1.1 Saint-Venant-ekvationerna

En vätskas rörelse i tre dimensioner beskrivs fullständigt av Navier-Stokes ekvationer. I HEC-RAS används en förenkling av dessa ekvationer, "The shallow water-equations" (Brunner 2020), också kallade Saint Venant-ekvationerna (Hager et al. 2019). Ekvationerna gäller vid fritt ytflöde där vågens längd är mycket större än vattendjupet och de kan härledas fristående från Navier-Stokes ekvationer (Popescu 2014).

Saint-Venant-ekvationerna bygger på principerna om bevarande av massa och rörelsemängd för en vätska, samt tre antaganden (Liu et al. 2015). Antagandena är inkomprimerbart flöde samt uniform densitet och hydrostatiskt tryck (Brunner 2020).

Bevarande av massa beräknas i modellen på följande sätt (Brunner 2020):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (h\mathbf{V}) = q \quad (7)$$

där

- $\mathbf{V} = (\mathbf{u}, \mathbf{v})^T$, där u och v är hastigheten i x - respektive y -riktningen
- q är en flödesterm som beskriver förluster/tillförsel, genom exempelvis regn, infiltration och externt in-/ utflöde ur modellen
- gradientoperatorm: $\nabla = (\partial / \partial x, \partial / \partial y)^T$.

Ekvationen används för att säkerställa att flödena i modellen blir volymsriktiga, det vill säga att förändringen i volymen motsvarar inflödet minus utflödet.

Bevarande av rörelsemängd beräknas i modellen på följande sätt (Brunner 2020):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fu = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_b u \quad (8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fv = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_b v \quad (9)$$

där f är en Coriolis parameter. Koefficienten c_b beskriver bottenfriktionen och beräknas enligt följande ekvation:

$$c_b = \frac{n^2 g}{R^{4/3}} \sqrt{u^2 + v^2} \quad (10)$$

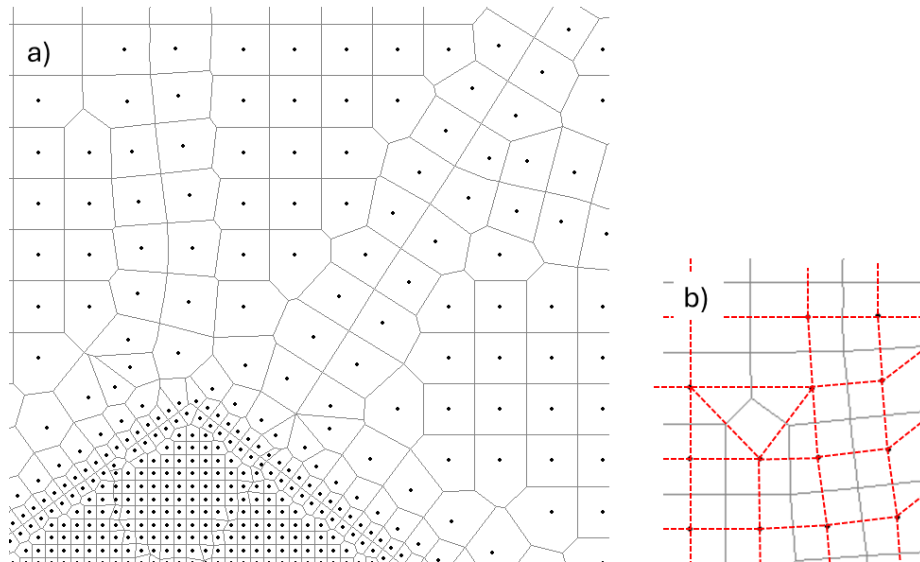
där R är den hydrauliska radien, n är Mannings skrovlighetskoefficient och g är tyngdaccelerationen. Det vänstra ledet av ekvation 8 och 9 beskriver vattnets acceleration och det högra ledet de interna och externa krafter som verkar på vattnet i modellen (Brunner 2020).

3.1.2 Beräkningsnät

Modellens beräkningsnät beskriver i vilka punkter som beräkningarna sker och är därmed avgörande för modellens detaljgrad (MSB 2023). Valet av beräkningsnätet är därför mycket viktigt. Beräkningsnätets utformning har en stor påverkan inte bara på modellens noggrannhet utan också dess stabilitet (Brunner 2020).

I HEC-RAS kan beräkningsnätet vara ostrukturerat, vilket innebär att det kan bestå av celler med blandande former och storlekar (Figur 5a) (Brunner u.å.). Cellerna utgörs av polygoner som får ha maximalt åtta sidor (Brunner 2020). Cellerna måste också vara konvexa, det vill säga att alla inre vinklar måste vara mindre än 180° . Då de hydrauliska ekvationerna innehåller derivator av andra ordningen behövs även ett beräkningsnät som överlappar det första. Det andra beräkningsnätet täcker samma område som det första och hörnen på cellerna i det andra nätet utgörs av mittpunkterna för cellerna i det första nätet (Figur 5b). I programmet beskrivs dessa mittpunkter som beräkningspunkter (Brunner 2020).

Markhöjden antas inte vara konstant i cellen (Brunner u.å.). För varje cellsida avläses höjden som ett tvärsnitt av höjdmodellens topografi. Vattenytan i cellen beskrivs däremot som ett genomsnitt över hela cellen. Områden med stora variationer i lutning och hastighet kräver därför mindre celler. I ett väl placerat beräkningsnät är därför cellkanterna placerade så att flödeshindrens högsta punkter beskrivs (Brunner u.å.). För att säkerställa att cellkanterna följer särskilt viktiga formationer kan så kallade *breaklines*, en typ av polylinjer, användas. Breaklines tvingar cellkanterna att följa de angivna linjerna (US Army Corps of Engineers, HEC u.å.).



Figur 5: a) Exempelbild över ett beräkningsnät i HEC-RAS med celler med varierande storlek och form. De svarta prickarna i cellernas mitt symboliserar beräkningspunkterna. b) Illustration av det andra beräkningsnätet. De grå linjerna visar det första nätet och de röda streckade linjerna det andra nätet.

3.1.3 Cellstorlek och tidssteg

För att få ett tillförlitligt resultat är det viktigt att välja lämpliga cellstorlekar och tidssteg (Brunner u.å.). Första steget är att välja ett beräkningsnät sådant att cellernas storlek gör det möjligt att modellera terrängen och det flödande vattnet på ett bra sätt, vilket beskrivs i föregående avsnitt (3.1.2). Efter att ett bra beräkningsnät är framtaget kan lämpliga tidssteg väljas. Vad som är ett lämpligt tidssteg beror på cellstorleken och flödes hastigheten genom cellerna (Brunner u.å.). Ett mått som används för att avgöra om valet av cellstorlek och tidssteg är lämpligt är Couranttalet, C , som beskriver förhållandet sträckan mellan översvämningsvågen transporteras under ett tidssteg och cellstorleken. I modellen beräknas Couranttalet på följande sätt:

$$C = \frac{V\Delta T}{\Delta X} \quad (11)$$

där V är översvämningsvågens (flood wave) hastighet, ΔT är tidssteget, ΔX är den genomsnittliga cellstorleken (Brunner u.å.). C bör vara mindre eller lika med 1,0, eftersom det innebär att vattnet inte hunnit transporteras genom flera celler under ett tidssteg. Om C är större än 1,0 innebär att vattnet hinner transporteras genom flera beräkningsceller under ett tidssteg och att alla celler därmed inte räknas, vilket kan leda till otillförlitliga resultat. C bör därför vara mindre eller lika med 1,0, vilket ger:

$$\Delta T \leq \frac{\Delta X}{V} \quad (12)$$

Ibland är det möjligt att få stabila och tillförlitliga resultat med Couranttal så höga som 3,0 (Brunner u.å.). $C \leq 1,0$ är alltså inte ett strikt krav.

3.2 INDATA

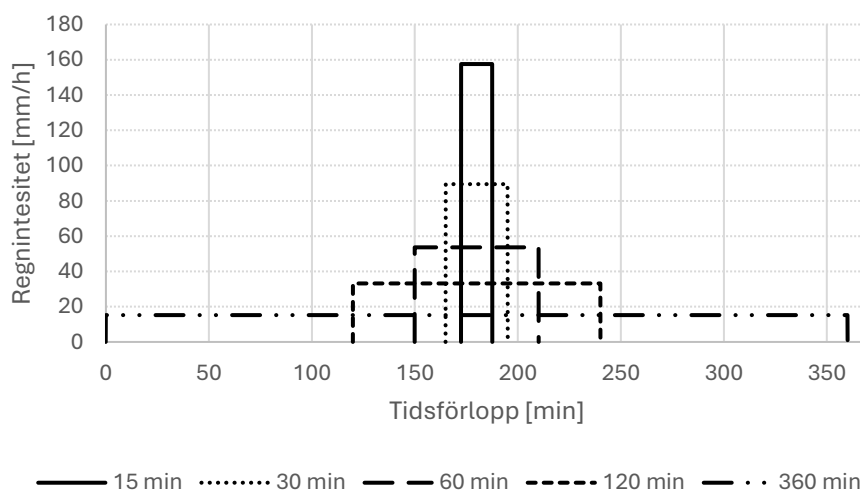
En tvådimensionell hydraulisk skyfallsmodell behöver följande underlag: en höjdmodell; ett typregn; en beskrivning av markens råhet; en beskrivning av infiltrationen samt en representation av dagvattennätet. Dessa beskrivs nedför.

3.2.1 Höjdmodell

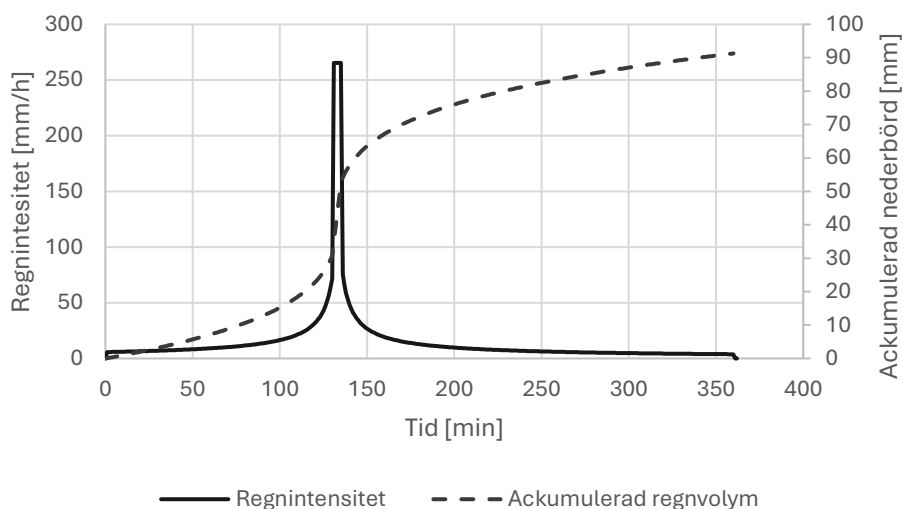
Höjdmodellen är det viktigaste underlaget (MSB 2023). För att resultatet från skyfallsmodelleringen ska bli användbart är det därför viktigt att höjdmodellen är tillräckligt detaljerad. I tätorter bör höjdmodellen ha en upplösning på 1–2 meter eller finare. Höjdmodellen behöver ofta korrigeras för att korrekt återge avrinningen, exempelvis genom att ta bort broar och tunnlar eller justera byggnader och vattenytor (MSB 2023).

3.2.2 Typregn

För att testa olika nederbördsscenarior i en skyfallsmodell kan typregn användas. Ett typregn beskriver hur regnvolymen varierar över tid, enligt en bestämd form, under en regnhändelse med en vald återkomsttid (MSB 2023). Två vanliga sorters typregn är blockregn och CDS-regn. Ett blockregn har en konstant regnintensiteten under hela nederbördsförloppet och beskriver medelintensiteten för ett regn med en given återkomsttid och varaktighet (Figur 6). Ett CDS-regn (Chicago Design Storm) är uppbyggt av många blockregn med varierande varaktigheter, upp till CDS-regnets varaktighet (MSB 2023). I Figur 7 visas ett exempel på sådant regn. Med hjälp att CDS-regn kan flera varaktigheter studeras under en och samma simulering. Regnet är i grunden symmetriskt med det mest intensiva centralt i regnet. Intensitetstoppen kan förskjutas med en skevhetsfaktor som beskriver när toppen ska inträffa. En skevhetsfaktor på 0,37 betyder exempelvis att toppen inträffar efter 37 % av regnets totala varaktighet.



Figur 6: Fem 100-årsregn med olika varaktigheter (15, 30, 60, 120 och 360 min) representerade som blockregn med en konstant regnintensitet under hela nederbördsförloppet. Regnmängden är beräknad med hjälp av SMHI:s formel (Olsson et al. 2017) och med en klimatfaktor på 1,4.



Figur 7: Ett 100-årsregn representerat som ett CDS-regn med en varaktighet på 6 timmar och skevhet på 0,37.

3.2.3 Råhet

Markytan bidrar med ett flödesmotstånd, råhet, som påverkar flödes hastigheten (MSB 2017). Mannings tal, M , (eller Mannings skrovlighetskoefficient, $n = 1/M$) är en lämplig parameter för att beskriva hur råheten påverkar ytavrinningen (Feldmann et al. 2023). Ett högt M innebär att marken bidrar med ett litet flödesmotstånd. MSB (2023) har tagit fram rekommendationer för vilka M -värden som bör användas vid skyfallskarteringar anpassade efter markanvändning. I dessa rekommendationer har exempelvis taktytor $M = 50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, vägar $M = 70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, skog $M = 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ och öppen mark med låg vegetation $M = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

3.2.4 Infiltration

Infiltration kan modelleras på olika sätt, exempelvis med någon av infiltrationsmetoderna *SCS-CN*, *Deficit and Constant* och *Green-Ampt* (Brunner u.å.). I den här modellen användes metoden *SCS-CN* (*Soil Conservation Service Curve Number*) som beskrivs nedan i detta avsnitt.

SCS-CN-metoden är utvecklad av USA:s jordbruksdepartement och bygger på resultat från omfattande fältstudier som utfördes på 1930- och 1940-talet (Mishra & Singh 2003). Metoden tar hänsyn till de flesta markegenskaper som påverkar avrinningen: jordart, markanvändning, ytförhållanden och inledande markfuktighet. Metoden bygger på vattenbalansen och två antaganden. Det första antagandet beskriver förhållandet mellan nederbörds mängden (P), avrinningen (Q) och infiltrationen (F):

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad (13)$$

Den initiala förlusten (I_a) är den regnmängd som behöver ackumuleras innan det bildas avrinning (Du et al. 2023). Det andra antagandet beskriver förhållandet mellan I_a och den potentiella maximala magasineringen (S):

$$I_a = \lambda S \quad (14)$$

där λ är en parameter som beror på regionala förhållanden (Mishra & Singh 2003). Initiala abstraktionen är den regnmängd som behöver ackumuleras innan det bildas avrinning (Du et al.

2023). S beräknas med hjälp av parametern CN (*Curve number*) och beskrivs enligt följande ekvation, omskrivet till SI-enheter (Mishra & Singh 2003):

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (15)$$

S och CN beror på jordarten, markanvändningen, de hydrologiska förutsättningarna, den inledande markfuktigheten och klimatet (Mishra & Singh 2003).

SCS-CN-metoden och tillhörande parametervärden är anpassade för att beräkna avrinningen, från ett avrinningsområde med en skala på ett antal hektar, vid ett givet nederbördstillfälle (Mishra & Singh 2003). Men i skyfallsmodellen beräknas avrinningen från respektive cell, det vill säga på en skala på kvadratmeter. Avrinningsprocesserna skiljer sig något åt mellan dessa skalor (SCALGO 2024). På den större skalan kommer större vattenvolymer lagras i fördjupningar i terrängen, vilken implicit inkluderas i värdet på CN . SCALGO (2024) har därför tagit fram CN - och λ -värden anpassade efter den mindre skala och svenska förhållanden. Värderna bygger på resultat av avrinningssimuleringar i modelleringsprogrammet SWMM.

3.2.5 Modellering av dagvattennätet

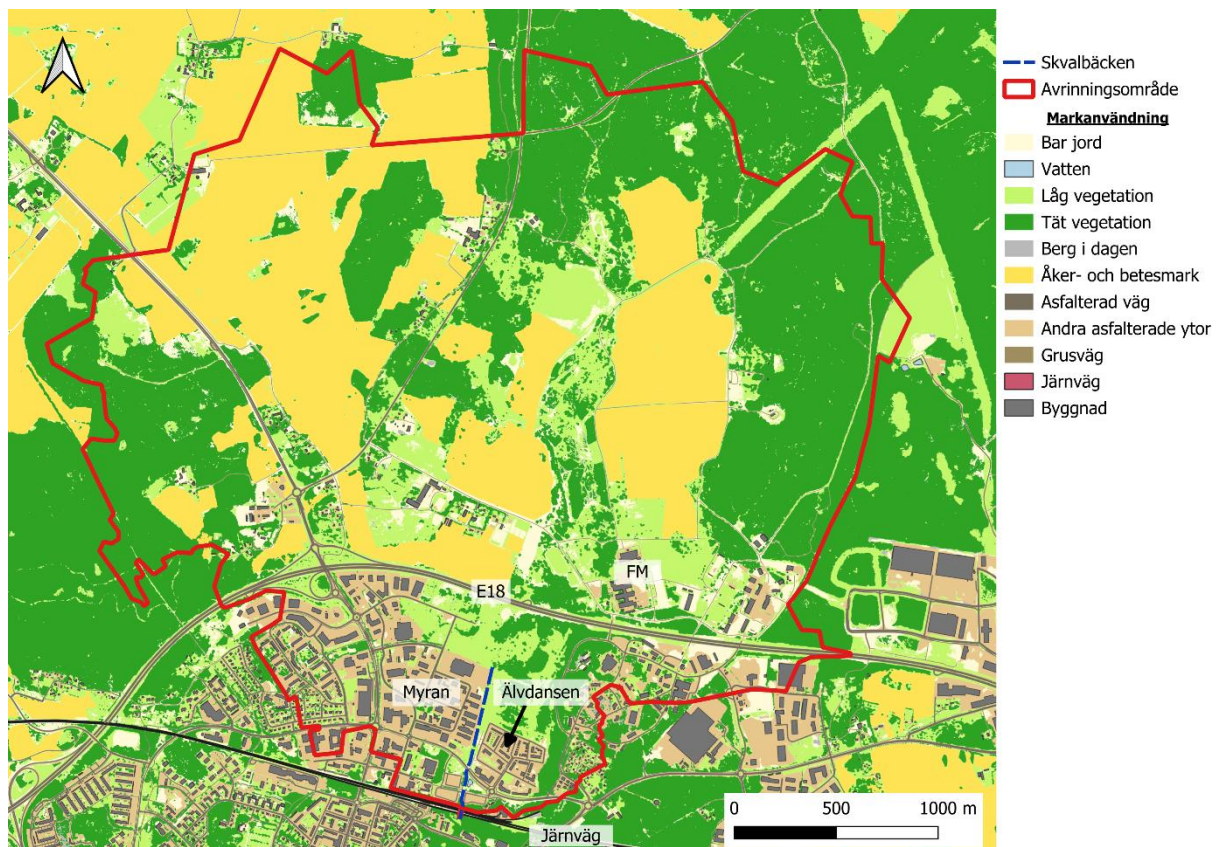
I skyfallsmodellen kan dagvattennätet representeras på olika sätt, antingen som ett schablonavdrag, direkt från regnet eller i form en approximerad infiltration, eller genom att ledningsnätet modelleras med en kopplad endimensionell hydraulisk modell (MSB 2017; 2023). Schablonavdrag är den enklare av de två metoderna. Metoden är enligt MSB (2023) tillräckligt noggrann för de flesta användningsområden, inklusive detaljerade skyfallsanalyser. Schablonavdrag är dock inte lämplig då ledningsnätet förväntas ha en stor påverkan på resultatet, till exempel vid mindre regn då avrinningen ligger nära ledningsnätets kapacitet. Vid sådana situationer behövs en kopplad modell som kan ge en noggrannare beskrivning av ledningsnätet (MSB 2017; 2023). Det är värt att notera att en kopplad modell kräver en stor arbetsinsats och mycket goda modelleringskunskaper (MSB 2017).

4 METOD

4.1 OMRÅDESBESKRIVNING

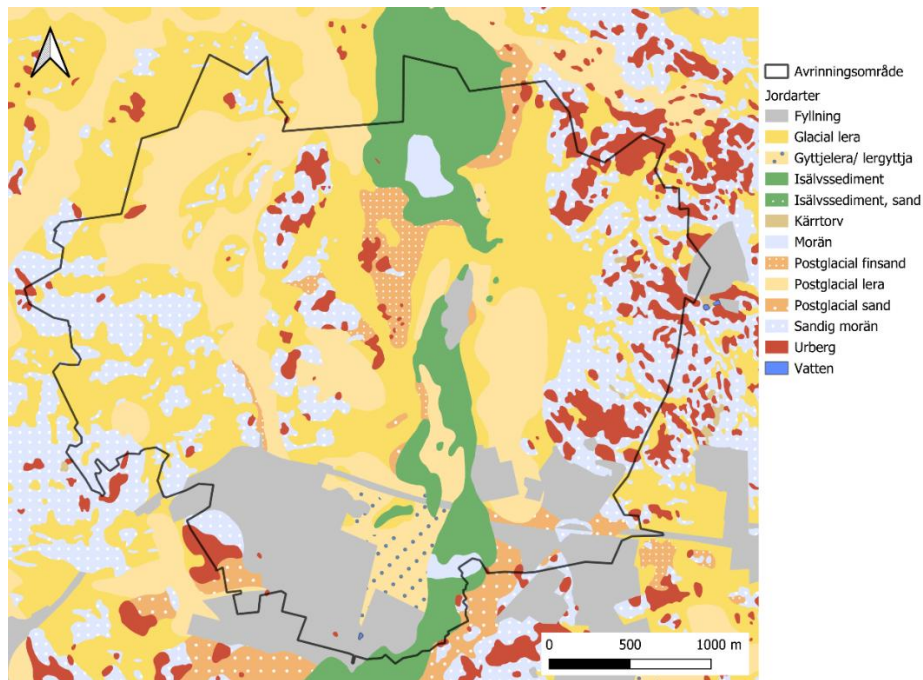
Bostadsområdet Älvdansen ligger i norra Enköping, Uppsala län. Älvdansen och naturområdet norr om bostadsområdet har vid flertalet tillfällen de senaste åren drabbats av översvämningar (Rehn & Berglund 2023). Den senaste stora översvämningen var i februari år 2024 (Wallin Nilsson 2024). Översvämningarna har ofta uppstått till följd av höga flöden i diket Skvalbäcken (Rehn & Berglund 2023). Skvalbäcken börjar i naturområdet norr om Älvdansen och går sedan i en rak linje söder ut förbi den västra kanten av Älvdansen, under järnvägen och sedan till diketets utlopp strax söder om järnvägen (Figur 8).

Skvalbäckens avrinningsområde är cirka 10,4 km² stort och består till 20 % av åker- och betesmark, 60 % av naturmark och 10 % av hårdgjorda ytor (Rehn & Berglund 2023; SCALGO Live u.å.) (Figur 8). Avrinningsområdet togs först fram med hjälp av verktyget *Depression-Free Flow* i SCALGO Live och kompletterades sedan med Myrans tekniska avrinningsområde som tagits fram vid en tidigare hydrologisk utredning (Rehn & Berglund 2023). Enköpings tätort och majoriteten av bebyggelsen ligger i avrinningsområdets södra delar, söder om E18. I detta område ligger Älvdansen, och till väster om Älvdansen Myrans handelsområde. Norr om E18 består avrinningsområdet till största delen av åker-, betes- och ängsmark samt skogsmark. I den sydöstra delen av detta område ligger också delar av Försvarmaktens område (Figur 8).



Figur 8: Markanvändning i Skvalbäckens avrinningsområde. På kartan är också Älvdansen, Handelsområdet Myran, E18, Försvarmaktens område norr om E18 (FM) samt järnvägen söder om Älvdansen utmarkerade. Kartan är skapad utifrån Land Cover, SCALGO Live (u.å.).

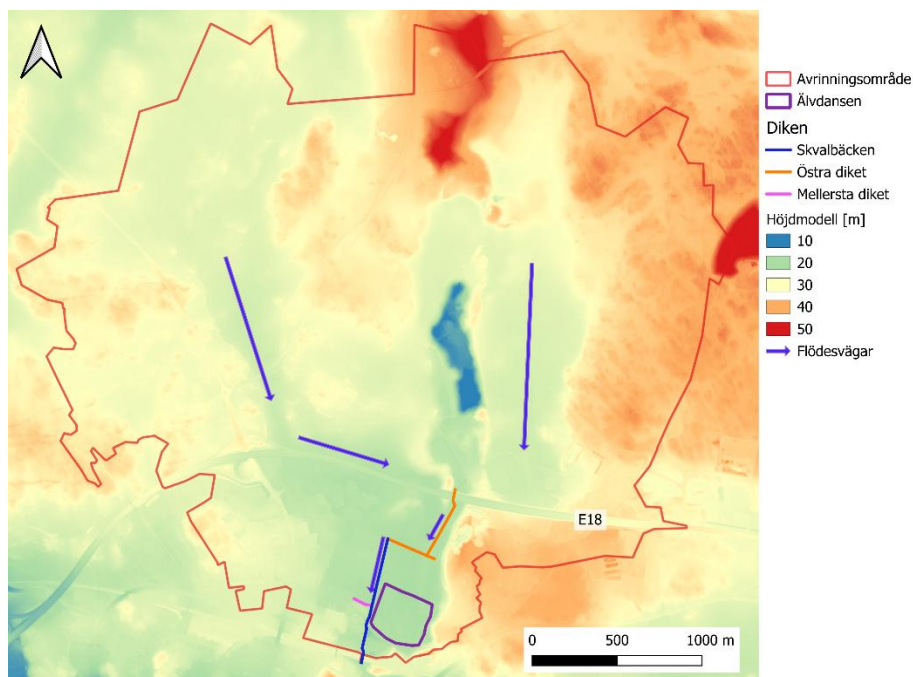
I avrinningsområdet finns flera olika typer av jordarter (Figur 9). Älvdansen och stora delar av övrig bebyggelse ligger på fyllning. I övrigt består området av mycket lera samt en del sand, sandig morän samt isälvssediment. I området finns det också fläckvist med urberg.



Figur 9: Jordartskarta över Skvalbäckens avrinningsområde skapad utifrån Jordarter 1:25 000 – 1:100 00 © Sveriges geologiska undersökning (2025).

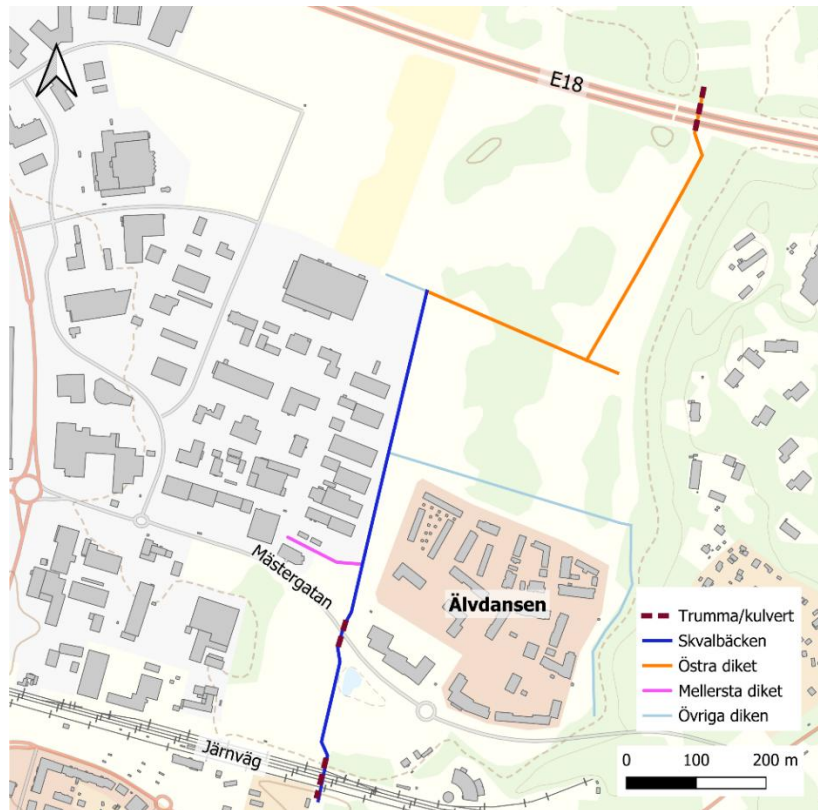
4.1.1 Avrinning runt Älvdansen

All avrinning som når Älvdansen kommer från Skvalbäckens avrinningsområde. I Figur 10 beskrivs de huvudsakliga flödesvägarna inom avrinningsområdet. Norr om E18 kan avrinningsområdet delas upp i en östra och en västra del, där flödesvägarna sedan rinner över E18 innan de möts precis uppströms om Skvalbäcken (Figur 10). Rinnvägarna studerades i HEC-RAS i samband med skapandet av skyfallsmodellen.



Figur 10: Höjdmodell och huvudsakliga flödesvägar i Skvalbäckens avrinningsområde. På kartan är också de diken runt Älvdansen som diskuteras senare i denna rapport utmarkerade. Kartan är skapad utifrån Markhöjdmodell Nedladdning, grid 1+ © Lantmäteriet (2022).

Vid Älvdansen går fyra diken som ansluter till huvudfåran Skvalbäcken (Figur 11 och Figur 12a). Längst upp förgrenar sig Skvalbäcken i en mindre gren västerut och en större österut (här kallat Östra diket). Östra diket går igenom naturområdet och kopplar samman Skvalbäcken med den nordöstra delen av avrinningsområdet via en vägtrumma under E18 (Figur 11 och Figur 12b). På mitten av Skvalbäcken ansluter ett kortare dike som leder dagvatten från Handelsområdet Myran till Skvalbäcken (här kallat Mellersta diket) (Figur 11 och Figur 12c). Det är endast dikena Skvalbäcken, Östra diket och Mellersta diket, som bedöms ha en tillräckligt stor flödeskapacitet för att påverka avrinningen i området vid ett skyfall.



Figur 11: Diken, trummor och kulvertar runt Älvdansen. Bakgrundskarta skapad utifrån Topografi 10 Nedladdning, vektor © Lantmäteriet.



Figur 12: De största diken runt Älvdansen, a) Skvalbäcken, b) Östra diket samt c) Mellersta diket. Foto: Elina Hanson

I området finns flertalet trummor och kulvertar. De största av är markerade i Figur 11. Trumman vid E18 är av plast och har en diameter på 1400 mm och bredvid huvudtrumman går också en mindre trumma på 700 mm (Figur 13a). Den andra större vägtrumman leder Skvalbäcken under

Mästergatan i Älvdansens sydvästra hörn. Denna vägtrumma är också av plast, och har en diameter på 1300 mm (Figur 13b). Skvalbäcken leds under järnvägen via en kulvert (Figur 13c) och strax söder om järnvägen har Skvalbäcken sitt utlopp i en mindre kulvert. Utöver dessa trummor och kulvertar finns också en mindre trumma nära Skvalbäckens förgrening samt en lite bro strax uppströms järnvägen.



Figur 13: a) Utloppet för de två vägtrumorna som går under E18. b) Utloppet för vägtrumman under Mästergatan. c) Inloppet till kulverten under järnvägen. Foto: Elina Hanson.

4.2 UPPSÄTTNING AV NULÄGESMODELL

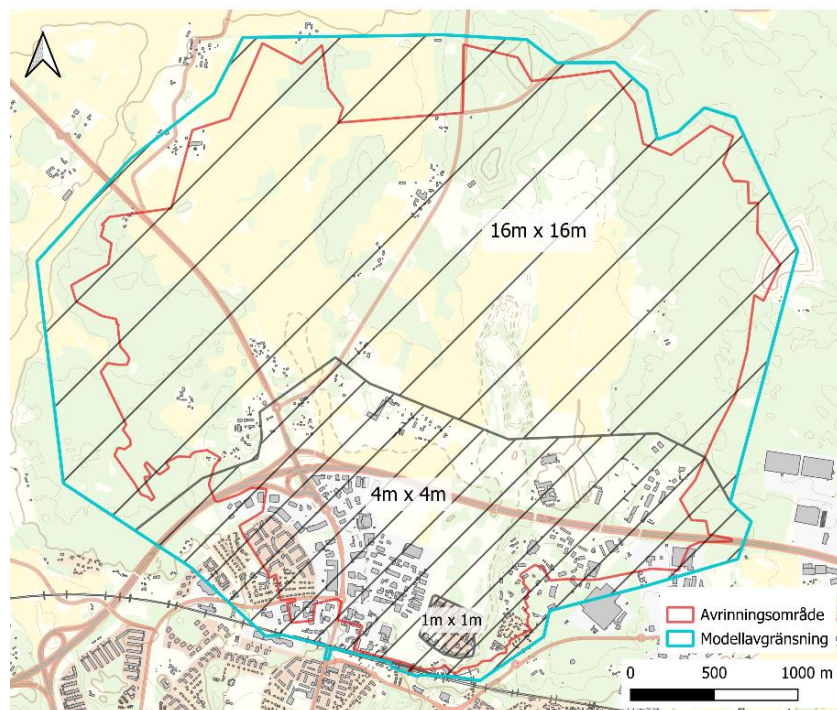
I skyfallsmodelleringens första del upprättades en hydraulisk 2D-modell över Älvdansen med omnejd som beskriver platsens befintliga förutsättningar, utan att några skyfallsåtgärder anlagts, med hjälp av HEC-RAS. Denna modell kallas fortsättningsvis för nulägesmodellen.

4.2.1 Modellavgränsning, beräkningsnät och tidssteg

Modellavgränsningen valdes så att hela Skvalbäckens avrinningsområde med marginal ingick, för att säkerställa att inga viktiga flödesvägar missas (Figur 14). Ett beräkningsnät med varierande upplösning valdes. I studieområdet Älvdansen valdes en mycket fin upplösning på maximalt 1 m x 1 m (Figur 14). En lite grövre upplösning på maximalt 4 m x 4 m valdes för resterande delar av den södra delen av avrinningsområdet. Området innehåller tät bebyggelse med många hårdgjorda ytor, vilket skapar en stor variation i markanvändning och topografi. Dessutom innehåller området flera viktiga flödesvägar nära Älvdansen, för vilka det är viktigt att flödeshinderna beskrivs på ett korrekt sätt. För att fånga dessa variationer i terrängen krävs en relativt fin upplösning, men noggrannheten behöver inte vara riktigt lika hög som i studieområdet. Den norra delen av avrinningsområdet ligger långt från Älvdansen och innehåller inga flödeshinder som bedömdes få en stor påverkan på avrinningen till Älvdansen. För att få en tillräckligt snabb modell valdes därför en grövre upplösning på maximalt 16 m x 16 m för detta område (Figur 14). Ett grövre beräkningsnät kan leda till att vattendjupen och -hastigheterna blir mindre tillförlitliga. Flödenas volymsriktighet försämras dock inte.

Beräkningsnätet anpassades också med hjälp av breaklines längs vägarna för att säkerställa att viktiga detaljer i höjdmodellen togs med i beräkningarna. Vägarnas utbredning hämtades från vektorlagret *Väglinjer* i *Topografi 10 Nedladdning* av Lantmäteriet (2025).

Efter att beräkningsnätet var framtaget ställdes tidsstegen in. För att justera tidssteg användes Courant-värdet (C). Om det fanns större områden, inte bara enstaka celler, med $C \geq 3$, förkortades tidssteget för den berörda tidsperioden. För områden där C låg strax under 3 kontrollerades först flödet på platsen innan tidssteg eventuellt förkortades. Om flödet oscillerade visade detta på att flödet i modellen var instabilt och då förkortades tidssteg under den aktuella tidsperioden. Om flödet däremot var stabilt förblev tidssteg oförändrat. Om C i stället var mycket lågt, det vill säga långt under 1, förlängdes tidssteget. Under simuleringen varierade tidsstegen mellan 2,5 s och 10 s (Bilaga, Tabell A 1).



Figur 14: Skyfallsmodellens modellavgränsning och beräkningsnät. I den norra delen av modellområdet är upplösningen 16 m x 16 m och i den södra delen är upplösningen 4 m x 4 m bortsett från Älvdansen där upplösningen är 1 m x 1 m. Bakgrundskarta skapad utifrån *Topografi 10 Nedladdning*, vektor © Lantmäteriet.

4.2.2 Höjdmodell

I skyfallsmodellen används Lantmäteriets höjdmodell *Markhöjdmodell Nedladdning, grid 1+* (Figur 10). Modellen består av ett raster med en upplösning på 1 m x 1 m och täcker hela Sverige (Lantmäteriet 2023). I modellen är alla byggnader borttagna. Höjddata har samlats in genom laserskanning och har en noggrannhet på 0,1 m i höjd och 0,3 m i plan. Koordinatsystemet som används är SWEREF 99 TM i plan och RH 2000 i höjd (Lantmäteriet 2023). Höjddata som används i denna studie samlades in mellan år 2021 och år 2023.

För att kunna beskriva avrinningen i området behövde några korrigeringar av höjdmodellen göras. Den första korrigeringen var att Skvalbäcken, Östra diket och Mellersta diket brändes in i höjdmodellen, vilket anpassades till data från tidigare inmätningar av dikena som WRS genomförde i februari 2023. Detta gjordes med hjälp av verktyget *Terrain modification* i HEC-RAS:s kartvisare RAS-mapper. Dikenas allmänna utformning i modellen beskrivs i Tabell 2.

Tabell 2: Skvalbäckens, Östra diket och Mellersta dikets utformning i modellen.

Dike	Längd [m]	Bottenbredd [m]	Genomsnittlig längslutning [%]	Släntlutning [H:V]
Skvalbäcken	754	2	0,1	1:1,5
Östra diket	617	2	0,03	1:1,5
Mellersta diket	117	1	0,2	1:1,5

Den andra korrigeringen var att inkludera byggnader i höjdmodellen. Detta gjordes genom att importera områdets byggnader från Lantmäteriets (2025) *Topografi 10 Nedladdning, vektor* och sedan höja upp dessa polygoner med 5 m från markytan, med hjälp av verktyget *Terrain modification*. En höjning på 5 m valdes för att säkerställa att byggnaderna alltid var högre än översvämningdjupet på platsen. Den exakta byggnadshöjden har ingen eller väldigt liten betydelse för modellen.

4.2.3 Råhet

I modellen beskrevs markens råhet med hjälp av Mannings skrovlighetskoefficient, n . Råhet är kopplad till markanvändningen (Tabell 3). I modellen beskrevs markanvändningen med hjälp av SCALGO Lives marktäckekarta, *Land Cover*, som är framtagen med hjälp av maskininlärning och bygger på följande data: Ortofoto Visning Årsvisa, Hydrografi och Byggnad Nedladdning från Lantmäteriet, Vägdata från Trafikverket, Railroad från OpenStreetMap samt Jordbruksblock från Jordbruksverket, från år 2025 och 2024 (SCALGO Live u.å.). Kartan har en upplösning på 0,25 m (Åkerblom 2023). För att upplösningen skulle matcha med höjdmodellens samt beräkningsnätets minsta upplösning togs polygoner på mindre än 1 m² bort. Värden på n valdes utifrån MSB (2023) rekommendationer. För ytor som saknar markanvändningsdata (NoData) sattes n till 0,035 s/m^{1/3} enligt HEC-RAS:s manual (Brunner u.å.). Modellområdets råhet visas i Bilaga, Figur B 1.

Tabell 3: Mannings skrovlighetskoefficient, n , i modellen för olika markanvändning.

Markanvändning	n [s/m ^{1/3}]
NoData	0,035
<u>Naturmark</u>	
Bar jord	0,05
Vatten	0,02
Låg vegetation	0,05
Tät vegetation	0,2
Fält	0,05
Berg i dagen	0,033
<u>Artificiell mark</u>	
Asfalterad väg	0,014
Andra asfalterade ytor	0,025
Grusväg	0,025
Järnväg	0,2
Byggnad	0,02

4.2.4 Infiltration

Infiltrationen beskrevs i modellen med hjälp av SCS-CN-metoden. Infiltrationsparametrarna CN och λ är kopplade till både markanvändningen och jordarten. Områdets jordarter beskrivs

med hjälp av Sveriges geologiska undersöknings (2025) data *Jordarter 1:25 000 – 1:100 00*. Lagret som används är *Jordart, grundlager* som beskriver jordarternas utbredning i eller nära markytan, det vill säga den jordart som bedöms finnas på ett djup på cirka 0,5 m under markytan och med en mäktighet på mer än 0,5 m (Sveriges geologiska undersökning (SGU) u.å.).

I modellen användes SCALGO:s (2024) parametervärden på CN och λ , vilka är kopplade till markanvändningsklasserna i SCALGO Lives marktäckekarta och de svenska jordarterna (Bilaga, Tabell C 1). Modellens infiltrationslager användes också för att göra ett schablonavdrag för dagvattennätet. Schablonavdraget görs med hjälp av modellens infiltrationslager. Alla asfalterade ytor och tak antogs vara kopplade till dagvattennätet och för dessa ytor modellerades ett schablonavdrag från regnet genom att följande parametervärden valdes: CN = 73 och $\lambda = 0,1$. Dessa värden kommer från SCALGO:s (2024) studie där flertalet befintliga dagvattensystem i Sverige och Danmark har modellerats. Studien visar att avrinningen från områden med dagvattennät kan beskrivas väl med hjälp av CN-metoden och att CN = 73 och $\lambda = 0,1$ beskriver ett genomsnittligt område bäst. CN-värdena som angivits för modellområdet visas i Bilaga, Figur C 1.

4.2.5 Externa och interna randvillkor

I modellen angavs ett externt randvillkor, vilket var Skvalbäckens utflöde ur modellen efter järnvägen. Utflödet begränsas av kulvertens maximala flödeskapacitet. Kulvertens första del har ett mycket kraftigt fall och kulverten nedströms denna bedömdes därför inte vara dämmande. Den maximala flödeskapacitet kunde därmed beräknas utifrån kulvertens första del. Flödet beräknades med hjälp av WRS:s strömningsmodell för trummor, vilket är ett Excel-baserat verktyg som bygger på energiekvationen för stationärt endimensionell strömning. Energiekvationen beskrivs enligt följande:

$$\left(\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z \right)_{inlopp} = \left(\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z \right)_{utlopp} + h_f \quad (16)$$

där

- v = hastigheten
- g = gravitationskonstanten
- ρ = densitet
- z = höjdnivån
- p = trycket
- h_f = friktionsförluster.

För att beräkna det maximala utflödet avgavs följande indata i strömningsmodellen:

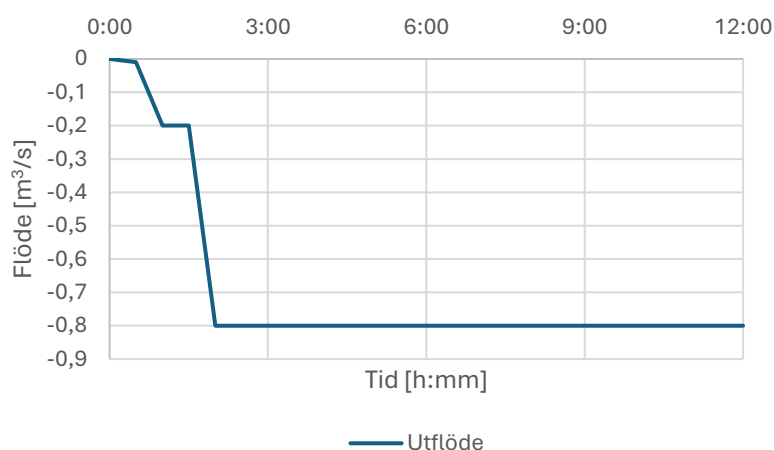
- Trummans längd = 200 m
- Trummans diameter = 1,00 m
- Trummans lutning = 0,02 m/m
- Trummans friktion, $m = 0,0017$
- Nedströms vattennivå = 1,0 m

Detta tillsammans med en uppströms vattennivå på 1,3 m gav ett utflöde på 0,8 m³/s. Därefter beskrevs randvillkoret i skyfallsmodellen med hjälp en hydrograf (Figur 15). Kulvertens maximala flödeskapacitet antogs uppnås från 2 timmar efter att simuleringen startade, det vill

säga precis innan den mest intensiva nederbördsperioden, och från och med den tidpunkten antogs utflödet vara konstant $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Flödet under de två första timmarna kalibrerades så att modellen blev stabil och att utflödet inte underskattades.

Ett initialvillkor i form av att alla ytor upp till $+19,2 \text{ m}$ över havet skulle vara vattenfyllda behövdes för att skapa en stabil modell. Initialvillkoret gjorde så att det fanns vatten i Skvalbäckens första del vid simuleringens start, vilket skapade förutsättningar för ett kontinuerligt utflöde under hela simuleringstiden.

Modellen inkluderar också två interna randvillkor: vägtrumorna vid E18 och Mästergatan. Parametervärdena som angavs i modellen för respektive kulvert beskrivs i Tabell 4.



Figur 15: Hydrografen som användes för att beskriva utflödet ur skyfallsmodellen.

Tabell 4: Utformningen av trummorna i modellen, avseende på trummans längd (l), diameter (d), vattengångens höjd över havet vid inloppet (h_{in}) och utloppet (h_{ut}).

Trumma	l [m]	d [m]	h_{in}	h_{ut}
E18	70	1,4	20,08	20,20
Mästergatan	35	1,3	19,24	19,06

Kulverten under järnvägen modellerades genom att diket lades in i höjdmodellen och inte som ett randvillkor, eftersom modellen blev instabil när järnvägskulverten beskrevs med hjälp av ett internt randvillkor.

4.2.6 Simulering av skyfall

Skyfallet simulerades som ett 100-årsregn i form av ett CDS-regn med en total varaktighet på 360 minuter (Figur 7). Regnets grundutseende byggde på Dahlströms formel (ekvation 4), med en skevhet på 0,37 och en klimatfaktor på 1,4. Skevheten valdes efter Svenskt vattens rekommendationer (Blomquist et al. 2016). Därefter anpassades regnet så att den totala regnmängden överensstämde med regnmängden för ett 100-årsregn med en varaktighet på 360 minuter i region sydöst med samma klimatfaktor enligt SMHI:s formel från 2017 (ekvation 5). Anpassningen gjordes genom att multiplicera varje tidssteg med en faktor på 0,783, vilken beräknades på följande sätt:

$$\frac{R_{SMHI(1,4)}}{R_{Dahlström(1,4)}} = \frac{91,3 \text{ mm}}{116,6 \text{ mm}} = 0,783$$

där $R_{SMHI(1,4)}$ och $R_{Dahlström(1,4)}$ är nederbörds mängden för ett 100-årsregn med varaktigheten 360 minuter och en klimatkfaktor på 1,4 beräknat med SMHI:s respektive Dahlströms formel. I modellen angavs regnet som ett globalt randvillkor av typen *Precipitation*. Detta gav samma nederbördsintensitet över hela modellområdet.

4.3 BEDÖMNING AV LÄMPLIGA ÅTGÄRDSPLATSER OCH ÅTGÄRDSTYPER

Lämpliga åtgärdsplatser utvärderades utifrån platsens närhet till viktiga flödesvägar och översvämningarna i Älvdansen. De lämpliga åtgärdsplatserna behövde ligga i nära anslutning till översvämningarna i Älvdansen eller vid någon av de viktiga flödesvägarna. En åtgärd kunde också endast placeras på en plats där anläggningen inte orsakade mer än en begränsad förändring av markanvändningen. Åtgärdsplatserna valdes så att de i första hand låg på oexploaterad mark. Valda åtgärdsplatser beskrivs i avsnitt 5.3.1.

Lämpliga åtgärdstyper utvärderades utifrån åtgärdsbehovet och åtgärdsplatserna. Åtgärdena behövde också vara naturbaserade och bedömts vara effektiv mot kraftig nederbörd i tidigare studier. Dessutom behövde åtgärdena vara relativt enkla att lägga till i nulägesmodellen i HEC-RAS och modelleras genom att endast justera höjdmodellen, råheten och/eller infiltrationen. Till exempel valdes skyfallsåtgärder som var direkt kopplade till dagvattennätet bort, eftersom dessa kräver att skyfallsmodellen innehåller en kopplad endimensionell hydraulisk modell av dagvattennätet, vilket saknades i nulägesmodellen. En vall runt Älvdansen utvärderades också, eftersom denna åtgärd redan delvis fanns på plats vid Älvdansen. Totalt valdes fyra åtgärdstyper ut.

4.4 MODELLERING AV ÅTGÄRDER

Åtgärdenas effekt på översvämningens utbredningen modellerades i HEC-RAS. Modelleringarna utgick från nulägesmodellen och sedan gjordes justeringar av skyfallsmodellen så att åtgärdena inkluderas. Justeringarna inkluderade ändringar av höjdmodellen, råhet och infiltration, vilka beskrivs översiktligt i Tabell 5. För att säkerställa att alla justeringar inkluderades vid skyfallssimuleringen och påverkar resultaten används också ett förfinat beräkningsnät på 1 m x 1 m runt åtgärdena. Åtgärdenas placering i modellen beskrivs i avsnitt 5.3.1.

Tabell 5: Översikt över hur åtgärdena modellerades i HEC-RAS. När ingen ändring av grundmodellen gjordes redovisas detta med ett sträck (-).

Åtgärdstyp	Höjdmodell	Råhet	Infiltration
Vall	Upphöjning	-	-
Genomsläpplig beläggning	-	$n = 0,025 \text{ s/m}^{1/3}$	CN = 60, $\lambda = 0,04$
Svackdiken	Nedsänkning	$n = 0,4 \text{ s/m}^{1/3}$	-
Överdämningsytor	Nedsänkning	$n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$	Samma som öppen mark

Vall

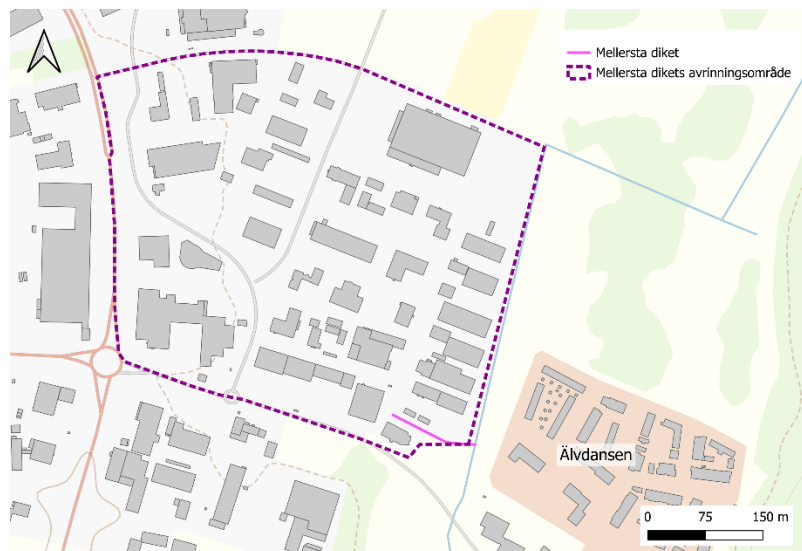
Den första åtgärden som modellerades var en 590 m lång, 3 m bred och ca 0,5 m hög vall runt Älvdansen. Vallens modellerades i HEC-RAS genom att justera höjdmodellen. Marknivån höjdes upp till en konstant höjd på +21,30 m.ö.h., vilket motsvarande en höjning av marknivån med 0,50 m vid vallens södra ände.

Svackdiken

Tre olika storlekar på svackdiken modellerades, en bredare variant som har en bottenbredd på 5 m och två smalare varianter med en bottenbredd på 3 m respektive 2 m. Alla svackdiken hade en släntlutning på 1:5. Svackdikena antogs ha en konstant längslutning anpassad efter platsen. Dikena hade alltid ett bottendjup på minst 0,5 m. I skyfallsmodellen beskrevs svackdikena genom att dessa lades till i höjdmodellen enligt de ovan nämnda dimensionerna samt att markens råhet på platsen ändrades genom att sätta $n = 0,4 \text{ s/m}^{1/3}$.

Genomsläpplig beläggning

Genomsläppliga beläggningar placerades på större parkeringsplatser inom avrinningsområdet till Mellersta diket (Figur 16). Parkeringsplatserna identifierades utifrån ortofoto. Åtgärden modellerades genom att infiltrationen på platsen ändrades. Följande parametervärden valdes: $CN = 60$ och $\lambda = 0,04$. Enligt Du et al. (2023) och Pachaly et al. (2023) är SCS-CN-metoden en lämplig metod för att beskriva effekten av en genomsläpplig beläggning och de valda parametervärdena motsvarar en beläggning med god funktion.



Figur 16: Uppskattat avrinningsområde till Mellersta diket. Bakgrundskarta skapad utifrån Topografi 10 Nedladdning, vektor © Lantmäteriet och Byggnad Nedladdning, vektor © Lantmäteriet.

Överdämningsytor

Två olika alternativ med överdämningsytor modellerades. Ytorna dimensionerades så att totalvolymen för ett alternativ kunde hålla 90% av översvämningens volymen i Älvdansen. Översvämningens volymen i Älvdansen beräknades med hjälp av programvaran QGIS genom att multiplicera den översvämmade arean i Älvdansen med det genomsnittliga vattendjupet i området. Överdämningsytorna placerades längs med befintliga diken och hade ett djup på minst 0,5 m. Överdämningsytans botten var också alltid högre än intilliggande dike för att säkerställa att ytan endast översvämmades vid högre flöden.

4.4.1 Utvärdering av åtgärdernas effekt

Effekten av respektive åtgärds alternativ utvärderas utifrån översvämningens area och vattendjup. Översvämningens area motsvarar den area inom Älvdansen (Figur 17) som översvämmades med ett vattendjup på över 0,1 m. Området Älvdansen avgränsades så att hela bostadsområdet ingår

samtidigt som alla föreslagna åtgärder ligger utanför Älvdansens gränser. Vattendjupet mäts i modellen på den punkt där vattendjupet är som störst, i scenariot utan åtgärder (Figur 17).

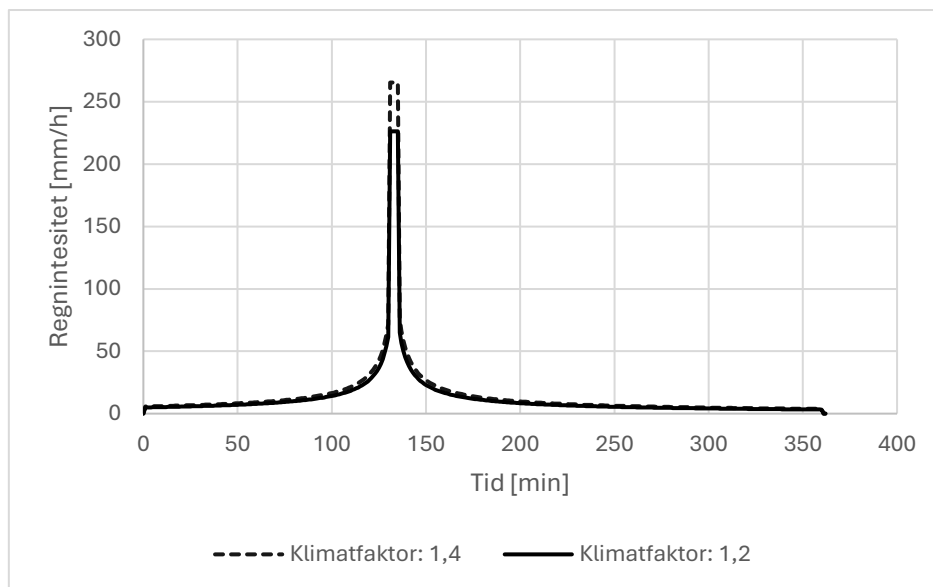


Figur 17: Avgränsning av området Älvdansen. Punkten där vattendjupet mäts i modellen är också markerad på kartan med en grön trekant. Bakgrundskarta skapad utifrån Topografi 10 Nedladdning, vektor © Lantmäteriet och Byggnad Nedladdning, vektor © Lantmäteriet.

4.5 KÄNSLIGHETSANALYS

Modellen innehöll många olika osäkerhetskällor, så som infiltrationen, råheten, regnet och utflödet. En känslighetsanalys genomfördes för att undersöka hur stora dessa osäkerheter var. Under känslighetsanalysen studerades hur stor påverkan olika val av parametervärden påverkar simuleringen. Det var inte möjligt att inom tidsramen för detta projekt att inkludera alla osäkerhetskällorna i känslighetsanalysen. Storleken på regnet och utflödet bedömdes vara de största källorna till osäkerhet i modellen som också var möjligt att modellera inom ramen av detta projekt och dessa valdes därför ut till känslighetsanalysen.

I huvudmodellen användes ett regn motsvarande ett 100-årsregn med en klimatfaktor på 1,4, motsvarande klimatscenarioet RCP 8,5. I detta motsvarar en stor klimatpåverkan och ett mycket kraftfullt skyfall. Därför användes under känslighetsanalysen ett mindre regn, med en klimatfaktor på 1,2 motsvarande klimatscenarioet RCP 4,5 (Figur 18).



Figur 18: CDS-regn vid två olika klimatscenerier: RCP 8,5 (klimatfaktor = 1,4) och RCP 4,5 (klimatfaktor = 1,2).

Utflödet i modellen utgår från utloppskulvertens uppskattade maximala flödeskapacitet. I huvudmodellen uppskattades den till $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$, utifrån en antagen vattennivå vid kulvertens inlopp. I känslighetsanalysen uppskattades en lägsta och högsta maximal flödeskapacitet med hjälp av uppskattade vattennivåer vid kulvertens inlopp och WRS:s strömningsmodell, på samma sätt som beskrivs i avsnitt 4.2.5. Den lägsta maximala flödeskapaciteten beräknades till $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, vilket motsvarar att vattennivån vid kulvertens inlopp är upp till kulvertens hjässa och en höjd på 1,1 m. Den högst maximala flödeskapaciteten uppskattades till $1 \text{ m}^3/\text{s}$, vilket motsvarar den högsta vattennivån som kan uppnås i Skvalbäcken utan att svämplanet vid Älvdansen bräddar enligt topografin och en höjd på 1,5 m.

Två simuleringar per ändring genomfördes, en utan åtgärder och en med den effektivaste åtgärden anlagd, totalt sex simuleringar (Tabell 6). Resultat från simuleringarna analyserades med hänsyn till översvämningens arean och jämfördes med resultatet från huvudmodellen.

Tabell 6: Känslighetsanalysens sex simuleringar, där klimatfaktorn (k) respektive det maximala utflödet (Q_u) ur modellen ändrades. Parametervärden som är ändrade jämfört med huvudmodellen är skrivna i fetstil.

Simulering	Åtgärd	Klimatfaktor	Utflöde [m^3/s]
Nuläge, $k=1,2$	-	1,2	0,8
Nuläge, $Q_u=0,5$	-	1,4	0,5
Nuläge, $Q_u=1,0$	-	1,4	1,0
Med åtgärd, $k=1,2$	S1, S2 och DP2_2	1,2	0,8
Med åtgärd, $Q_u=0,5$	S1, S2 och DP2_2	1,4	0,5
Med åtgärd, $Q_u=1,0$	S1, S2 och DP2_2	1,4	1,0

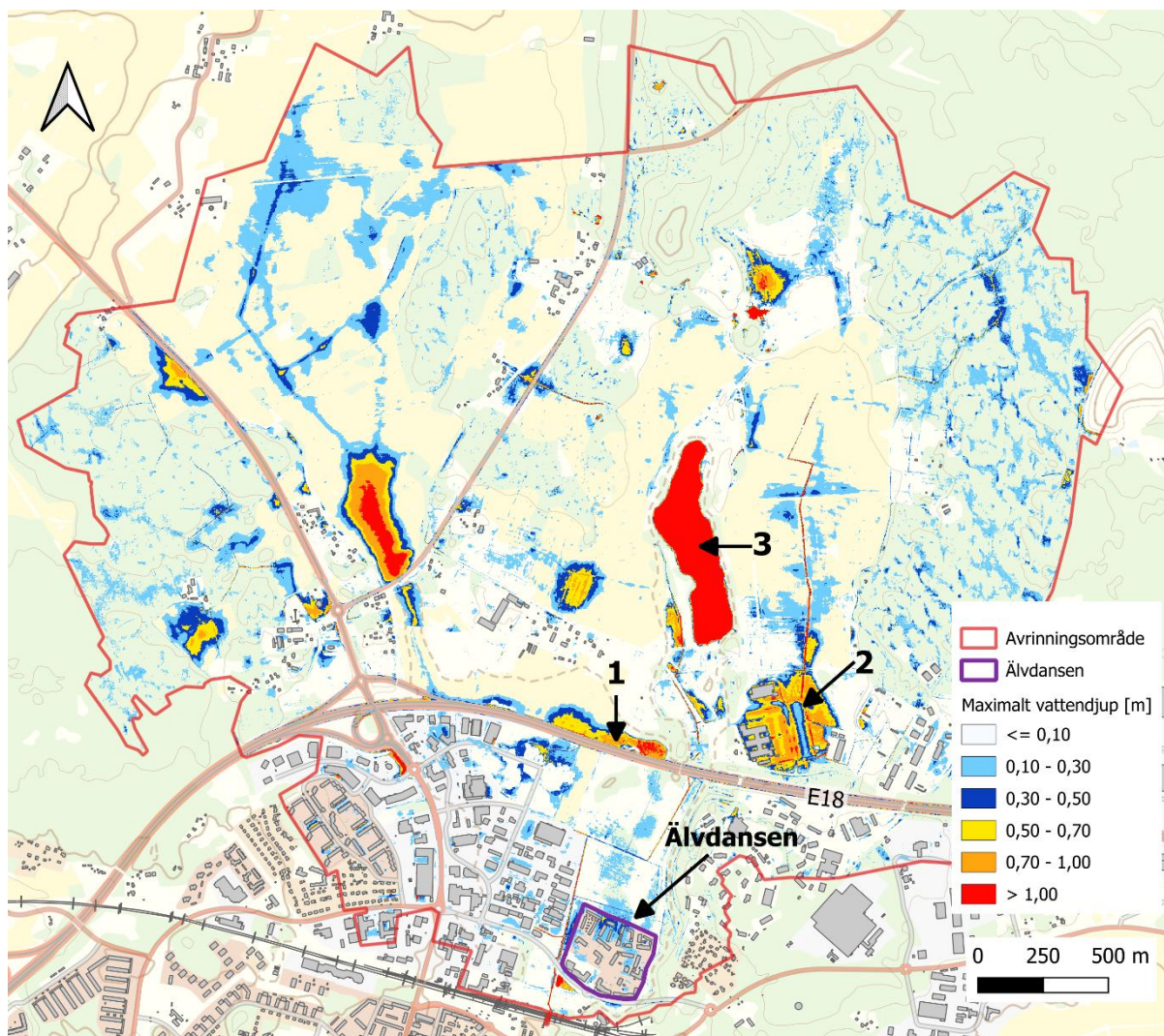
5 RESULTAT

I resultatets första del presenteras översvämningsutbredningen i Skvalbäckens avrinningsområde och Älvdansen vid det simulerade 100-årsregnet, utifrån hur området ser ut idag när inga åtgärder anlagts. Därefter presenteras flödena till Älvdansen. Översvämningsutbredningen och flödena användes sedan för att beskriva åtgärdsbehovet och lämpliga åtgärder. Därefter presenteras resultatet från när åtgärderna modellerades och vilken effekt dessa hade på översvämningsutbredningen i Älvdansen. Sist presenteras känslighetsanalysen.

5.1 ÖVERSVÄMNINGSUTBREDNING – NULÄGESMODELLEN

Simuleringen av 100-årsregnet visade att översvämningsutbredningar bildas på flera olika platser i Skvalbäckens avrinningsområde, bland annat i Älvdansen (Figur 19). *Maximalt vattendjup* i figurerna beskriver inte en specifik tidpunkt, utan visar det maximala vattendjupet per cell som uppnås någon gång under simuleringen.

Fokus i denna studie ligger på Älvdansen och översvämningsutbredningen där, men för att förstå översvämnings dynamik studerades även avrinningen och översvämningsarna uppströms Älvdansen. Som beskrivs i avsnitt 4.1.1 finns det två viktiga rinnvägar genom Skvalbäckens avrinningsområde norr om E18, en i väster och en i öster (Figur 10). Simuleringen visade två viktiga vattensamlingar som påverkade rinnvägarna i samband med 100-årsregnet bildas, en precis norr om E18 (område 1 i Figur 19) och en på Försvarsmaktens område precis norr om E18 (område 2 i Figur 19). Vattnet som samlades precis norr om E18 kommer från avrinningsområdets nordvästra delar (område 1). E18 ligger högre än den omkringliggande marken och vattennivån i vattensamlingen ligger som högst några centimeter under E18:s lägsta punkt. E18 utgjorde därmed ett hinder för vatten från avrinningsområdets nordvästra del att nå Älvdansen i samband med skyfallet. På Försvarsmaktens område norr om E18 (område 2) samlades vatten från avrinningsområdet nordöstra delar. Området omgärdas av höjder som hindrade de största vattenvolymer från att rinna nedströms. När vattennivån i området blev tillräckligt hög började vatten flöda över höjdryggens lägsta punkt på områdets västra sida och vidare till trumman under E18.



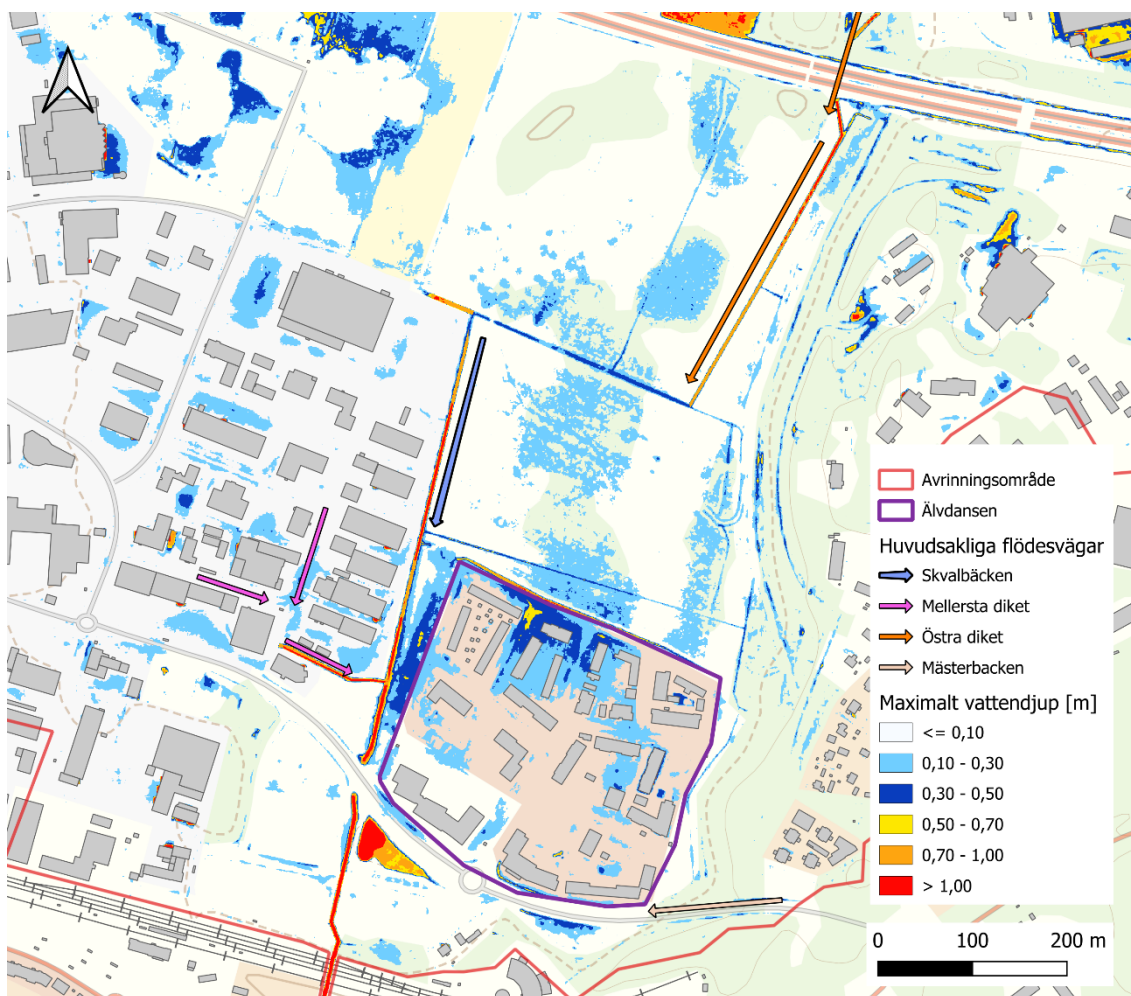
Figur 19: Maximalt vattendjup till följd av det simulerade 100-årsregnet. På kartan är Älvdansen utmarkerad samt tre större vattensamlingar uppströms Älvdansen. Extra viktiga vattensamlingar är numrerade 1–3, där 1 markerar en vattensamling precis norr om E18, 2 är en vattensamling på Försvarmaktens område och 3 är vid ett gammalt grustag. Bakgrundskarta skapad utifrån Topografi 10 Nedladdning, vektor © Lantmäteriet (2025).

I Figur 19 är ytterligare en vattensamling markerad, vattensamling nummer 3. Vattennivån på denna plats är felaktig, till följd av initialvillkoret att alla ytor upp till och med +19,2 m över havet ska vara vattenfyllda (se avsnitt 4.2.5). På platsen finns ett gammalt grustag och marknivån på platsen är drygt +10 m, vilket är flera meter lägre än resten avrinningsområdet (Figur 10). Gropen var därför till följd av initialvillkoret delvis fylld med vatten redan från simuleringens start. Detta påverkade dock inte resultatet på någon annan plats i modellen eftersom gropen aldrig fylldes helt med vatten eller bidrog med flöde till Skvalbäcken eller Älvdansen.

5.1.1 Översvämningsutbredning i Älvdansen

Simuleringen visade att det bildades omfattande översvämningsområden i Älvdansen till följd av 100-årsregnet (Figur 20). 19 000 m² av området översvämmades med ett vattendjup på mer än 0,1 m, vilket motsvarar 22 % av områdets totala area. I området uppnåddes ett maximalt vattendjup på 63 cm, vilket inträffade efter 6,5 timmar, det vill säga 30 minuter efter att det slutat regna. Simuleringen visade också att Skvalbäcken översvämmades i samband med skyfallet, vilket

bland annat resulterade i en stor vattensamling på gräsytan längs Älvdansens västra sida (Figur 20).



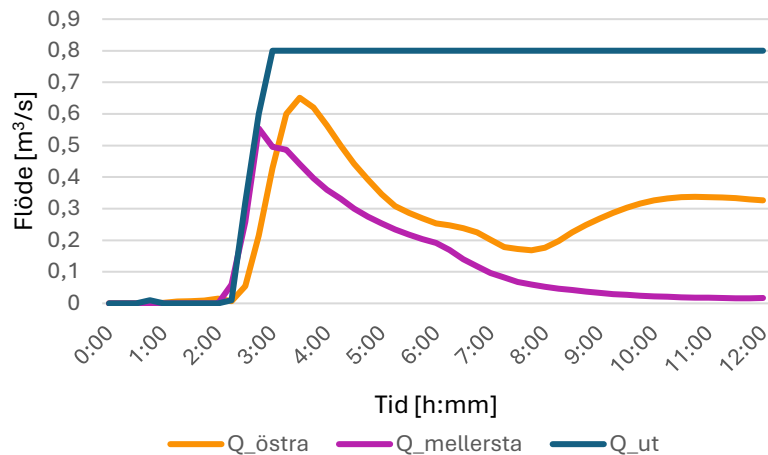
Figur 20: Maximalt vattendjup till följd av det simulerade 100-årsregnet i Älvdansen och dess närhet. Kartan visar också de huvudsakliga flödesvägarna som bidrar till översvämningen i Älvdansen. Bakgrundskarta skapad utifrån Topografi 10 Nedladdning, vektor © Lantmäteriet (2025).

5.2 FLÖDESVÄGAR OCH FLÖDESSTORLEKAR

Utöver Skvalbäcken identifierades tre huvudsakliga flödesvägar till Älvdansen: Östra diket, Mellersta diket samt backen längs Mästergatan sydöst om Älvdansen, här kallad Mästerbacken (Figur 20). Flödet nedför Mästerbacken var som störst $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ under den mest intensiva nederbördsperioden. Östra diket och Mellersta diket hade ett maximalt flöde på $0,55$ respektive $0,65 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figur 20) och bidrog båda till ökade flöden i Skvalbäcken.

Flödena var störst i Mellersta diket och Östra diket efter 2,5 timmar respektive 3,5 timmar och avtog därefter långsamt (Figur 21). I samband med flödestopparna var det sammanlagda flödet i de två dikena större än Skvalbäckens utflöde. I Östra diket ökade flödet igen efter 8 timmar, till som högst $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figur 21). Vid denna tidpunkt hade tröskelnivån vid Försvarsmakten överskridits och vatten började flöda över höjdryggen ner mot Östra diket. Detta skedde dock 1,5 timmar efter att den maximala vattennivån i Älvdansen hade uppnåtts, vilket betyder att

detta flöde inte spelar en avgörande roll för den maximala översvämningsutbredningen i Älvdansen.



Figur 21: Flöden i Östra diket ($Q_{\text{östra}}$) och Mellersta diket ($Q_{\text{mellersta}}$) när ingen åtgärd anlagts jämfört med Skvalbäckens utflöde (Q_{ut}).

5.3 ÅTGÄRDSBEHOV

Översvämningarna i Älvdansen bedömdes kunna minskas på flera olika sätt. Då den huvudsakliga orsaken till översvämning var hög vattennivå i Skvalbäcken, bedömdes åtgärder som leder till ett minskat vattendjup i diket som mest prioriterade. Två metoder som skulle kunna leda till ett minskat vattendjup i Skvalbäcken undersökte:

1. Fördröjningsåtgärder uppströms Älvdansen, längs Skvalbäcken och/eller Östra diket.
2. Minskat vattenflöde i Mellersta diket, genom åtgärder i Mellersta dikets avrinningsområde (Figur 16).

Andra åtgärder som bedömdes kunna vara aktuella var:

3. Åtgärder i direkt anslutning till översvämningarna i Älvdansen.
4. Åtgärder som bidrog till avledning av flödet från Mästerbacken, bort från Älvdansen.

Fyra åtgärdstyper som bedömdes uppfylla ett eller flera av kriterierna (punkt 1 till 4) samt åtgärdskraven som beskrivs i avsnitt 4.3 var:

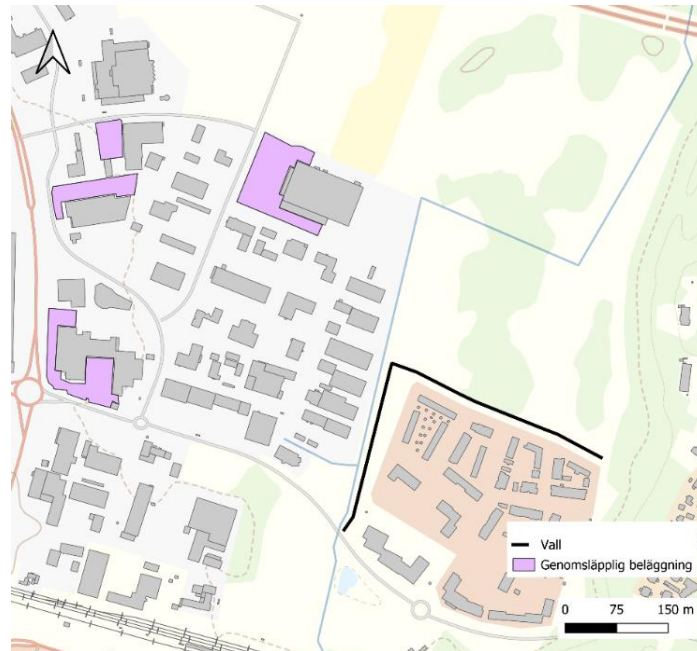
- En vall runt Älvdansen
- Genomsläpplig beläggning
- Svackdiken
- Överdämningsytor.

5.3.1 Utformning och dimensionering av åtgärder

Innan de fyra utvalda åtgärdstyperna kunde modelleras behövdes först en lämplig utformning och dimensionering av åtgärden tas fram, vilken beskrivs i detta avsnitt.

En vall runt Älvdansen är en av Enköpings kommun tidigare föreslagna översvämningsåtgärd. Vallen placerades i modellen så att den började i höjd med Mästergatan i det sydvästra hörnet av Älvdansen och gick sedan längs med Skvalbäcken upp till Älvdansens nordöstra hörn där den svänger höger och följer bostadsområdets yttre gräns (Figur 22).

Genomsläpplig beläggning placerades i modellen på de fyra största parkeringarna i Mellersta dikets avrinningsområde (Figur 22), vilket gav en total area på 19 000 m². Detta motsvarar 8% av Mellersta dikets avrinningsområdes totala area.



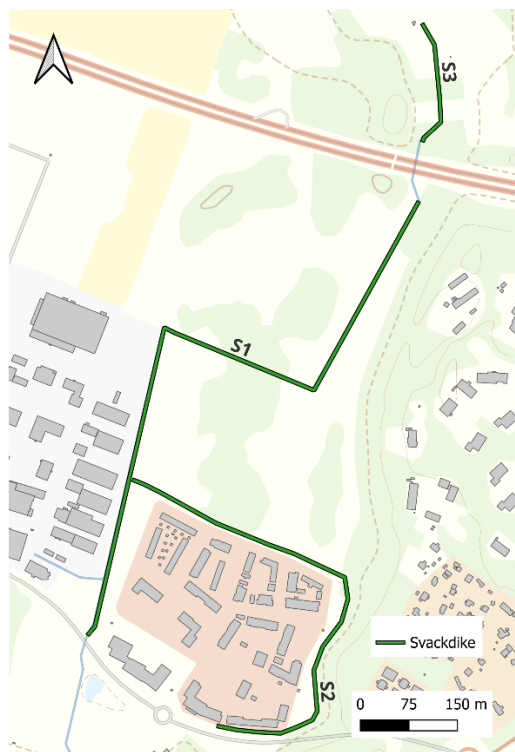
Figur 22: Placering av åtgärderna vall och genomsläpplig beläggning. Bakgrundskarta skapad utifrån Topografi 10 Nedladdning, vektor © Lantmäteriet (2025).

Tre olika svackdiken modellerades, kallade S1, S2 och S3 (Figur 23 och Tabell 7). S1 var ett stort svackdike som gick längs med Skvalbäcken norr om Mästergatan samt längs Östra diket söder om E18. S2 var ett mindre svackdike som gick längs med utkanten av Älvdansen. S3 var ett kortare svackdike som gick längs med Östra diket norr om E18. Svackdikenas dimensioner beskrivs mer ingående i Tabell 7.

Först simulerades ett åtgärdsalternativ med enbart det stora svackdiket S1. Då simuleringen visade att diket kunde minska översvämningen i Älvdansen men inte förhindra översvämningen helt simulerades ett nytt åtgärdsalternativ, S1+S2. Därefter simulerades ytterligare åtgärdsalternativ med svackdiken S1+S2+S3.

Tabell 7: Dimensionering av de tre svackdikena: S1-S3.

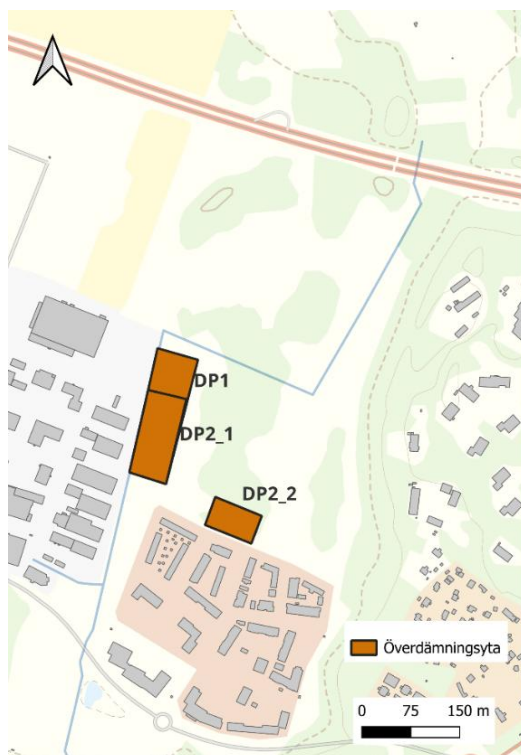
Svackdike	Längd [m]	Bottenbredd [m]	Släntlutning [H:V]	Djup [m]	Volym [m ³]
S1	1100	5	1:5	1	11 000
S2	750	2	1:5	0,5	2600
S3	200	3	1:5	1,6	2600



Figur 23: Placering av svackdikena S1, S2 och S3. Bakgrundskarta skapad utifrån Topografi 10 Nedladdning, vektor © Lantmäteriet (2025).

Två olika åtgärdsalternativ med överdämningsytor simulerades, kallade DP1 och DP2. Alternativet DP1 innehöll en stor överdämningsyta kallad DP1 (Figur 24). Det andra åtgärdsalternativet DP2 innehöll två mindre överdämningsytor DP2_1 och DP2_2. DP2_1 var en mindre variant av DP1 och utgjorde ca 70 % av DP1 (Figur 24). DP2_2 placerades på naturmarken precis norr om Älvdansen, i anslutning till Älvdansens mest översvämningsdrabbade område (Figur 24). Den totala volymen som kunde fördröjas av överdämningsytorna i DP1 respektive DP2 är 6100 m³ (Tabell 8), vilket motsvarar ungefär 90 % av den totala översvämningsvolymen i Älvdansen som beräknades till 7000 m³ utifrån nulägesmodelleringen (utan åtgärd).

Det sista åtgärdsalternativet som modellerades var en kombinerad åtgärd, där svackdikena S1 och S2 kombinerades med överdämningsytan DP2_2. Åtgärden kallas S1+S2+DP2_2.



Figur 24: Placering av överdämningsytorna DP1, DP2_1 och DP2_2. Yta DP1 består av hela yta DP2_2 samt den synliga ytan precis norr om DP2_2. Bakgrundskarta skapad utifrån Topografi 10 Nedladdning, vektor © Lantmäteriet (2025).

Tabell 8: Dimensionering av överdämningsytorna.

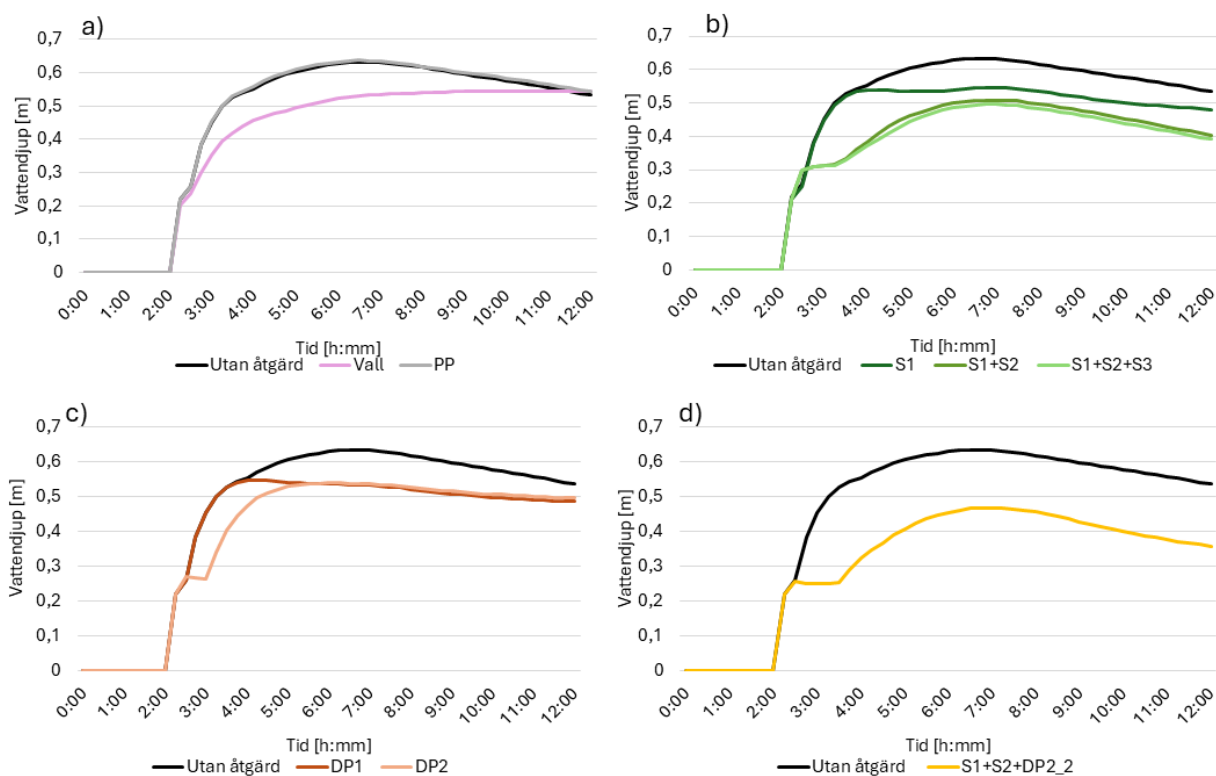
Överdämningsyta	Area [m ²]	Djup [m]	Volym [m ³]
DP1	11 000	0,55	6100
DP2_1	7900	0,55	4300
DP2_2	3500	0,5	1800

5.4 ÖVERSVÄMNINGSUTBREDNING – MED ÅTGÄRDER

Simuleringar av 100-årsregnet med åtgärder visade att alla åtgärder förutom den genomsläppliga beläggningen (PP) ledde till en minskad översvämningsutbredning sett till både översvämningsarea (Tabell 9) och vattendjup (Figur 25a,b,c,d). Vallen minskade översvämningsarean med 20 % och vattendjupet med 9 cm, vilket motsvarar en minskning på 14 %. Svackdikesåtgärder, S1, S1+S2 och S1+S2+S3, minskade översvämningsarean med 23 %, 40 % respektive 41 % och det maximala vattendjupet med 8 cm (13 %), 12 cm (19 %) respektive 13 cm (21 %). Åtgärdsalternativen med överdämningsytor, DP1 och DP2, minskade båda översvämningsarean med 25 % och det maximala vattendjupet minskades med 8 cm (13 %) respektive 9 cm (14 %). Den kombinerade åtgärden var effektivast. Den minskade översvämningsarean med 48 % och det maximala vattendjupet med 16 cm (25 %). I Bilaga D beskrivs det maximala vattendjupet i hela Älvdansen när denna åtgärd anlagts (Figur D 1). Genomsläpplig beläggning var den minst effektiva åtgärden. Modelleringen visade att åtgärden inte kunde minska översvämningsutbredningen, varken sett till översvämningsarea eller vattendjup.

Tabell 9: Åtgärdernas effekt på översvämningsarean, d.v.s. den area inom Älvdansen som översvämmades med ett vattendjup på över 0,1 m. Minskningen är angiven i procent av översvämningsarean jämfört med scenariot utan åtgärd (nuläge).

Åtgärd	Översvämningsarea [m ²]	Minskning
Utan åtgärd	18 900	-
Vall	15 100	20 %
PP	18 900	0 %
S1	14 500	23 %
S1+S2	11 300	40 %
S1+S2+S3	11 200	41 %
DP1	14 300	25 %
DP2	14 200	25 %
S1+S2+DP2_2	9900	48 %



Figur 25: Åtgärdernas effekt på vattendjupet jämfört med utan åtgärd, a) effekten av åtgärdsalternativen Vall och PP, b) effekten av åtgärdsalternativen med svackdiken, S1, S1+S2 samt S1+S2+S3, c) effekten av åtgärdsalternativen med överdämningsytor, DP1 och DP2, samt c) effekten av den kombinerade åtgärden, S1+S2+DP2_2.

5.5 KÄNSLIGHETSANALYS

Under känslighetsanalysen analyserades hur stor effekt storleken på regnet och utflödet hade på resultatet. Analysen gjordes för både scenariot utan åtgärder (nuläget) och scenariot med den kombinerade åtgärden, S1+S2+DP2_2. Känslighetsanalysen visade att när en klimatfaktor på 1,2 användes i stället för en på 1,4, det vill säga ett mindre regn, blev översvämningsarean 38 % mindre vid scenariot utan åtgärd och 45 % mindre för scenariot med den kombinerade åtgärden (Tabell 10). När utflödet minskades från 0,8 m³/s till 0,5 m³/s ökade översvämningsarean med 43 % respektive 39 % för scenariot utan åtgärd respektive med den kombinerade åtgärden

(Tabell 10). När utflödet i stället ökades till $1 \text{ m}^3/\text{s}$ från $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$ minskade översvämningsarean med 4 % för både med och utan åtgärd (Tabell 10). I Bilaga D beskrivs det maximala vattendjupet i hela Älvdansen när den kombinerade åtgärden är anlagd, då $k = 1,2$ (Figur D 2a) samt $Q_u = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figur D 2b). Vid $k=1,2$, $Q_u = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ respektive $Q_u = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ minskade den kombinerade åtgärden översvämningsarean med 50 % jämfört med nuläget (utan åtgärd) (Tabell 11), vilket låg i linje med åtgärdens effekt i huvudmodellen.

Tabell 10: Översvämningsarean i Älvdansen vid känslighetsanalysens sex delanalyser samt jämförelse med huvudmodellen. I huvudmodellen är klimatfaktor (k) satt till 1,4 och det maximala utflödet (Q_u) satt till $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Med åtgärd avser scenariot med den kombinerade åtgärden, S1+ S2+DP2_2.

Analys	Översvämningsarean [m ²]	Skillnad jämfört med huvudmodell
Nuläge, $k=1,2$	11 700	-38 %
Nuläge, $Q_u=1,0$	18 200	-3,7 %
Nuläge, $Q_u=0,5$	27 000	43 %
Med åtgärd, $k=1,2$	5500	-45 %
Med åtgärd, $Q_u=1,0$	9500	-3,5 %
Med åtgärd, $Q_u=0,5$	13 800	39 %

Tabell 11: Åtgärdens effekt på översvämningsarean jämfört nuläge (utan åtgärd), för respektive parameterändring. Minskningen är angiven i procent av översvämningsarean jämfört med scenariot utan åtgärd.

Analys	Minskning
$k=1,2$	53 %
$Q_u = 1,0 \text{ m}^3/\text{s}$	48 %
$Q_u = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$	49 %

6 DISKUSSION

6.1 ÖVERSVÄMNINGSUTBREDNING UTAN ÅTGÄRDER

Älvdansen drabbades av omfattande översvämningar i samband med det simulerade skyfallet (Figur 20). Översvämningarna uppstod dels till följd av att det intilliggande diket, Skvalbäcken, svämmade över och dels till följd av direkt nederbörd på området. Tillflöde från Mästarbacken, sydost om Älvdansen, bidrar också delvis till översvämningarna. De tidvis stora flödena i Skvalbäcken orsakas i huvudsak av avrinning från Handelsområdet Myran, via Mellersta diket, och från Östra diket. Handelsområdet består av många hårdgjorda ytor med låg infiltrationsförmåga och friktion, vilket skapar förutsättningar för mycket avrinning och höga flödes hastigheter. Att handelsområdet bidrar med ett betydande flöde till Skvalbäcken i samband med skyfallet är därför väntat.

Östra dikets avrinningsområde är 5 km² (SCALGO Live u.å.) och utgörs i huvudsak av den östra delen av Skvalbäckens avrinningsområde norr om E18 (Figur 10). Avrinningsområdets storlek gör att det kan bidra med stora volymer även om stora delar av området utgörs av icke hårdgjorda ytor med relativt hög infiltrationsförmåga. Bidraget är dock inte så stort som skulle kunna förväntas utifrån områdets storlek. Detta beror på att stora volymer samlas inom Försvarens område (område 2 i Figur 19), till följd av att området ligger i en sänka. Tröskelnivån för att vatten ska börja flöda vidare nedströms mot Älvdansen överskreds relativt sent i det simulerade förloppet och påverkade inte den maximala översvämningens utbredning. Det bedömdes därför inte vara aktuellt att placera skyfallsåtgärder i detta delavrinningsområde. Skulle marknivån på åsens lägsta punkt sänkas något eller vara lägre än höjdmodellen visade skulle det kunna få en stor påverkan nedströms vid ett eventuellt skyfall. I sådana fall skulle det kunna vara aktuellt att placera skyfallsåtgärder uppströms E18.

Modelleringen visade också att den nordvästra delen av Skvalbäckens uppskattade avrinningsområde, vilken har en area på 4 km², inte ingick i det faktiska avrinningsområdet i samband med skyfallet. Under hela simuleringen utgjorde E18 en vattendelare som hindrade avrinning från nordväst från att nå Skvalbäcken. Detta innebär att det inte var aktuellt att placera skyfallsåtgärder i detta område. Den högsta vattennivån för vattensamlingen norr om E18 (område 1 i Figur 19) låg mycket nära markhöjden för vägens lägsta punkt. En mindre sänkning av denna punkt skulle därför leda till att E18 inte längre utgör en vattendelare, vilket i så fall skulle resultera i större översvämningar nedströms, inklusive Älvdansen. Det samma gäller för om en större vattenvolym ansamlas på platsen, på grund av mindre infiltration uppströms eller en större regnvolymer.

6.2 MODELLERADE ÅTGÄRDER

En utmaning vid valet av lämpliga åtgärdsplatser och -typer i denna studie var att området runt Älvdansen är flackt och de största tillgängliga ytorna fanns på naturområdet uppströms Älvdansen, mellan E18 och Älvdansen. Detta gjorde det svårt att förflytta stora volymer för fördröjning från exempelvis Mellersta dikets avrinningsområde. Stora centrerade åtgärder så som dammar och våtmarker valdes därför bort i denna studie eftersom det var svårt att hitta lämpliga placeringar av dessa åtgärds typer. Under andra platsspecifika förutsättningar skulle dessa naturbaserade åtgärder kunna vara aktuella. De tre naturbaserade lösningarna som valdes ut, genomsläpplig beläggning, svackdiken och överdämningsytor, valdes eftersom de är anpassade efter de har potential att passa på de utvalda åtgärdsplatserna och är relativt enkla att lägga i nulägesmodellen i HEC-RAS. Inom ramen för detta projekt kunde endast ett begränsat

antal åtgärder studeras. Det kan finnas andra skyfallsåtgärder som också kan vara aktuella att implementera i området, men som inte studerats.

Vallen runt Älvdansen är inte en naturbaserad åtgärd men översvänningsåtgärden är sedan tidigare föreslagen av Enköpings kommun. Åtgärden förväntades kunna minska översvämningarna i Älvdansen genom att förhindra att vatten från Skvalbäcken når Älvdansen. Modelleringen visade att åtgärden lyckas med detta och åtgärden kunde minska översvänningsarean och det maximala vattendjupet med 20 % respektive 14 %. En förklaring till att vallen inte hade en högre effektivitet var att vallen inte bara stängde ut vatten, utan också stängde in vatten. Vallen hindrade vatten som nått Älvdansen genom direkt nederbörd och från Mästerbacken att lämna Älvdansen. Detta gjorde det också svårt att kombinera åtgärden med någon av de andra åtgärdstyperna i studien.

Genomsläpplig beläggning är en naturbaserad åtgärd och studier visar att åtgärden kan motverka översvämningar kopplade till kraftigt regn. Det bedömdes vara möjligt att anlägga åtgärden i Mellersta dikets avrinningsområde. Avrinningsområdet bestod till största delen av en handelsplats med flertalet större parkeringsplatser, vilka bedömdes kunna utgöra lämpliga anläggningsplatser för genomsläpplig beläggning. Målet med åtgärden var att minska avrinningen till Mellersta diket och på så vis minska vattendjupet i Skvalbäcken. Modelleringen visade dock att åtgärden hade en mycket liten påverkan på flödet i Mellersta diket (Figur E 1) och ingen minskning av översvänningsutbredningen i Älvdansen. Detta ligger inte i linje med resultatet från flertalet andra studier. En studie av Liu et al. (2014) visar att genomsläppliga beläggningar kan minska avrinningsvolymen och det maximala flödet med runt 40 % vid ett likande regn. En annan studie, av Kourtis et al. (2020), visar att genomsläpplig beläggning kan minska översvänningsvolymen med 86 % och 78 % vid ett 50- respektive 100-årsregn i Aten. En möjlig förklaring till att beläggningen inte kunde minska översvämningen är att beläggningen inte upptar en tillräckligt stor yta. Beläggningen anlades i modellen på endast 10 % av Mellersta dikets avrinningsområde, vilket kan jämföras med 35 % av avrinningsområdet i studien av Liu et al. (2014). Det var dock svårt att hitta anläggningsplatser för genomsläpplig beläggning i Mellersta dikets avrinningsområde eftersom en mycket stor del av arean bestod av tak och vägar, vilka bedömdes som olämpliga anläggningsplatser. Beläggningen borde dock haft någon effekt på översvämningen i Älvdansen redan vid nuvarande utformningen för att åtgärdstypen skulle ha potential att vara lika effektiv som övriga åtgärder i studien. Det är dock möjligt att den genomsläppliga beläggningen egentligen har en högre effekt än vad modelleringen visade. I modellen representeras beläggningen genom att infiltrationsparametrarna på platsen ändras. Det finns dock stora osäkerheter kopplade till dessa parametervärden, vilket diskuteras mer under avsnitt 6.4.2. För att med en större säkerhet kunna utvärdera om genomsläpplig beläggning är en lämplig skyfallsåtgärd för Älvdansen eller inte hade infiltrationsparametrarna på platsen behövts studeras noggrannare och kalibreras mot fältmätningar.

Svackdiken är också en naturbaserad åtgärd som kan motverka pluviala översvämningar. Det bedömdes vara lämpligt att anlägga svackdiken längs Östra diket och Skvalbäcken samt runt Älvdansen som ett komplement. Modelleringen visade att åtgärderna hade effekt. Enbart det stora svackdiket S1 kunde minska översvänningsarean med 23 %. Att komplettera detta svackdike med ytterligare ett svackdike S2 gav en stor förbättring, då minskade översvänningsarean med 40 %. Att lägga till ytterligare ett svackdike längre uppströms, S3, gav dock ingen större förbättring. En förklaring att svackdikena var en effektiv åtgärdstyp är att de kunde

placeras så att flera åtgärdsbehov uppfylldes. S1 kunde minska vattendjupet i Skvalbäcken genom att både fördröja vatten uppströms Älvdansen och ta hand om vatten från Mellersta diket. När S1 kompletteras med S2 kan åtgärden också avleda flödet från Mästerbacken runt Älvdansen samt avleda och fördröja avrinning i direkt anslutning till de största översvämningarna i Älvdansen. Detta var också målet med åtgärderna. En annan delförklaring till att åtgärdstypen var effektiv är att åtgärden hade en stor fördröjningsvolym.

Den här studien visar på att svackdiken har en högre effektivitet jämfört med flertalet andra studier. Exempelvis kan svackdikena i en studie Lu et al. (2024) minska avrinningen med 15 - 25 % vid ett liknande regn. I den studien upptar svackdikerna 0,3 % av avrinningsområdets area, vilket är lika stor area som S1+S2+S3 upptar av det faktiska avrinningsområdet vid skyfallet. Andra dimensioneringsparametrar så som dikenas djup och lutning framgår dock inte i artikeln av Lu et al. (2024). Dessa faktorer kan också påverka svackdikenas funktion och kan vara en delförklaring till att resultaten mellan studierna skiljer sig åt. En annan studie som studerade hur svackdikens förmåga att minska avrinning är en metastudie av Dobkowitz et al. (2025), vilken säger att svackdiken har en maximal effektivitet på 30 %. Studien säger också att få studier har studerat svackdikens förmåga att minska urbana översvämningar. Det skulle därför behövas fler studier om detta ämne för att det ska vara möjligt att dra några generella slutsatser om i hur stor mån svackdiken kan minska urbana översvämningar och hur de bör dimensioneras. Särskilt med tanke på att svackdikens förmåga att hantera avrinning och minska översvämningar varierar dock stort och beror på ett flertal faktorer så som regnets karaktär, diket lutning och markfuktighet (Bhat et al. 2024). En dimensioneringsfaktor som dock redan är känd är att svackdiken med en måttlig lutning fungerar bättre än svackdiken med en brant lutning (Bhat et al. 2024). I den här studien har svackdikena en svag lutning, vilket också borde vara fördelaktigt.

Överdämningsytor är också en naturbaserad översvänningsåtgärd. Det bedömdes möjligt att anlägga överdämningsytor längs Skvalbäcken samt i anslutning till de största översvämningarna i Älvdansen. Modelleringen visade att åtgärden hade effekt. Översvänningsarean minskade med 25 % för både alternativ DP1 och DP2. Det var alltså lika effektivt att ha en stor överdämningsyta som två mindre utifrån nuvarande placering. En studie av Bhusal et al. (2023) visar att det är effektivare att dela upp och sprida ut fördröjningsvolymen. Att placera överdämningsytorna mer utspritt runt Älvdansen, till exempel att placera en lite yta ovan för Mästerbacken, en liten norr om Älvdansen och en liten väster om Mellersta diket, skulle därför potentiellt kunna vara ett effektivare åtgärdsalternativ än DP1 och DP2. Bhusal et al.'s (2023) studie visar också precis som denna studie att överdämningsytor kan vara en viktig översvänningsåtgärd vid extrem nederbörd. Det finns dock studier som motsäger detta resultat, till exempel visar Saniei et al. (2021) att överdämningsytor är dåliga på att minska översvämningar och att svackdiken och genomsläpplig beläggning är mycket mer effektiva. Deras studie visar att överdämningsytorna kunde minska översvänningsvolymen med 0,03 %, vilket kan jämföras med svackdikena och den genomsläppliga beläggningen som kunde minska översvämningen med 14 % respektive 23 % under samma yttre förutsättningar. Det framgår dock inte av artikeln hur stora överdämningsytorna som studeras är. Det skulle kunna vara så att överdämningsytorna i studien (Saniei et al. 2021) är små i förhållande till överdämningsytorna i den här studien, vilket skulle kunna förklara de stora effektivitetskillnaderna mellan studierna.

Det mest effektiva åtgärdsalternativet var åtgärden där två svackdiken kombinerades med en överdämningsyta, S1+S2+DP2_2. Då kunde översvämningens utredning minska med nästan 50 % och det maximala vattendjupet med 25 %. Att S1+S2+DP2_2 var det effektivaste åtgärdsalternativet som modellerats beror troligtvis på två betydelsefulla faktorer. Den första är att åtgärden är den åtgärd som upptar störst area och näst störst volym, S1+S2+S3 har en något större volym, vilket gör det möjligt för åtgärden att fördröja mycket vatten. Den andra faktorn är att det är en kombination av två olika åtgärdstyper, vilket gör det möjligt att tillgodose flera åtgärdsbehov samtidigt. Till exempel kan svackdike S2 bidra med avledning av vatten Mästarbacken bort från bostadsområdet, vilket inte en överdämningsyta skulle kunna göra. Överdämningsytor kan i stället utgöra en stor fördröjningsvolym på en koncentrerad plats, vilket kan behövas i andra situationer, så som vid DP2_2:s placering. Detta stöds också av en översiktsstudie av Esraz-Ul-Zannat et al. (2024) som visar att översvämningar minskar mest effektivt genom att flera olika typer av naturbaserade lösningar kombineras jämfört när bara en typ används. Resultatet ligger också i linje med en studie av Lai et al. (2024) som visar att överdämningsytor i kombination med ett svackdike och en damm kan minska avrinningen på studieområde med 60 % vid kraftiga skyfall. Naturbaserade lösningars effektivitet beror dock på regnets storlek och åtgärdens skala, vilket gör det svårt göra en generell bedömning av åtgärdstypernas effektivitet (Green et al. 2021). Denna studie visar dock precis som andra studier (ex. Haghatafshar et al. 2018) att naturbaserade lösningar kan vara effektiva åtgärder mot skyfallsrelaterade översvämningar. Ingen av de studerade åtgärderna kunde dock helt förhindra att en översvämning bildades i Älvdansen till följd av det simulerade 100-årsregnet utan skulle behöva kompletteras med andra åtgärder.

6.3 MERVÄRDEN

Alla de naturbaserade lösningarna som studerats bidrar med flertalet mervärden (Tabell 1). En ekosystemtjänst som de alla bidrar med är vattenreglering. Åtgärderna minskar inte bara skyfallsrelaterade översvämningar, utan bidrar med vattenreglering i andra nederbördssituationer också. Ytterligare en ekosystemtjänst som uppfylls av genomsläpplig beläggning, svackdiken och överdämningsytor är förbättrad vattenkvalitet. Alla åtgärderna renar regnvattnet, men delvis med olika mekanismer. För svackdiken är de huvudsakliga reningsprocesserna sedimentering, filtrering och adsorption (Fardel et al. 2019). Överdämningsytornas huvudsakliga reningsprocess är sedimentation (Moazzem et al. 2024).

Svackdiken och överdämningsytor bidrar med flest mervärden. Att svackdiken och överdämningsytor kan bidra med ungefär samma ekosystemtjänster är rimligt eftersom de är två liknande åtgärdstyper. Båda är gräsbeklädda nedsänkta ytor i landskapet som periodvis är fyllda med vatten. Kolinlagring är teoretiskt ett möjligt mervärde men inte tillämpligt här, eftersom kolinlagringen i svackdiken är jämförbar med inlagringen i gräsytor (Bouchard et al. 2013). Om svackdiken och överdämningsytor skulle anläggas på exempelvis en tidigare hårdgjord yta skulle mervärdet däremot uppfyllas. Svackdiken och överdämningsytor bidrar också med ekosystemtjänsterna rekreation och hälsa samt utbildning och kunskap, vilket inte den genomsläppliga beläggningen gör (Tabell 1). Bakgrunden till detta är att svackdiken och överdämningsytor till skillnad från genomsläpplig beläggning är tydligt synliga och gröna åtgärder. Svackdiken kan till exempel bidra till en ökad medvetenhet om översvämningar och ge befolkningen i städerna en möjlighet att komma närmare naturen (Church 2015). För att rekreativvärdena ska uppfyllas är det viktigt att åtgärderna och miljön runt om kring designas med en vacker och lugn gestaltning som gör att människor tycker om att vistas där.

I den här studien har en översiktlig utformning av åtgärderna gjorts, men en stor del av designstadiet kvarstår. Under designstadiet kan mycket göras för att säkerställa att en naturbaserad lösning ska uppfylla relevanta ekosystemtjänster i så stor utsträckning som möjligt (Orta-Ortiz & Geneletti 2022). På åtgärdsplatserna och omkringliggande område finns stora designmöjligheter. De föreslagna åtgärdsplatserna för svackdikena och överdämningsytorna är ett bostadsnära naturområde, men området består idag av delvis svårtillgänglig natur, med exempelvis få anlagda stigar och tuvig ängsmark eller tät, slyig skogsvegetation. Genom att till exempel anlägga nya promenadstigar i anslutning till åtgärderna och använda funktionella och estetiskt tilltalande växter kan områdets tillgänglighet och förutsättningar för rekreation ökas. Åtgärderna kan också kombineras med informationsskyltar, vilket bidrar till en ökad medvetenhet om översvämningar (Church 2015). De tekniska mervärdena så som förbättrad vattenkvalitet kan förbättras genom att ett tjockare gruslager användes i den genomsläppliga beläggningen (Liu et al. 2019) och genom att en lång uppehållstid i svackdikena eftersträvas (Fardel et al. 2019).

Att bedöma och jämföra vilka mervärden åtgärderna uppfyller är svårt. Det finns litteratur som diskuterar naturbaserade skyfallsåtgärders förmåga att tillgodose olika ekosystemtjänster, men majoriteten kvantifierar inte ekosystemtjänsten (Prudencio & Null 2018), vilket försvårar analysen. Det saknas också en standardiserad terminologi för naturbaserade översvämningståtgärder (Prudencio & Null 2018), vilket också försvårar jämförelsen. Dessutom ser García och Santamarta (2022) i sin studie att det saknas empiriskt stöd för att naturbaserade lösningar faktiskt bidrar med flera av de ekosystemtjänster som beskrivs i litteraturen. De säger att det finns många studier som stödjer att naturbaserade dagvattenåtgärder bidrar till vattenreglering och förbättrad vattenkvalitet, men att det saknas empiriskt stöd för att åtgärderna till exempel bidrar till en förbättrad luftkvalitet. Det är alltså inte säkert att genomsläpplig beläggning, svackdiken och överdämningsytor har potential att uppfylla lika många ekosystemtjänster som beskrivs i Tabell 1. Fler studier som empiriskt undersöker hur väl åtgärdstyperna tillgodoser olika ekosystemtjänster behövs.

Trots de tidigare nämnda utmaningarna med att jämföra åtgärdernas olika mervärden, går det att säga att svackdikena och överdämningsytorna har potential att bidra med många mervärden. Även den genomsläppliga beläggningen har potential att bidra med mervärden, men färre än svackdikena och överdämningsytorna. Vallen som inte är en naturbaserad lösning har dock minst potential att bidra med mervärden.

6.4 OSÄKERHETER I MODELLEN

I modellen finns flera källor till osäkerhet. Utflödet ur modellen och klimatfaktorn bedömdes efter att åtgärderna modellerats vara två av de osäkerhetskällor som hade störst påverkan på resultat. För att bedöma hur stor påverkan dessa parametrar hade på resultatet genomfördes en känslighetsanalys. Det finns också andra viktiga felkällor i modellen, vilka också diskuteras i detta avsnitt.

6.4.1 Känslighetsanalysen

Så väl utflödets storlek som valet av klimatfaktor påverkade den maximala översvämningutbredningen. Utflödet ur modellen via utloppskulverten var inte känd och därmed en stor osäkerhetsfaktor. Kulvertens maximala flödeskapacitet uppskattades ligga mellan 0,5 m³/s och 1 m³/s, där 0,8 m³/s uppskattades vara det troligaste maxflödet. När utflödet under känslighetsanalysen sänktes från 0,8 m³/s till 0,5 m³/s fick det en stor påverkan på den

maximala översvämningsarean i Älvdansen. Arealen ökade med 40 % till följd av den ökade dämningen nedströms. Att öka utflödet till 1 m³/s hade däremot en mindre påverkan på översvämningsutbredningen. Arealen minskade bara med 4 %. Modellen är alltså väldigt känslig för ett minskat utflöde men inte lika känslig för ett ökat utflöde. Den verkliga översvämningsutbredningen ligger med största sannolikhet någonstans mellan resultaten från de två analyserna. För att spegla detta hade därför ett bättre parametervärde på utflödet i huvudmodellen varit det utflöde som resulterar i översvämningsutbredning mitt i mellan de två extremfallen. Då hade modelleringen visat på en större översvämningsrisk än vad som beskrivs i Figur 20. Denna osäkerhet skulle kunna minskas genom att en noggrannare utredning av kulvertens kapacitet genomförs.

Klimatfaktorn påverkar regnvolymen, vilken i sin tur har en direkt påverkan på översvämningsutbredningen. Att ändra klimatfaktorn från 1,4 till 1,2, vilket motsvarar en minskning av regnvolymen med 15 %, resulterade i minskning av översvämningsarean med 40 %. En minskning av regnvolymen resulterar alltså i en större procentuell minskning av översvämningsarean. Klimatfaktorerna representerar två olika klimatscenarior, RCP 8,5 och RCP 4,5, vilka bara är en uppskattning av framtiden. Det är idag omöjligt att veta hur utvecklingen i framtiden kommer att se och därmed relevant att ta höjd för en utveckling där koldioxidutsläppen fortsätter vara höga en lång tid framöver, vilket RCP 8,5 representerar. RCP 8,5 (k = 1,4) är också det klimatscenario som MSB generellt rekommenderar vid skyfallskarteringar. Resultatet från RCP 4,5 (k = 1,2) är dock ändå relevant eftersom tillsammans med det andra scenariot speglar att klimatscenariorna bidrar med en betydande osäkerhet i modellen. Modelleringen visade också att åtgärden *SI*, *S2* och *DP2_2* är mycket effektiv och vid RCP 4,5 nästan helt kan minska översvämningsarna i Älvdansen utan att vara överdimensionerad (Figur D 2a).

Åtgärdernas effektivitet påverkades, till skillnad från den maximala översvämningsutbredningen i Älvdansen, mycket lite när klimatfaktorn och utflödet ändras i modellen. Modellens känslighet för dessa parameterändringar var därmed lika stor oavsett om åtgärden är implementerad eller inte. Åtgärdernas effektivitet låg på 50 % vid alla parameterändringar vilket är samma som huvudmodellen visade. Detta stärker resultatets trovärdighet. Under känslighetsanalysen studeras bara en av åtgärderna, den mest effektiva. Det är dock rimligt att anta att ett liknande resultat gäller för de andra åtgärderna.

6.4.2 Andra felkällor

En viktig felkälla i modellen som inte studerades i känslighetsanalysen är den nederbördsdata som använts. I modellen beskrevs skyfallet med hjälp av ett CDS-regn med en uniform nederbördsintensitet över hela modellområdet. I verkligheten har inte skyfall en uniform nederbördsintensitet, utan nederbördsintensiteten kan variera stort på en mindre spatial skala. Till exempel varierade nederbördsintensiteten kraftigt i både tid och rum under skyfallet i Malmö år 2014 (MSB 2017). Spatials homogena regn kan leda till att maximala flödestoppar så väl som översvämningsdjup underskattas (Zhou et al. 2021; Jeppsson Stahl 2022). Om så är fallet även i denna modell skulle det kunna få stor påverkan på resultatet. Har modellen underskattat de maximala flödena vid skyfallet skulle det kunna ha en stor inverkan på avrinningsområdets dynamik vid regnet, vilket i sin tur påverkar översvämningsdjupen. Om nederbörden i den norra delen av modellen är underskattad skulle detta kunna resultera i ett större flöde i denna del och att tröskelnivån exempelvis E18 överskrids och som följd blir översvämningsarean i Älvdansen större. Men vid ett sådant scenario skulle regnet å andra sidan inte

längre räknas som ett 100-årsregn i det berörda området utan ett regn med en lokalt längre återkomsttid, vilket också kan vara relevant att studera med inte inom ramen för detta arbete.

Parametrisering av infiltrationen är en annan viktig felkälla i modellen. I modellen beskrevs infiltrationen med hjälp av SCS-CN-metoden och modellerades som ett direkt avdrag på nederbörden, vilket betyder att den precis som flera av tidigare nämnde felkällor påverkade den totala nederbördsvolymen i systemet. Parametervärdena som användes för att beskriva infiltrationen bygger på standardiserade parametervärden anpassade efter olika klasser av markanvändning och jordarter som SCALGO (2024) har tagit fram genom avrinningssimuleringar. Det finns därmed stora osäkerheter kopplade till hur väl modellen har uppskattat den verkliga infiltrationen i avrinningsområdet. Att infiltrationsparametrarna endast bygger på avrinningssimuleringar och inte har validerats av empiriska data är en stor nackdel, men det bedömdes ändå vara den bästa tillgängliga metoden för detta projekt. Alternativet hade varit att använda de parametervärden som togs fram under 1930- och 1940-talet när SCS-CN-metoden utvecklades. Problemet med dessa värden är att de inte är anpassade efter den skala som skyfallsmodelleringen sker på, vilket kan leda till större fel (SCALGO 2024). För den genomsläppliga beläggningen används inte SCALGOs infiltrationsparametrar men det finns fler osäkerheter kopplade till dessa parametervärden också (Du et al. 2023; Pachaly et al. 2023).

Hur stor påverkan en felaktigt uppskattad infiltration beror på var i modellområdet som felet är lokaliserat. En överskattad infiltration resulterar generellt till att översvänningsdjupen underskattas. Effekten på översvänningsriskerna i Älvdansen blir extra stor vid en minskad infiltrationen i det västra modellområdet norr om E18. Då finns det stor risk att tröskelnivån vid E18 överskrids och detta område faktiskt bidrar med avrinning till Älvdansen med större översvämningar i bostadsområdet som följd. En liknade effekt skulle fås vid en minskad infiltration i det nordöstra modellområdet. Modelleringen visade på att till skillnad från andra studier att genomsläppliga beläggning inte fungerade som översvänningsåtgärd, vilket diskuteras i avsnitt 6.2. En möjlig förklaring till detta kan var just att infiltrationen är felaktigt uppskattad, överskattad generellt i handelsområdet Myran och underskattad för beläggningen.

En annan viktig felkälla är att dagvattennätets kapacitet beskrivs med schablonavdrag. Att beskriva dagvattennätets kapacitet med ett schablonavdrag är en stor förenkling av verkligheten. Felkällan påverkade avrinningen på hårdgjorda ytor, vilket i denna modell framför allt gällde handelsområdet och Älvdansen. Metodvalet hade en mycket liten påverkan i den norra delen av avrinningsområdet, eftersom det fanns mycket få hårdgjorda ytor i detta område. Schablonavdragen kan leda till att översvämningen överskattas på vissa platser och underskattas på andra (MSB 2017). Felen blir störst när metoden används i områden med stora topografiska skillnader och vid mindre regn som ligger nära ledningsnätets kapacitet (MSB 2023). Den här modellen beskriver ett område med små topografiska skillnader och ett kraftigt regn. Schablonavdragen borde därför inte ha orsakat allt för stora felaktigheter. Det relativa felet blir dock större när RCP 4,5 används eftersom då är regnet mindre. Om dagvattennätet i stället beskrivits med hjälp av en kopplad modell hade det gett ett noggrannare resultat, med det hade också krävts betydligt mer arbete. En annan fördel med en kopplad modell är att det då hade varit möjligt att studera skyfallsåtgärder som är direkt kopplade till ledningsnätet.

6.5 VIDARE STUDIER

I det här arbete undersöktes översvänningsutbredningen i Älvdansen vid ett 100-årsregn och hur tre naturbaserade lösningar, svackdike, överdämningsyta och genomsläpplig beläggning,

samt en vall kunde minska översvämningarna kopplade till skyfallet. Fokus har legat på åtgärdernas effektivitet, men för att det ska vara aktuellt att implementera någon av åtgärderna som studerats måste också andra faktorer utredas och vägas in i bedömningen. Till exempel skulle en kostnadsanalys behövas för att bedöma åtgärdernas kostnadseffektivitet. En fördjupad undersökning över de platsspecifika förutsättningarna på de föreslagna anläggningsplatserna samt en noggrannare studie av lämplig dimensionering av åtgärderna skulle också behövas innan en eventuell anläggning genomförs.

Som tidigare nämnts är det svårt att jämföra skyfallsåtgärder och än mer naturbaserade skyfallsåtgärder, eftersom åtgärdernas förmåga att minska översvämningdjupet är mycket platsberoende. Denna studie visar precis som andra studier att naturbaserade skyfallsåtgärder har en stor potential, men fler studier behövs kring ämnet. De framtida studierna bör precis som denna studie studera hur åtgärderna bör placeras och dimensioneras för att vara så effektiva som möjligt, men på andra platser olika platser. Den här studien har studerat ett begränsat antal åtgärdstyper. Det kan dock finnas andra skyfallsåtgärder som kan vara aktuella runt Älvdansen och särskilt på andra platser, vilka också bör studeras. Dessa studier skulle tillsammans med nuvarande kunskap kunna skapa ett underlag från vilket allmänna rekommendationer kring vilka åtgärdstyper som passar på vilken plats och hur de bör placeras och dimensioneras för att uppnå högsta funktion.

7 SLUTSATSER

I detta arbete studerades hur olika typer av skyfallsåtgärder kan minska skyfallsrelaterade översvämningar i Älvdansen, med hjälp av en skyfallsmodell i HEC-RAS. Hur åtgärderna kan placeras och dimensioneras samt vilka mervärden de kan ge har också studerats. Från arbetet kan följande slutsatser dras:

- Dynamisk hydraulisk modellering är ett mycket viktigt verktyg för att förstå vad som händer i avrinningsområdet i samband med ett skyfall. Det är först efter att modelleringen är genomförd som det går att avgöra i vilka delavrinningsområden som det kan vara lämpligt att anlägga skyfallsåtgärder och hur åtgärderna bör dimensioneras. Detta gäller platser där det liksom i Älvdansen saknas fysiska observationer från historiska skyfall.
- Älvdansen kommer att drabbas av översvämningar vid ett 100-årsregn. Det finns dock stora osäkerheter i skyfallsmodellen, vilket gör det svårt att avgöra exakt hur stora översvämningarna blir. Mindre förändringar av avrinningsområdets topografi och infiltration kan också leda till att översvämningens risk i Älvdansen vid ett framtida skyfall ökar kraftigt.
- Att göra om befintliga diken till svackdiken, eller på något annat sätt öka dikenens volym, kan vara en viktig översvämningssåtgärd i Älvdansen och i andra liknade områden. Om denna åtgärd inte räcker kan dess effektivitet ökas genom att den kombineras med överdämningsyta i anslutning till det största problemområdet.
- Alla de naturbaserade lösningarna som studerats kan bidra med flertalet mervärden, så som förbättrad vattenkvalitet. Svackdiken och överdämningsytor har potentialen att bidra med flest mervärden. I vilken omfattning respektive mervärde tillgodoses var svårt att bedöma. Men det är viktigt att ta hänsyn till mervärden under designstadiet för att optimera vinsterna.

8 REFERENSER

- Bhat, A.M., Mohapatra, P.K. & Tripathi, I.M. (2024). Hydrologic-hydraulic response of swales to stormwater runoff. *Total Environment Advances*, 12, 200118. <https://doi.org/10.1016/j.teadva.2024.200118>
- Bhusal, A., Kalra, A. & Shin, S. (2023). Resilience effect of decentralized detention system to extreme flooding events. *Journal of Hydroinformatics*, 25 (3), 971–988. <https://doi.org/10.2166/hydro.2023.176>
- Blomquist, D., Hammarlund, H., Härle, P. & Karlsson, S. (2016). *Riktlinjer för modellering av spillvattenförande system och dagvattensystem*. (2016–15). Svenskt Vatten AB. http://vav.griffel.net/db.pl?template_file=db_link_pdf.html&link=a&pdf=SVU-rapport_2016-15.pdf [2026-01-26]
- Bouchard, N.R., Osmond, D.L., Winston, R.J. & Hunt, W.F. (2013). The capacity of roadside vegetated filter strips and swales to sequester carbon. *Ecological Engineering*, 54, 227–232. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.01.018>
- Brunner, G.W. (2020). *HEC-RAS Hydraulic Reference Manual*. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/ras1dtechref/6.5> [2026-01-31]
- Brunner, G.W. (u.å.). *HEC-RAS 2D User's Manual*. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/r2dum/6.5> [2025-10-16]
- Carlzén, S., Jonsson, C., Sellén, P. & Amram, S. (2025). *Skyfallet i Västernorrland – detta har hänt*. SVT Nyheter. <https://www.svt.se/nyheter/lokalt/vasternorrland/skyfallet-i-vasternorrland-detta-har-hant> [2025-10-16]
- Church, S.P. (2015). Exploring Green Streets and rain gardens as instances of small scale nature and environmental learning tools. *Landscape and Urban Planning*, 134, 229–240. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.021>
- Dahlström, B. (2010). *Regnintensitet – en molnfysikalisk betraktelse*. (29–103). Svenskt Vatten AB. http://vav.griffel.net/db.pl?template_file=db_link_pdf.html&link=a&pdf=Rapport_2010-05.pdf [2025-10-07]
- Dobkowitz, S., Bronstert, A. & Heistermann, M. (2025). Water retention by green infrastructure to mitigate urban flooding: a meta-analysis. *Urban Water Journal*, 22 (5), 477–492. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2025.2472325>
- Du, X., Yang, M., Yin, Z. & Fang, X. (2023). Influence of Initial Abstraction Ratios in NRCS-CN Model on Runoff Estimation of Permeable Brick Pavement Affected by Clogging. *Water Resources Management*, 37 (8), 3211–3225. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03498-w>
- Esraz-Ul-Zannat, Md., Dedekorkut-Howes, A. & Morgan, E.A. (2024). A review of nature-based infrastructures and their effectiveness for urban flood risk mitigation. *WIREs Climate Change*, 15 (5), e889. <https://doi.org/10.1002/wcc.889>
- Fardel, A., Peyneau, P.-E., Béchet, B., Lakel, A. & Rodriguez, F. (2019). Analysis of swale factors implicated in pollutant removal efficiency using a swale database. *Environmental*

Science and Pollution Research, 26 (2), 1287–1302. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3522-9>

Feldmann, D., Laux, P., Heckl, A., Schindler, M. & Kunstmann, H. (2023). Near surface roughness estimation: A parameterization derived from artificial rainfall experiments and two-dimensional hydrodynamic modelling for multiple vegetation coverages. *Journal of Hydrology*, 617, 128786. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128786>

Finansinspektionen (2023). *FI-tillsyn 26: Försäkringsföretagen och översvämningarna i Gävleborg*. (FI-tillsyn, 26).

<https://www.fi.se/contentassets/3a4ad469a4824808913462bbafbc1221/fi-tillsyn-26-forsakringsforetagen-och-oversvamningarna-gavleborg.pdf> [2025-10-13]

Forsell, D. (2018). *Regnrekord i Uppsala – ”Ovanligt med så mycket regn på så kort tid”*. *SVT Nyheter*. <https://www.svt.se/nyheter/lokalt/upsala/kraftiga-regnet-i-upsala-ovanligt-med-sa-mycket-regn-pa-sa-kort-tid> [2026-01-21]

García, A.I.A. & Santamarta, J.C. (2022). Scientific Evidence behind the Ecosystem Services Provided by Sustainable Urban Drainage Systems. *Land*, 11 (7), 1040.

<https://doi.org/10.3390/land11071040>

Green, D., O'Donnell, E., Johnson, M., Slater, L., Thorne, C., Zheng, S., Stirling, R., Chan, F.K.S., Li, L. & Boothroyd, R.J. (2021). Green infrastructure: The future of urban flood risk management? *WIREs Water*, 8 (6), e1560. <https://doi.org/10.1002/wat2.1560>

Griffiths, J., Borne, K.E., Semadeni-Davies, A. & Tanner, C.C. (2024). Selection, Planning, and Modelling of Nature-Based Solutions for Flood Mitigation. *Water*, 16 (19), 2802.

<https://doi.org/10.3390/w16192802>

Göteborgs Stad (2022). Kretslopp och vattens rutin för skyfallsutredningar.

<https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fgoteborg.se%2Fwps%2Fwcm%2Fconnect%2F688ba0d5-1481-44de-a0d5-0f1c2ccef3e8%2FC1257AA800367DFCEDATCFDH3D.docx%3FMOD%3DAJPERES&wdOrigin=BROWSELINK> [2025-09-25]

Hager, W.H., Castro-Orgaz, O. & Hutter, K. (2019). Correspondence between de Saint-Venant and Boussinesq. 1: Birth of the Shallow–Water Equations. *Comptes Rendus Mécanique*, 347 (9), 632–662. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2019.08.004>

Haghighatafshar, S., Nordlöf, B., Roldin, M., Gustafsson, L.-G., la Cour Jansen, J. & Jönsson, K. (2018). Efficiency of blue-green stormwater retrofits for flood mitigation – Conclusions drawn from a case study in Malmö, Sweden. *Journal of Environmental Management*, 207, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.018>

Hallqvist, T. & Idemar, O. (2019). *Stora översvämningar över hela Uppsala*. *SVT Nyheter*. <https://www.svt.se/nyheter/lokalt/upsala/oversvamning-vid-strandbogatan-i-upsala> [2026-01-21]

Hernebring, C., Milotti, S., Kronborg, S.S., Wolf, T. & Mårtensson, E. (2015). Skyfallet i Sydvästra Skåne 2014-08-31: Fokuserat mot konsekvenser och relation till regnstatistik i Malmö. *Vatten – Journal of Water Management and Research*, 71 (2), 85–100

Hungr, O. (2005). Classification and terminology. I: Jakob, M. & Hungr, O. (red.) *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Springer. 9–23. https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5_2

Hydrologic Engineering Center (u.å.). *HEC-RAS*.
<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/> [2025-10-16]

Jeppsson Stahl, F. (2022). The influence of spatial variations in rain intensity for cloudburst modelling: a case study of the Gävle cloudburst.
<https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-473530>

Kourtis, I.M., Tsihrintzis, V.A. & Baltas, E. (2020). A robust approach for comparing conventional and sustainable flood mitigation measures in urban basins. *Journal of Environmental Management*, 269, 110822. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110822>

Krisinformation (2025). *Skyfallen i Västernorrland*. <https://www.krisinformation.se/forbered-dig/handelser-och-storningar/2025/flera-vagar-avskurna-efter-skyfall-i-vasternorrlands-lan> [2025-10-14]

Lai, S.H., Chin, R.J., Soo, E.Z.X., Ling, L. & Ghadim, H.B. (2024). Optimal Design of Subsurface Conveyance System Based Bio-Ecological Drainage System Simulation. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28 (6), 2564–2570. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-1475-8>

Lantmäteriet (2023). *Produktbeskrivning: Markhöjdmodell Nedladdning, grid 1+*.
https://www.lantmateriet.se/globalassets/geodata/geodataprodukter/hojddata/mhm1_plus.pdf [2025-12-01]

Lantmäteriet (2025). Topografi 10 Nedladdning, vektor

Larm, T. & Blecken, G. (2019). *Utformning och dimensionering av anläggningar för rening och flödesutjämning av dagvatten*. (2019–20). Svenskt Vatten AB.
<http://vav.griffel.net/filer/svu-rapport-2019-20.pdf> [2025-10-28]

Liu, H., Wang, H., Liu, S., Hu, C., Ding, Y. & Zhang, J. (2015). Lattice Boltzmann method for the Saint–Venant equations. *Journal of Hydrology*, 524, 411–416.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.002>

Liu, J., Yan, H., Liao, Z., Zhang, K., Schmidt, A.R. & Tao, T. (2019). Laboratory analysis on the surface runoff pollution reduction performance of permeable pavements. *Science of The Total Environment*, 691, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.028>

Liu, W., Chen, W. & Peng, C. (2014). Assessing the effectiveness of green infrastructures on urban flooding reduction: A community scale study. *Ecological Modelling*, 291, 6–14.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.07.012>

Lu, L., Johnson, M., Zhu, F., Xu, Y., Ruan, T. & Chan, F.K.S. (2024). Harnessing the runoff reduction potential of urban bioswales as an adaptation response to climate change. *Scientific Reports*, 14 (1), 12207. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61878-7>

Mishra, S.K. & Singh, V.P. (2003). SCS-CN Method. I: Mishra, S.K. & Singh, V.P. (red.) *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*. Springer Netherlands. 84–146. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0147-1_2

Moazzem, S., Bhuiyan, M., Muthukumaran, S., Fagan, J. & Jegatheesan, V. (2024). A Critical Review of Nature-Based Systems (NbS) to Treat Stormwater in Response to Climate Change and Urbanization. *Current Pollution Reports*, 10 (2), 286–311.
<https://doi.org/10.1007/s40726-024-00297-8>

Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) (2017). *Vägledning för skyfallskartering: tips för genomförande och exempel på användning*. (MSB1121). Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB).

Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) (2023). *Metod för skyfallskartering av tätorter*. (MSB2260). Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB).
<https://rib.msb.se/filer/pdf/30510.pdf> [2025-09-09]

Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) & Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI) (2020). *Säkert och osäkert i klimatscenerierna*. (MSB1677).
<https://rib.msb.se/filer/pdf/29466.pdf> [2026-01-16]

Naturvårdsverket (2017). *Ekosystemtjänstförteckning med inventering av dataunderlag: för kartläggning av ekosystemtjänster och grön infrastruktur*. (6797). Naturvårdsverket.
<https://www.naturvardsverket.se/4ac34d/globalassets/media/publikationer-pdf/6700/978-91-620-6797-7.pdf> [2025-11-21]

Naturvårdsverket (2021). *Naturbaserade lösningar: ett verktyg för klimatanpassning och andra samhällsutmaningar*. (7016). Naturvårdsverket.
<https://www.naturvardsverket.se/4ac248/globalassets/media/publikationer-pdf/7000/978-91-620-7016-2.pdf> [2025-10-06]

Ohlsson, J. & Josefsson, W. (2015). *Skyfallsuppdraget: ett regeringsuppdrag till SMHI*. (KLIMATOLOGI, 37). Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI).
https://www.smhi.se/download/18.18f5a56618fc9f08e832bb32/1717803162832/Klimatologi_37%20Skyfallsuppdraget%20ett%20regeringsuppdrag%20till%20SMHI.pdf [2025-09-19]

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 framtidsscenarioer*. (KLIMATOLOGI, 47). Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI).
https://www.smhi.se/download/18.18f5a56618fc9f08e8329c85/1717801000450/Klimatologi_47%20Extremregn%20i%20nuvarande%20och%20framtida%20klimat%20Analyser%20av%20observationer%20och%20framtidsscenarioer.pdf [2025-09-11]

Olsson, J., Dyrddal, A.V., Médus, E., Södling, J., Aņiskeviča, S., Arnbjerg-Nielsen, K., Førland, E., Mačiulytė, V., Mäkelä, A., Post, P., Thorndahl, S.L. & Wern, L. (2022). Sub-daily rainfall extremes in the Nordic–Baltic region. *Hydrology Research*, 53 (6), 807–824.
<https://doi.org/10.2166/nh.2022.119>

Olsson, J., Södling, J., Berg, P., Wern, L. & Eronn, A. (2019). Short-duration rainfall extremes in Sweden: a regional analysis. *Hydrology Research*, 50 (3), 945–960.
<https://doi.org/10.2166/nh.2019.073>

Orta-Ortiz, M.S. & Geneletti, D. (2022). What variables matter when designing nature-based solutions for stormwater management? A review of impacts on ecosystem services.

Environmental Impact Assessment Review, 95, 106802.

<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106802>

Pachaly, R.L., Biessan, D.G.V.V., Vasconcelos, J.G., O'Donnell, F.C. & Bowers, B.F. (2023). Continuous Hydrologic Modeling of a Parking Lot and Related Best Management Practices with PCSWMM. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 177 (1), 72–82. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2022.3382.x>

Pachauri, R.K. & Mayer, L. (red.) (2015). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf [2025-10-30]

Petsinaris, F., Baroni, L. & Georgi, B. (2020). Compendium of Nature-based and 'grey' solutions to address climate- and water-related problems in European cities. *Grow Green*, <https://growgreenproject.eu/wp-content/uploads/2020/04/Compendium-of-NBS-and-grey-solutions.pdf> [2025-11-25]

Popescu, I. (2014). Modelling water related problems. I: *Computational Hydraulics*. IWA Publishing. 24.

Prudencio, L. & Null, S.E. (2018). Stormwater management and ecosystem services: a review. *Environmental Research Letters*, 13 (3), 033002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa81a>

Rehn, L. & Berglund, A. (2023). *Hydrologisk utredning Myran, Enköping. (2023-1897-A)*. Water Revival System (WRS).

Saniei, K., Yazdi, J. & MajdzadehTabatabaei, M.R. (2021). Optimal size, type and location of low impact developments (LIDs) for urban stormwater control. *Urban Water Journal*, 18 (8), 585–597. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2021.1918181>

SCALGO (2024). *White Paper: The Rainfall-Runoff Modell in the Flash Flood Map in SCALGO Live Sweden*. <https://scalgo.com/uploads/documentation/Whitepaper-RRM-SE.pdf> [2025-11-03]

SCALGO Live (u.å.). *SCALGO Live*. scalgo.com/live [2025-09-15]

Seneviratne, S.I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Alejandro Di Lu, Subimal Gho, Iskhaq Iskand, James Kossin, Sophie Lewis, Friederike Otto, Izidine Pinto, Masaki Satoh, Sergio M. Vicente-Serrano, Michael Wehner, & Botao Zhou (2023). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 1. uppl. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

Stockholm vatten och avfall (2025a). *Genomsläppling beläggning*. <https://www.stockholmvattenochavfall.se/globalassets/dagvatten/pdf/gb.pdf> [2025-12-09]

Stockholm vatten och avfall (2025b). *Överdämningsytor/torr dammar*. https://www.stockholmvattenochavfall.se/globalassets/dagvatten/pdf/overdamning_h.pdf [2025-12-17]

- Stockholms stad (2021). *Handlingsplan för klimatanpassning: 2022–2025*. https://start.stockholm/globalassets/start/om-stockholms-stad/politik-och-demokrati/styrdokument/handlingsplan-for-klimatanpassning-2022-2025_ta.pdf [2025-09-10]
- Sveriges geologiska undersökning (SGU) (2025). *Jordarter 1:25 00 - 1:100 000*
- Sveriges geologiska undersökning (SGU) (u.å.). *Produkt: Jordarter 1:25 00 - 1:100 000*. <https://resource.sgu.se/dokument/produkter/jordarter-25-100000-beskrivning.pdf> [2025-11-10]
- Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI) (u.å.a). *Extrem nederbörd. SMHI*. <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/nederbord/extrem-nederbord> [2025-09-19]
- Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI) (u.å.b). *Olika typer av översvämningar. SMHI*. <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/oversvamningar/olika-typer-av-oversvamningar-> [2025-09-09]
- Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI) (u.å.c). *Skyfall och rotblöta — SMHI*. <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/skyfall-och-hagel/skyfall-och-rotblota> [2025-09-23]
- Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI) (u.å.d). *Återkomsttider. SMHI*. <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/extremer/aterkomsttider> [2025-09-23]
- US Army Corps of Engineers, HEC (u.å.). *2D Flow Areas. HEC-RAS Mapper User's Manual*. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rnum/6.0/geometry-data/2d-flow-areas#id-.2DFlowAreasv6.0-Breaklines> [2026-01-29]
- VA-guiden (u.å.). *Genomsläppliga beläggningar. VA-guiden*. <https://vaguiden.se/dagvatten/anlaggningswiki/genomslapplig-belaggning/>
- Wallin Nilsson, F. (2024). *Bilar och husfasader under vatten: "Jag blev helt chockerad"*. *SVT Nyheter*. <https://www.svt.se/nyheter/lokalt/upsala/mangder-av-oversvamningar-efter-regnet-bilar-star-under-vatten-i-enkoping> [2025-10-15]
- Wehner, M.F., Duffy, M.L., Risser, M., Paciorek, C.J., Stone, D.A. & Pall, P. (2024). On the uncertainty of long-period return values of extreme daily precipitation. *Frontiers in Climate*, 6. <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1343072>
- Yuan, D., He, J., Li, C., Guo, X., Xiong, Y. & Yan, C. (2019). Insights into the pollutant-removal performance and DOM characteristics of stormwater runoff during grassy-swales treatment. *Environmental Technology*, 40 (4), 441–450. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1395481>
- Zellner, M., Massey, D., Minor, E. & Gonzalez-Meler, M. (2016). Exploring the effects of green infrastructure placement on neighborhood-level flooding via spatially explicit simulations. *Computers, Environment and Urban Systems*, 59, 116–128. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.04.008>
- Zhou, J., Pang, Y., Du, W., Huang, T., Wang, H., Zhou, M. & Liu, J. (2024). Review of the development and research of permeable pavements. *Hydrological Processes*, 38 (6), e15179. <https://doi.org/10.1002/hyp.15179>

Zhou, Z., Smith, J.A., Baeck, M.L., Wright, D.B., Smith, B.K. & Liu, S. (2021). The impact of the spatiotemporal structure of rainfall on flood frequency over a small urban watershed: an approach coupling stochastic storm transposition and hydrologic modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25 (9), 4701–4717. <https://doi.org/10.5194/hess-25-4701-2021>

Åkerblom, H. (2023). *Ny marktäckekarta med ännu flera klasser*.

<https://scalgo.com/sv/blogg/ny-marktackekarta-med-annu-flera-klasser> [2025-11-17]

BILAGA A: TIDSTEG

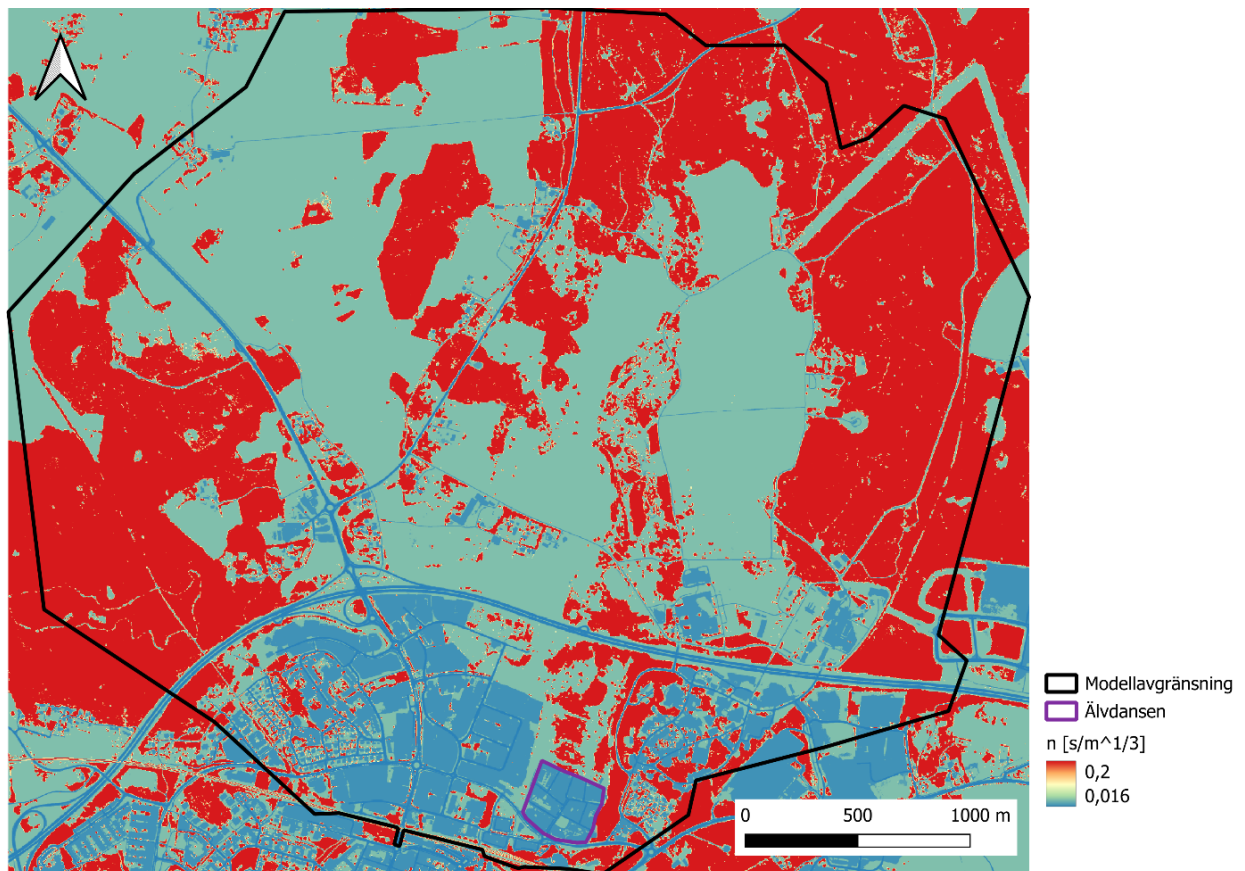
I skyfallsmodellen användes varierande tidssteg, vilka beskrivs i Tabell A 1 .

Tabell A 1: Använda tidssteg i skyfallsmodellen i HEC-RAS.

Simuleringstid	Tidssteg [s]
00:00-01:00	10,00
01:00-02:00	6,00
02:00-02:45	2,50
02:45-03:30	4,00
03:30-05:15	6,00
05:15-07:40	5,00
07:40-09:45	4,00
09:45-12:00	5,00

BILAGA B: RÅHET

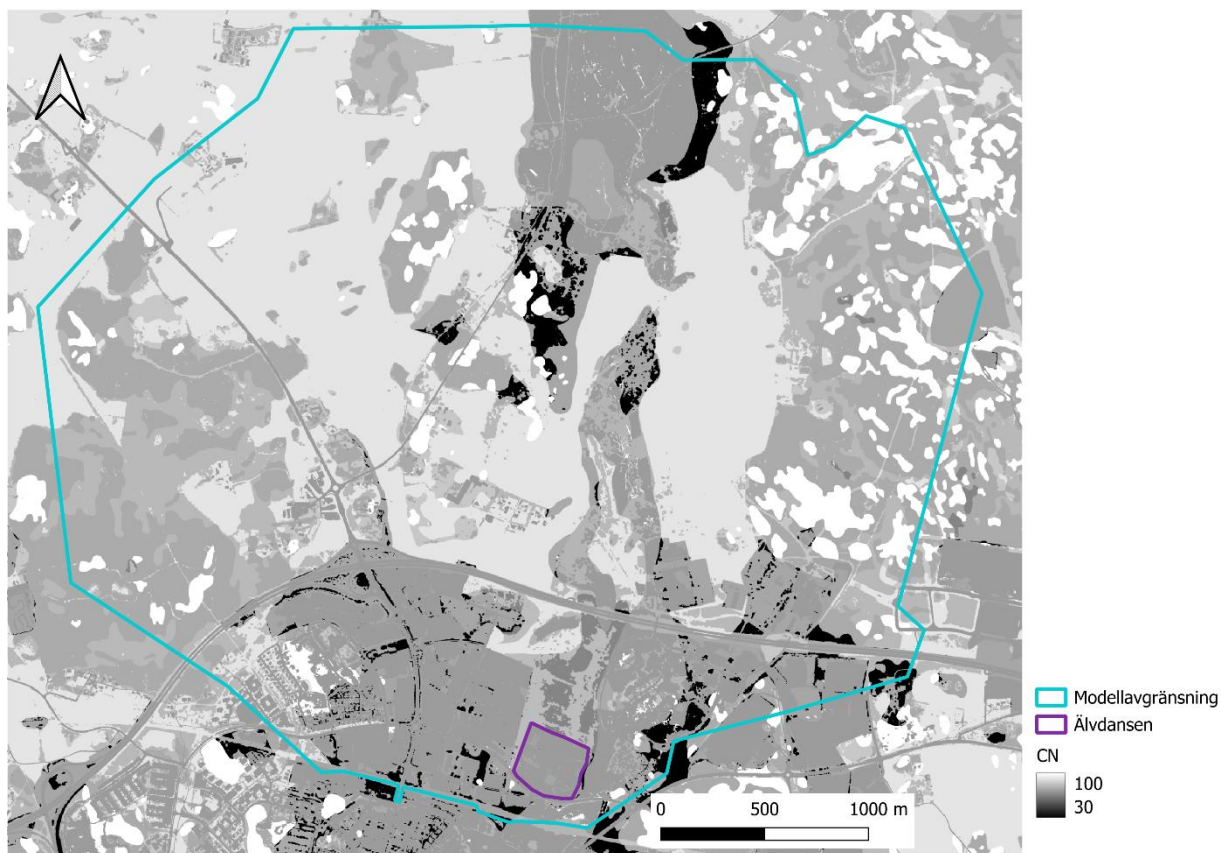
I skyfallsmodellen används Mannings skrovlighetskoefficient (n) för att beskriva markens råhet (Figur B 1).



Figur B 1: Råhet (n) i modellområdet.

BILAGA C: INFILTRATIONSPARAMETERAR

I modellen används SCS-CN-metoden för att beskriva infiltrationen (Figur C 1). I Tabell C 1 beskrivs alla på infiltrationsparametrarna som användes i modellen.



Figur C 1: CN-värden i modellen.

Tabell C 1: Angivna värden på infiltrationsparametrarna i modell.

Markanvändning	Jordart	CN	λ	Minsta infiltrationshastighet [mm/h]
NoData		100	0	0
NoData	Postglacial lera	100	0	0
NoData	Glacial lera	100	0	0
NoData	Sandig moran	100	0	1.3
NoData	Urberg	100	0	0
NoData	Fyllning	100	0	0
NoData	Karrtorv	100	0	0
NoData	Postglacial sand	100	0	7.6
NoData	Postglacial finsand	100	0	3.8
NoData	Gyttjelera	100	0	0
NoData	Isalvssediment	100	0	7.6
NoData	Moran	100	0	1.3
NoData	Isalvssediment, sand	100	0	7.6
NoData	Vatten	100	0	0
Bar jord	NoData	100	0	0
Bar jord	Postglacial lera	93	0.2	0

Bar jord	Glacial lera	93	2	0
Bar jord	Sandig moran	85	0.2	1.3
Bar jord	Urberg	100	0	0
Bar jord	Fyllning	76	0.2	0
Bar jord	Karrtorv	82	0.3	0
Bar jord	Postglacial sand	77	0.3	7.6
Bar jord	Postglacial finsand	76	0.2	3.8
Bar jord	Gyttjelera	82	0.3	0
Bar jord	Isalvssediment	80	0.2	7.6
Bar jord	Moran	85	0.2	1.3
Bar jord	Isalvssediment, sand	85	0.2	7.6
Bar jord	Vatten	100	0	0
Tät vegetation	NoData	100	0	0
Tät vegetation	Postglacial lera	81	0.2	0
Tät vegetation	Glacial lera	81	0.2	0
Tät vegetation	Sandig moran	77	0.3	1.3
Tät vegetation	Urberg	100	0	0
Tät vegetation	Fyllning	30	0.2	0
Tät vegetation	Karrtorv	67	0.3	0
Tät vegetation	Postglacial sand	30	0.2	7.6
Tät vegetation	Postglacial finsand	30	0.2	3.8
Tät vegetation	Gyttjelera	67	0.3	0
Tät vegetation	Isalvssediment	73	0.3	7.6
Tät vegetation	Moran	77	0.3	1.3
Tät vegetation	Isalvssediment, sand	73	0.3	7.6
Tät vegetation	Vatten	100	0	0
Låg vegetation	NoData	100	0	0
Låg vegetation	Postglacial lera	93	0.2	0
Låg vegetation	Glacial lera	93	2	0
Låg vegetation	Sandig moran	85	0.2	1.3
Låg vegetation	Urberg	100	0	0
Låg vegetation	Fyllning	76	0.2	0
Låg vegetation	Karrtorv	82	0.3	0
Låg vegetation	Postglacial sand	77	0.3	7.6
Låg vegetation	Postglacial finsand	76	0.2	3.8
Låg vegetation	Gyttjelera	82	0.3	0
Låg vegetation	Isalvssediment	80	0.2	7.6
Låg vegetation	Moran	85	0.2	1.3
Låg vegetation	Isalvssediment, sand	85	0.2	7.6
Låg vegetation	Vatten	100	0	0
Berg i dagen	NoData	100	0	0
Berg i dagen	Postglacial lera	100	0	0
Berg i dagen	Glacial lera	100	0	0
Berg i dagen	Sandig moran	100	0	0
Berg i dagen	Urberg	100	0	0
Berg i dagen	Fyllning	100	0	0
Berg i dagen	Karrtorv	100	0	0
Berg i dagen	Postglacial sand	100	0	0

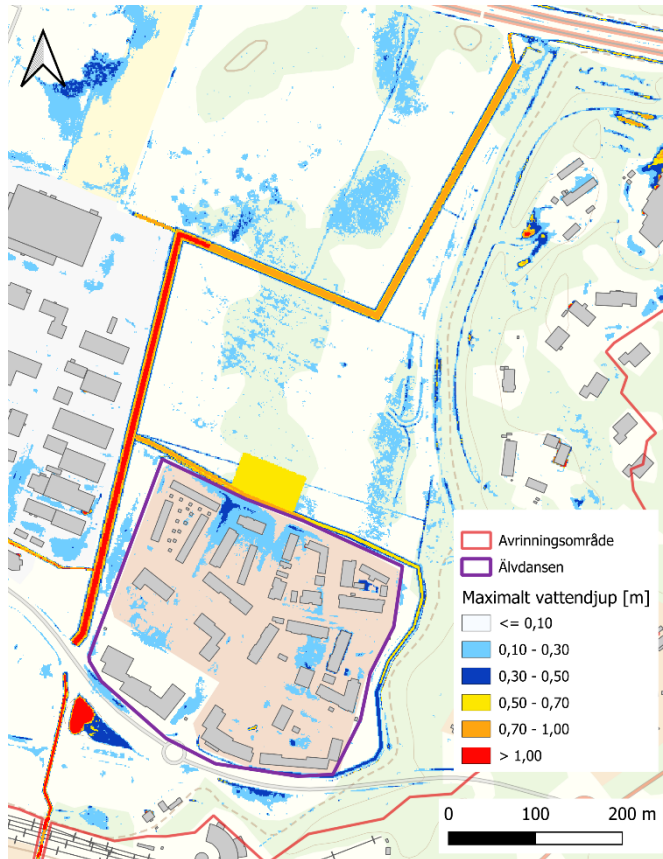
Berg i dagen	Postglacial finsand	100	0	0
Berg i dagen	Gyttjelera	100	0	0
Berg i dagen	Isalvssediment	100	0	0
Berg i dagen	Moran	100	0	0
Berg i dagen	Isalvssediment, sand	100	0	0
Berg i dagen	Vatten	100	0	0
Andra asfalterade ytor	NoData	73	0.1	0
Andra asfalterade ytor	Postglacial lera	73	0.1	0
Andra asfalterade ytor	Glacial lera	73	0.1	0
Andra asfalterade ytor	Sandig moran	73	0.1	0
Andra asfalterade ytor	Urberg	73	0.1	0
Andra asfalterade ytor	Fyllning	73	0.1	0
Andra asfalterade ytor	Karrtorv	73	0.1	0
Andra asfalterade ytor	Postglacial sand	73	0.1	0
Andra asfalterade ytor	Postglacial finsand	73	0.1	0
Andra asfalterade ytor	Gyttjelera	73	0.1	0
Andra asfalterade ytor	Isalvssediment	73	0.1	0
Andra asfalterade ytor	Moran	73	0.1	0
Andra asfalterade ytor	Isalvssediment, sand	73	0.1	0
Andra asfalterade ytor	Vatten	73	0.1	0
Grusväg	NoData	100	0	0
Grusväg	Postglacial lera	93	0.2	0
Grusväg	Glacial lera	93	2	0
Grusväg	Sandig moran	85	0.2	0
Grusväg	Urberg	100	0	0
Grusväg	Fyllning	76	0.2	0
Grusväg	Karrtorv	82	0.3	0
Grusväg	Postglacial sand	77	0.3	0
Grusväg	Postglacial finsand	76	0.2	0
Grusväg	Gyttjelera	82	0.3	0
Grusväg	Isalvssediment	80	0.2	0
Grusväg	Moran	85	0.2	0
Grusväg	Isalvssediment, sand	85	0.2	0
Grusväg	Vatten	100	0	0
Byggnad	NoData	73	0.1	0
Byggnad	Postglacial lera	73	0.1	0
Byggnad	Glacial lera	73	0.1	0
Byggnad	Sandig moran	73	0.1	0
Byggnad	Urberg	73	0.1	0
Byggnad	Fyllning	73	0.1	0
Byggnad	Karrtorv	73	0.1	0
Byggnad	Postglacial sand	73	0.1	0
Byggnad	Postglacial finsand	73	0.1	0
Byggnad	Gyttjelera	73	0.1	0
Byggnad	Isalvssediment	73	0.1	0
Byggnad	Moran	73	0.1	0
Byggnad	Isalvssediment, sand	73	0.1	0
Byggnad	Vatten	73	0.1	0

Fält	NoData	100	0	0
Fält	Postglacial lera	93	0.2	0
Fält	Glacial lera	93	2	0
Fält	Sandig moran	85	0.2	1.3
Fält	Urberg	100	0	0
Fält	Fyllning	76	0.2	0
Fält	Karrtorv	82	0.3	0
Fält	Postglacial sand	77	0.3	7.6
Fält	Postglacial finsand	76	0.2	3.8
Fält	Gyttjelera	82	0.3	0
Fält	Isalvssediment	80	0.2	7.6
Fält	Moran	85	0.2	1.3
Fält	Isalvssediment, sand	85	0.2	7.6
Fält	Vatten	100	0	0
Asfalterad väg	NoData	73	0.1	0
Asfalterad väg	Postglacial lera	73	0.1	0
Asfalterad väg	Glacial lera	73	0.1	0
Asfalterad väg	Sandig moran	73	0.1	0
Asfalterad väg	Urberg	73	0.1	0
Asfalterad väg	Fyllning	73	0.1	0
Asfalterad väg	Karrtorv	73	0.1	0
Asfalterad väg	Postglacial sand	73	0.1	0
Asfalterad väg	Postglacial finsand	73	0.1	0
Asfalterad väg	Gyttjelera	73	0.1	0
Asfalterad väg	Isalvssediment	73	0.1	0
Asfalterad väg	Moran	73	0.1	0
Asfalterad väg	Isalvssediment, sand	73	0.1	0
Asfalterad väg	Vatten	73	0.1	0
Vatten	NoData	100	0	0
Vatten	Postglacial lera	100	0	0
Vatten	Glacial lera	100	0	0
Vatten	Sandig moran	100	0	0
Vatten	Urberg	100	0	0
Vatten	Fyllning	100	0	0
Vatten	Karrtorv	100	0	0
Vatten	Postglacial sand	100	0	0
Vatten	Postglacial finsand	100	0	0
Vatten	Gyttjelera	100	0	0
Vatten	Isalvssediment	100	0	0
Vatten	Moran	100	0	0
Vatten	Isalvssediment, sand	100	0	0
Vatten	Vatten	100	0	0
Järnväg	NoData	100	0	0
Järnväg	Postglacial lera	93	0.2	0
Järnväg	Glacial lera	93	2	0
Järnväg	Sandig moran	85	0.2	1.3
Järnväg	Urberg	100	0	0
Järnväg	Fyllning	76	0.2	0

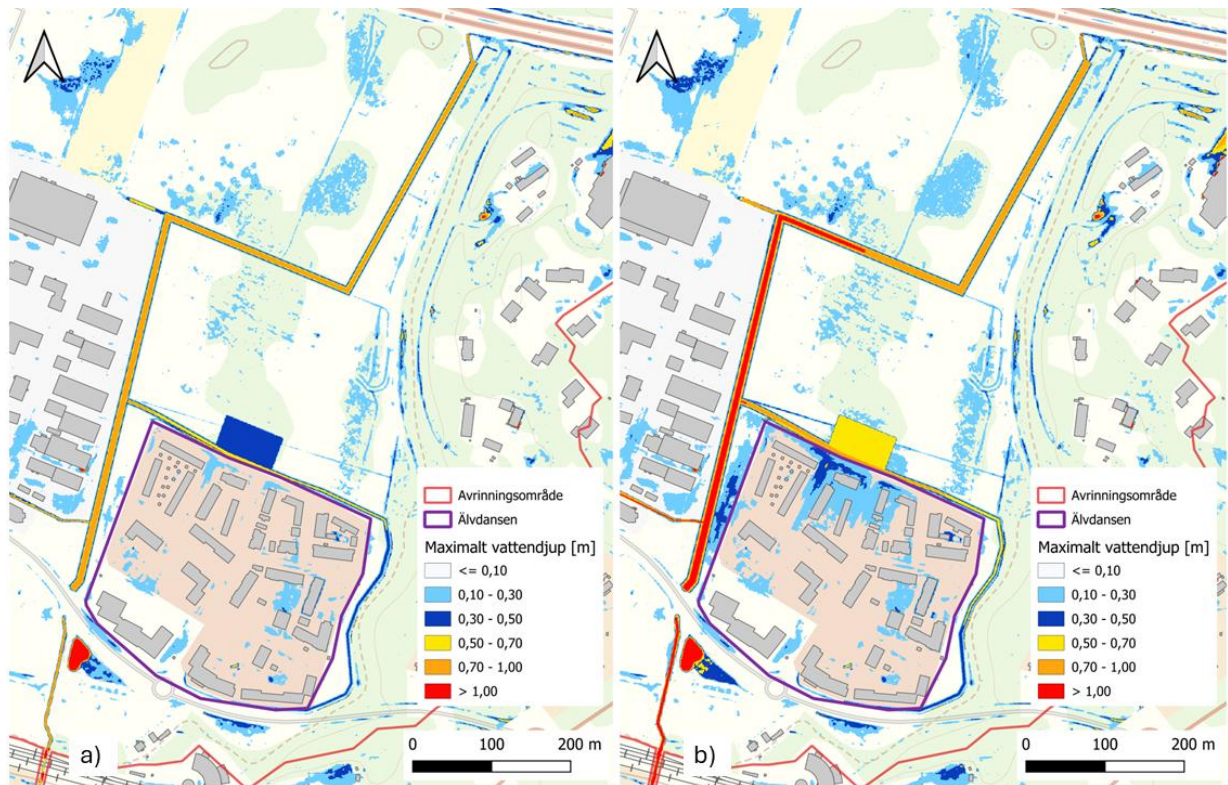
Järnväg	Karrtorv	82	0.3	0
Järnväg	Postglacial sand	77	0.3	7.6
Järnväg	Postglacial finsand	76	0.2	3.8
Järnväg	Gyttjelera	82	0.3	0
Järnväg	Isalvssediment	80	0.2	7.6
Järnväg	Moran	85	0.2	1.3
Järnväg	Isalvssediment, sand	85	0.2	7.6
Järnväg	Vatten	100	0	0

BILAGA D: ÖVERSVÄMNINGSUBTBREDNING VID S1, S2 OCH DP2_2

Modelleringen visade att översvänningsutbredningen i Älvdansen till blev mindre när den kombinerade åtgärden, S1, S2 och DP2_2, var anlagd (Figur D 1) jämfört med när nuläget då ingen åtgärd är anlagd (Figur 20). Det finns dock flera osäkerheter i modellen som påverkar översvänningsutbredningen. Översvänningsutbredningen blev 40 % mindre när klimatfaktorn ändrades från 1,4 till 1,2 i samband med känslighetsanalysen (Figur D 2a) och 40 % större när utflödet ur modellen minskades från 0,8 m³/s till 0,5 m³/s (Figur D 2b).



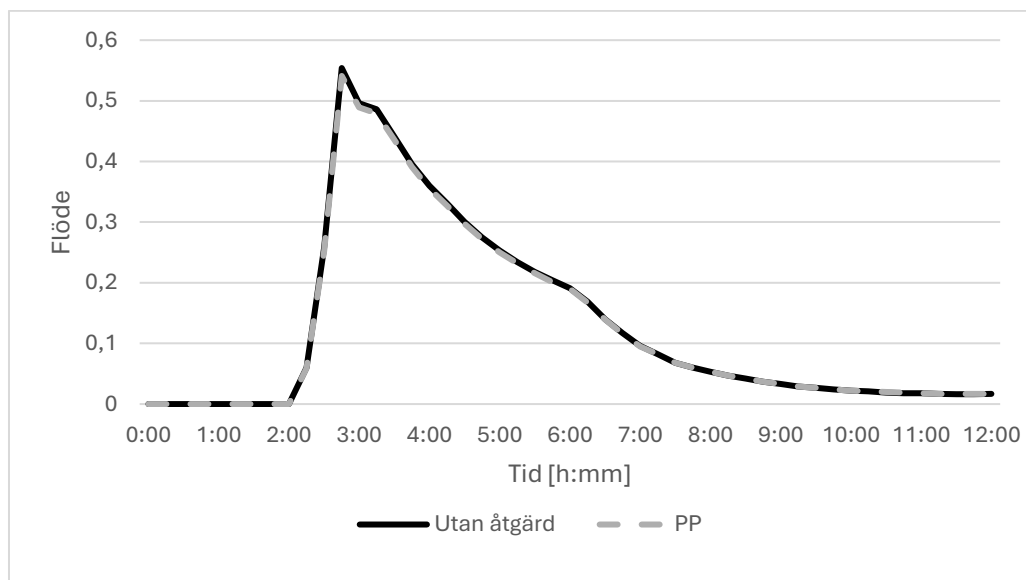
Figur D 1: Maximalt vattendjup till följd av det simulerade 100-årsregnet i Älvdansen och dess närhet, när den kombinerade åtgärden S1, S2 och DP2_2 är anlagd. Bakgrundskarta skapad utifrån Topografi 10 Nedladdning, vektor © Lantmäteriet (2025).



Figur D 2: Maximalt vattendjup till följd av det simulerade 100-årsregnet i Älvdansen och dess närhet, när den kombinerade åtgärden S1+S2+DP2_2 är anlagd. I a) är klimatfaktorn ändrad till $k = 1,2$ från huvudmodellens $k = 1,4$ och i b) är det maximala utflödet ändrat till $Q_u = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ från huvudmodellens $Q_u = 0,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Bakgrundskarta skapad utifrån Topografi 10 Nedladdning, vektor © Lantmäteriet (2025).

BILAGA E: FLÖDET I MELLERSTA DIKET VID PP

Modelleringen visade att den genomsläppliga beläggningen (PP) hade en mycket liten påverkan på flödet i Mellersta diket (Figur E 1).



Figur E 1: Jämförelse av flödet i Mellersta diket när ingen åtgärd anlagt (Utan åtgärd) och när den genomsläppliga beläggningen anlagts (PP).