

Resurseffektivare användning av dagvattenmodeller

VATTENFÖRSÖRJNINGS- OCH AVLOPPSTEKNIK
INSTITUTIONEN FÖR PROCESSTEKNIK OCH TILLÄMPAD BIOVETENSKAP | LUNDS UNIVERSITET
VIGGO PIHL | EXAMENSARBETE 2024



Resurseffektivare användning av dagvattenmodeller

av

Viggo Pihl

Examensarbete nr: 2024-08

Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik
Avdelningen för kemiteknik
Lunds universitet

Juni 2024

Handledare: **Salar Haghghatafshar**

Biträdande handledare: **Sara Roth**

Biträdande handledare: **Sofia Dahl**

Examinator: **Karin Jönsson**

Bild på framsidan: Viggo Pihl

Postadress

Box 124
221 00 Lund

Hemsida

www.ple.lth.se

Besöksadress

Naturvetarvägen 14

Telefon

046-222 82 85
046-222 00 00

Förord

Det här examensarbetet hade inte varit möjligt utan min handledare Salar's obotliga entusiasm. Jag vill tacka både Sara och Salar ytterligare för både stöd och hur bra ni agerat bollplank för mina funderingar och hundratals frågor. Jag vill även tacka NSVA och Sofia för all tid, vägledning och resurser. Utöver det vill jag tacka min examinator Karin Jönsson för vägledning under hela våren. Ett stort tack går ut till Andreas Persson och Sam Sarwat som var till enorm hjälp med sin mjukvara Pluvioflow. Vidare vill jag belysa Pihl Utvecklings AB för sitt stora engagemang i att fostra ingenjörer. Avslutningsvis vill jag tacka min kära flickvän, Amanda för allt ovillkorligt stöd och kärlek.

Nomenklatur

DEM: Digital höjdmodell

1D: Endimensionell

2D: Tvådimensionell

GIS: Geografiska informationssystem

Populärvetenskaplig sammanfattning

I takt med ökade nederbörds mängder och urbanisering ökar sannolikheten och därmed riskerna kopplade till översvämningar på grund av skyfall. Det finns ett stort behov att kartlägga riskerna kopplade till det. Det här examensarbetet har funnit användningsområden för enklare 1D modeller för översvämning utredning. Det möjliggör kartläggningar av de lokala och intensiva flödena som uppstår när dagvattensystemet är överbelastat på ett mer resurseffektivt sätt. Ledningsnätssystemet är en viktig faktor i dagvattenhantering och dess effekt är viktigt att beakta vid översvämning utredningar. Samtidigt går det snabbt att modellera flödet i en dimension och därför är det av stor betydelse att hitta användningsområden för de här modellerna.

För att skydda våra städer från riskerna kopplade till översvämningar behöver problemområden kartläggas. Att simulera nederbördsscenarier är idag ofta både dyrt och tidskrävande. Det finns därför ett behov av att hitta tillvägagångssätt som tillåter billigare och snabbare sätt att utreda ett regns effekter på urbana områden.

Genom att belasta 2D modeller med endast den vattenvolymen som trycks upp ur dagvattensystemet vid skyfall blir beräkningstiden kortare. Samtidigt får man en god bild av hur ledningsnätet snabbt transporterar vattenmassor i en tätort. Det finns därför potential att vid mindre regn endast belasta den tvådimensionella ytmodellen lokalt i stället för att låta hela ytan ansträngas av krävande beräkningar.

När återkomsttiderna ser ut att minska på grund av klimatförändringar kommer översvämningarna oftare. Det leder till fler försäkringsärenden kopplade till skador på fastigheter. Att då billigare och snabbare kunna kartlägga riskzoner gör att problematiken kan byggas bort innan, i stället för skenande ökning av försäkringspremier. Även effekterna av exploatering kan undersökas i ett tidigt skede om modellerna är billiga, snabba och träffsäkra.

Sammanfattning

Ökad urbanisering och klimatförändringar har ökat risken för pluviala översvämningar i våra tätorter. Det finns idag många olika tillvägagångssätt att kartlägga vår exponering till översvämningsrisker.

Det här arbetet undersöker innovativa metoder att använda enklare översvämningsverktyg för att öka resurseffektiviteten. Studien adresserar användningen av upptryckningsvolym från endimensionella ledningsnätmodeller för att få fram en översvämningsvolym. Vidare undersöks om, och hur upptryckningsvolymerna effektivt kan visualiseras för att visa utbredningen och djupet av ledningsnätets översvämningar. Initialt kartlades hur 1D-modeller hanterar upptryckning i ledningssystemet, vilket tyder på att modellen förvarar volymen i en virtuell reservoar. Vidare undersöktes kritiska faktorer i uppbyggnaden av 1d-modeller, vilket tyder på vikten av att separera avrinningsområden och tilldela varje brunn ett eget avrinningsområde för att verklighetstroget belasta ledningsnätet vid ett regnscenario.

Upptryckningsvolymerna användes sedan för att jämföra skillnaden mellan att belasta en statisk modell med nederbörd över hela terrängen och ett spatialt varierat nederbördsscenario som representerade upptryckning. Det gav en liten effekt av hur ledningsnät ändrar de naturliga rinnvägarna i terrängen. De statistiska modellerna som användes var SCALGO Live och FastFlood.

Ytterligare försök gjordes i Pluvioflow där upptryckningen simulerades dynamiskt som ett konstant flöde ut ur varje brunn. Det visade sig att översvämningar orsakade av upptryckning sker lokalt och med potentiellt en högre intensitet jämfört med ren ytavrinning. Därför är det viktigt att vid en varierad terräng simulera de översvämningarna dynamiskt för att kunna kartlägga effekterna av vattenflödet.

Undersökningen visar att upptryckningsvolymerna går att appliceras med god effekt på en dynamisk 2D-modell för att både minska beräkningsmängden och samtidigt mer verklighetstroget beskriva översvämningsdynamiken.

Summary

Increased urbanization and climate change have increased the risk of pluvial flooding in our urban areas. Today, there are many different approaches to examine our exposure to these risks. This thesis examines innovative methods to use simpler flood modelling tools to increase resource efficiency. The study addresses the use of surcharge volumes from 1-dimensional network models to derive a flood volume. Furthermore, it investigates how these surcharge volumes can be effectively visualized to show the extent and depth of the network's flooding.

Initially, the handling of surcharge in pipe systems by 1D models was investigated, indicating that the model stores the volume in a virtual reservoir. Furthermore, critical factors in the construction of 1D models were examined, emphasizing the importance of separating drainage areas and assigning each well its own drainage area to realistically load the pipe network during a rain scenario.

The surcharge volumes were then used to compare the difference between running a steady-state model with rainfall over the entire terrain and a spatially varied rainfall scenario that represented surcharge amount and location. It was found to have some effect on how the pipe network alters the natural runoff paths in the terrain. The static models used were SCALGO Live and FastFlood.

Further attempts were made in Pluvioflow where the surcharge was simulated dynamically as a constant flow out of each well. It was found that flooding caused by surcharge occurs locally and potentially with a higher intensity compared to pure surface runoff. Therefore, it is important to simulate these floods dynamically in varied terrain to map the effects of the water flow.

The investigation shows that surcharge volumes can be effectively applied to a dynamic 2D model to both reduce the computational load and at the same time more realistically describe the flood dynamics.

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Syfte	9
1.2	Frågeställningar.....	9
1.3	Avgränsningar	10
2	Bakgrund.....	11
2.1	Pluviala översvämningar	11
2.2	Dagvatten dimensionering	11
2.3	Ökad nederbörd – Krav på resurseffektiva modeller	12
3	Litteratursammanställning	15
3.1	Skyfallskartering	15
3.2	Nuvarande metoder och arbetssätt	15
3.3	Mjukvaror.....	19
4	Material och metod	25
4.1	Underlag.....	26
4.2	Simulering MIKE+	27
4.3	Visualisering	29
5	Resultat och diskussion.....	33
5.1	Upptryckning	33
5.2	Resultat från MIKE+.....	36
5.3	Visualiseringsmetoder.....	37
5.4	Spatialt- och jämnt fördelad nederbörd i statiska modeller.	42
5.5	Användningsområde vid större nederbördsvolymer	44
5.6	Diskussion – val av modell	45
6	Framtida studier	49
7	Slutsatser	47
8	Referenser	50
9	Bilagor.....	53
9.1	Bilaga 1: Kod för att skapa spatialt regn-raster.....	53
9.2	Bilaga 2 – Utbredningskartor	55

1 Inledning

”Det krävs ett helt nytt sätt att tänka för att lösa de problem som vi skapat med det gamla sättet att tänka”- Albert Einstein

I en tid av klimatförändringar kommer det att ställas större krav på samhället i sin motståndskraftighet mot översvämningar. Det förväntas bli mer och intensivare regnfall (Frei, et al., 1998) och samtidigt växer de ekonomiska värdena i staden. Det medför att de ekonomiska riskerna vid översvämningar ökar. Vårt nuvarande system som innebär att dagvattenledningar leder bort nederbörd mottar allt oftare volymer som överstiger sina dimensionerade värden (Mailhot & Duchesne, 2010) vilket leder till att systemet översvämmas.

Urbanisering leder till en förändring av den naturliga hydrologiska cykeln i området. En ökning av andelen impermeabla ytor, jordpackning, minskar infiltrationen samtidigt som en minskad mängd vegetation och vattendrag leder till minskad avdunstning. Båda fenomenen resulterar i en ökad avrinning (Oke, et al., 2017). Parallellt med förändringar i hydrologin leder hårdgjorda ytor och minskad vegetation till att vattnet färdas snabbare. (Ashley, et al., 2007) Det ställer krav på samhället att leda bort eller fördröja vattenflöden för att inte skada infrastruktur. Vidare leder en ökad urbanisering till att värden i en stad ökar. Det innefattar både fastighetsvärden och produktion (Zhou, et al., 2011).

En ökning av stadens ekonomiska värden och ökningen av avrinningen leder till att både sannolikheten för översvämningar samt konsekvenserna av dem ökar. Klimatförändringar och den ökade andelen hårdgjorda ytorna ökar vår exponering och stadsutvecklingen leder till att sårbarheten är högre. Vidare har många källarytor byggts om till boningsyta från att tidigare fungera som enkla förråd vilket leder till att källaröversvämningar leder till större skada än tidigare (Svenskt Vatten, 2004). Därtill kommer potentiella skador på samhällsviktig infrastruktur som sjukhus och elnät som kan innebära störningar på lång sikt. Det blir tydligt att riskerna associerade med översvämningar ser ut att öka, något som leder till större krav på samhället att lindra effekterna.

Samhället står inför en rad utmaningar i arbetet kring riskreducering knutet till hanteringen av dagvatten. En ökning av översvämningar kopplat till stora regn, kallat pluviala översvämningar, tyder på att dagens dagvattenhantering inte räcker till (Kundzewicz & Pinskiwar, 2022). I takt med att en stads ekonomi växer ökar kostnaden av samhällets passivitet (Nicklin, et al., 2019).

I en genomgripande analys blir det uppenbart att riskerna vid översvämningar får konsekvenser som sträcker sig bortom endast materiella skador och begränsad framkomlighet. Förutom de direkta ekonomiska skadorna kan översvämningar ha stora följder för samhällets infrastruktur och påverka den ekonomiska stabiliteten både på lokal och nationell nivå. Det kan vidare undergräva förtroendet för myndigheter på lång sikt, enligt tabell 1. Vidare kan komplexiteten i ansvarsfördelningen kring frågorna rörande översvämningsskador leda till tvister i försäkringsärenden vilket fördröjer och försvårar återuppbyggnaden och skadehanteringen till följd av en översvämning. Det kan få långtgående effekter och innebära stora påfrestningar på de drabbade invånarna och samhällena. Därför behövs ett långsiktigt stöd från myndigheter och andra statliga aktörer. Den komplexa dynamik mellan kommun, försäkringsbolag, fastighetsägare och näringsidkare betonar behovet av en strategi som har ett helhetsperspektiv

angående riskhantering för att inte bara minska skador utan även underlätta återuppbyggnad och återhämtning från en översvämning.

Tabell 1: Skador vid översvämningar (MSB)

	Direkta skador	Indirekta skador
Materiella skador	Fastigheter Infrastruktur	Minskningar i produktion Störningar av transporter
Immateriella skador	Dödsfall Sjukdom	Stress Minskat förtroende för myndigheter

Dagens deterministiska syn på projektering kommer att leda till accelererande kostnader för dagvattensystem men för att öka resurseffektiviteten finns det ett behov av att införa en riskanalys vid dimensionering (Knutsson, 2023). Hela ledningsnätet behöver inte uppfylla lika höga krav. Det finns ett ekonomiskt incitament att områden som innefattar stora värden för samhället dimensioneras för högre återkomsttider än andra. På så sätt kan både över- och underdimensionering av ledningar minskas. I sin litteraturstudie om användandet av riskbaserad dimensionering belyser Knutson (2023) följande brister i dagens projekteringsarbete:

- Åldrade IDF-kurvor som är baserade på inte längre aktuell nederbördsdata.
- Lösningar är ofta platsbestämda och svåra att generalisera
- Extremväder behöver inte innebära större risker än normalkraftiga skyfallsscenario då de uppstår mer sällan.

Eftersom översvämningar till skillnad från andra risker likt bränder har en betingad sannolikhet är möjligheten att ersätta skador en mer komplex situation utan helt tydlig ansvarsfördelning. I befintlig bebyggelse har VA-huvudmannen ansvar för hantering av nederbörd med en återkomsttid på 10 år enligt P90 (Svenskt Vatten, 2004). Vid nyexploatering har VA-huvudmannen ansvar för 10 år i ledningen medan kravet i marknivå ligger mellan 20 och 30 års återkomsttider beroende på given områdesdefinition (Svenskt Vatten, 2016). De ansvarar även för att designkraven uppnås i 30 år efter installation (Karlsson, 2023). Efter det står fastighetsägaren för kostnader som uppstår vid stora vattenflöden. Denna risk flyttas ofta på ett försäkringsbolag. För att inte försäkringspremier ska vara ohållbart höga kan de inte anpassas för oändligt höga återkomsttider. Då försäkringar behandlar skydd från oförutsägbara händelser kan en debatt uppstå om översvämningar med en återkomsttid räknas som en förutsägbar risk. Vid ett 100-års regn faller ansvaret på kommunen (Karlsson, 2023). Det finns därför ett problem vid ansvarstagande mellan 10 och 100 år eftersom medvetenheten och ansvarssituationen ofta är låg hos fastighetsägare (Skarsgård & Norlin, 2022).

I sin studie visar Skarsgård och Norlin (2022) att intressenterna i översvämningshantering inte är överens om ansvarsfördelningen. De uppger att kommuner anser att deras

klimatanpassningsarbete begränsas av att man inte har ett juridiskt ansvar för majoriteten av bebyggelsen. Samtidigt anser de att privata och kommersiella fastighetsägare är omedvetna om att de bär ansvar för att skydda sin egendom, i tron att kommunen är skyldig att skydda dem. Sveriges kommuner och regioner (SKR) upplever sig begränsade i sin roll då planmonopolet ligger hos kommunen enligt PBL (Skarsgård & Norlin, 2022).

I en utredning utfärdad av regeringen ansåg man att kommuner måste skaffa sig metoder som kan ge en förståelse av belastningen som uppstår på allmänna VA-anläggningar vid skyfall genom skyfallskartering (Skarsgård & Norlin, 2022). Samtidigt visar branschorganisationen Svenskt Vattens undersökningar att 30 % av tillfrågade kommuner inte kartlagt eller analyserat områden med stor översvämningsrisk (Karlsson, 2023). Det tyder på att det finns ett stort behov av att resurseffektivisera analysen av utsatta områden då en djupgående skyfallskartering kan medföra stora kostnader för kommuner. Mindre kommuner saknar ofta egna avdelningar för att utföra egna undersökningar utan måste förlita sig på dyra konsultarvodet. Där kan innovativa användning av de enklare och billigare modellerna spela en roll för att utöka implementeringen av detta arbetssätt.

1.1 Syfte

Med ökade krav på översvämningsmodellernas upplösning växer även behovet av effektivisering. Detta medför en drivkraft till vidare utveckling om smartare applikationer av de enklare modellerna. Genom en påhittigare användning av dessa mer grundläggande modeller kan likvärdiga resultat nås, vilket i sin tur leder till en förbättrad resurseffektivitet med minskad samhällsekonomisk kostnad som följd.

Denna strategi är särskilt relevant med tanke på den pågående utvecklingen av ökande extremväder. Genom att finna sätt att effektivisera utnyttjandet av enklare modeller kan vi uppnå de ökande kraven på noggrannhet och samtidigt öka resurseffektiviteten. Därigenom kan vi skapa ett billigare tillvägagångssätt för att beräkna de utmaningar som klimatförändringarna innebär.

För att skapa ett billigare och mer resurseffektivt tillvägagångssätt är syftet med detta arbete att undersöka hur väl en enklare 1-dimensionell hydrodynamisk modell representerar resultaten av en mer resurskrävande och komplex 2-dimensionell hydrodynamisk modell. Syftet kommer att uppfyllas med följande frågeställningar.

1.2 Frågeställningar

Vad är viktiga faktorer i 1-dimensionella modeller när upptryckning ska simuleras?

Vilka tillvägagångssätt finns det för att visualisera utbredningen av vattenvolymer från upptryckning från en 1-dimensionell modell? Med visualisering menas att översvämnings utbredning kan visas på en karta.

Hur påverkar en spatialt varierad nederbörd en statisk ytmodell?

Hur hög noggrannhet kan man uppnå med den 1-dimensionella modellen jämfört med den 2-dimensionella vid större nederbörds mängder?

1.3 Avgränsningar

Det här arbetet kommer att fokusera på att utveckla användandet av 1D-modeller som hanterar ledningsnätet. Resultatet av dessa kommer sedan att jämföras med nuvarande modeller som hanterar både yta och ledningsnät. Modelleringsarbetet begränsas till att hitta användningsområden där de enklare modelleringsverktygen kan uppnå resultat likvärdiga dem från kopplade modeller. Målet är en effektivare användning av befintliga verktyg inte att utvärdera dagvattensystemet i sin helhet eller att föreslå klimatanpassade åtgärder till översvämningsrisken.

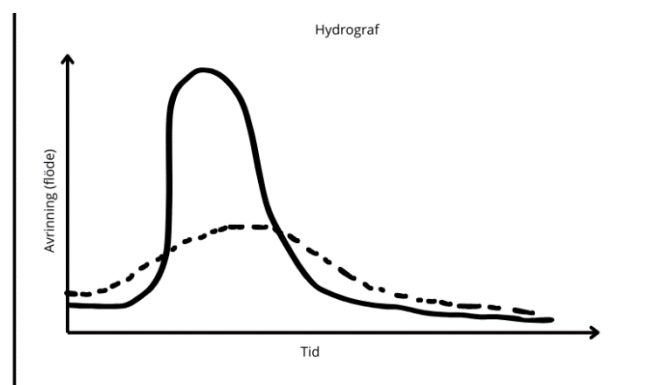
2 Bakgrund

2.1 Pluviala översvämningar

Pluviala är ett begrepp som behandlar de översvämningar som uppstår på grund av snabb och intensiv nederbörd på en urban yta med begränsad infiltrations- och fördröjningskapacitet. I rapporten *Pluvial (rain-related) flooding in urban areas: the invisible hazard* beskrivs pluviala översvämningar på följande sätt:

The most common source of flooding is when water levels in rivers rise and overtop their banks ('fluvial' flooding). Another familiar source of flooding along coasts results from a combination of high tides and stormy conditions. Less well known and understood are 'pluvial' (rain-related) floods. These floods occur after short, intense downpours which cannot be quickly enough evacuated by the drainage system or infiltrated to the ground. Pluvial floods often occur with little warning in areas not prone to flooding – hence the 'invisible hazard' tag. (Houston, et al., 2011, p. 6)

En pluvial översvämning betonar att det beror på en plötslig händelse och att ledningssystemet saknar kapacitet för att hantera volymen. Det är också kopplat till en urban miljö med hög koncentration av både människor och värden (DHI, 2013). Vid en fluvial översvämning saknar ofta floder möjligheten att sträcka ut sig lateralt då svämplan blivit exploaterade och strömfåran blivit rakare. I en stad uppstår samma problematik fast på mindre skala. Gator och ledningar i staden fungerar som strömfåror och översvämmas dem skadas den urbana miljö som uppförts i närheten av de artificiella vattendragen. Därför finns behov att kunna fördröja vatten för att minska toppar i flödet samt att planera ny bebyggelse i området utanför lågpunkter i staden. Figur 1 visar hur urbanisering påverkar avrinningen med högre magnitud under en kortare tid.



Figur 1: Skillnad i hydrograf mellan urban (heldragen) och naturliga miljöer (streckad).

2.2 Dagvatten dimensionering

I dagsläget hanteras dimensioneringskrav på dagvattensystemet i Plan och Bygglagen (PBL). I Svenskt Vattens publikation P110 uttrycks det att dagvatten ska hanteras med säkra höjdsättning av fastigheter, fördröjning av regnvolymer som ett komplement till de slutna rörsystemen (Svenskt Vatten, 2016). Detta görs för att minska flödestoppar som kan leda till översvämningar. Det ses inte som ekonomiskt försvarbart att enbart hantera skyfall med

rörsystem utan det uppmanas till ett helhetstänk. Exempelvis kan vattenflöde fördröjas med grönytor, och nedsänkta ytor som gator och idrottsplatser (Svenskt Vatten, 2016). Att enbart minska mängden impermeabla ytor räcker inte till då grönytor har en kraftig förminskning i infiltrationsförmåga under vinter och höst när vattenuptagningsförmågan hos växter är reducerad samtidigt som marken kan vara fryst eller vattenmättad. I de flesta delar av Sverige klarar markens infiltrationsförmåga att stå emot ett 10-års regn. Det tyder på att de inte är tillräckliga för att minska översvämningsrisken (DHI, 2013). I takt med en ökad utsatthet och sårbarhet för översvämningsrisker rekommenderar Svenskt Vatten att bebyggelse granskas med simuleringsverktyg (2016).

Majoriteten av våra städers avloppssystem är en blandning av separerade och kombinerade system. De är också dimensionerade för den dåvarande situationen. I Svenskt Vattens publikation P90, från 2004, har man ett mindre fokus på hållbar dagvattenhantering än idag (Svenskt Vatten, 2004). Det märks inte minst i användningen av begrepp, där den äldre skriften använder namnet allmänna avloppsledningar, där den nyare (Svenskt Vatten, 2016) byter terminologi till en med tydlig separation mellan dag- drän- och spillvatten.

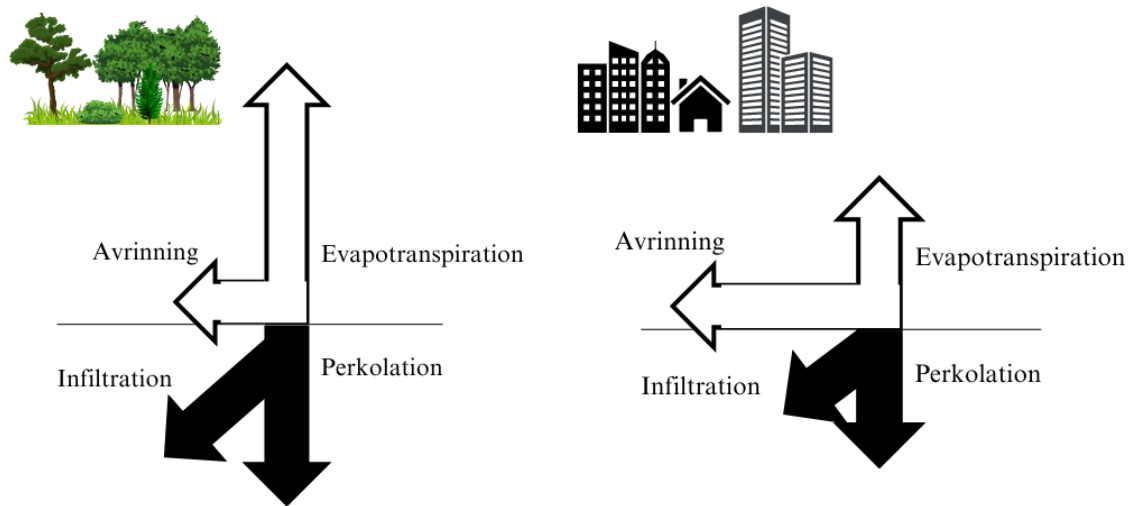
Genom blågröna lösningar kan man minska mängden vatten som belastar dagvattennätet. De kan vara kombinationer av grönytor s.k. regnträdgårdar, fördröjningsmagasin och öppna diken för att mildra de stora toppar i flödet som uppstår när skyfall faller på hårdgjorda ytor. Trots att ytan för öppna dagvattenlösningar är begränsad kan stora volymer fördröjas om en variation av metoder kombineras. Dessa gröna lösningar ger en rad andra positiva effekter som minskad utsatthet vid värmeböljor genom skugga och ökad avdunstning samt erbjuda rekreation för invånare (Mottaghi, et al., 2020). Samtidigt tillåter den ökande växtligheten att den biologiska mångfalden ökar. Ett bra exempel på det är ekostaden Augustenborg som undvek mycket av skadorna som drabbade andra områden i Malmö vid skyfallet 2014 (Haghighatafshar, et al., 2017). Många av dessa lösningar erbjuder relativt små fördröjningskapaciteter i sin ensamhet men kombinerade kan de ge betydelsefulla effekter, exempelvis genom avlastning av ett äldre och underdimensionerat ledningsnät.

2.3 Ökad nederbörd – Krav på resurseffektiva modeller

Det finns en osäkerhet kring exakt hur nederbörd kommer påverkas av klimatförändringar. Denna osäkerhet är större än osäkerheten kring global uppvärmning. (Larsen, et al., 2009). Vidare menar Larsen (2009) att ökningarna är störst i Skandinavien, där ett tidigare 20-års regn med en varaktighet på 1 timme kan komma att räknas som ett 4-års regn på grund av klimatförändringar. Samtidigt är många dagvattenledningar dimensionerade för lägre flöden. De långa livscyklerna på rör gör att klimatfaktorer måste tillämpas (Svenskt Vatten, 2016). Då ett rör förväntas vara i bruk mellan 50–100 år finns det en risk att rör som inte är dimensionerade för hela sin livslängd (Knutsson, 2023). Eftersom förändringstakten är låg krävs det nya lösningar som kompletterar. För att samtidigt anpassa dagvattenhanteringen för framtidens utmaningar behöver problemområden kartläggas.

Det finns även ett behov av att i samband med stora nederbördsmängder få en förståelse av vattnets magnitud och utbredning. På så sätt kan mildrande åtgärder göras snabbare. Då kan även tidiga varningar utfärdas vilket leder till att skadorna blir mindre. Vid pluviala översvämningsrisker är evakuering inte lika aktuellt som vid andra sorters översvämningsrisker men att tidigt kunna leda om trafik, sätta upp tillfälliga skydd och tillåta tid för förberedelse av andra förmildrande åtgärder. Eftersom vattenmassorna stannar längre än nederbörden kan en tidig prognos om effekterna och vilka sorts åtgärder som behöver tas för att minimera skadan. Vid den stora översvämningsrisken i Malmö 2014 pågick skyfallet i sex timmar men det tog fyra dagar

innan vattnet runnit och pumpats undan (Mobini, et al., 2021). Det visar att tidsåtgången vid simuleringar kan vara en viktig faktor i dess applikation.



Figur 2: Förändring av hydrologi på grund av hårdgjorda ytor och minskad vegetation i en urban miljö.

3 Litteratursammanställning

3.1 Skyfallskartering

I Sverige startade arbetet med skyfallskartering i Botkyrka kommun 2009 som en del av deras klimatstrategi (SMHI, 2019). Arbetet accelererades över landet efter att SMHI 2017 släppte en rapport som visade att både frekvens och intensiteten av nederbörd ser ut att öka (SMHI, 2019). I takt med att metoderna förbättrades och VA-företag kunde tillhandahålla underlag till modellerna gav karteringen bättre beslutsunderlag. En positiv erfarenhet som belyses vid kartering av översvämningrisker är enkelheten att kommunicera resultatet. Då skyfallslagret kan läggas på som ett lager över en karta genom GIS ges en tydlig visuell överblick av problemområdet. (SMHI, 2019). Det som främst undersöks och beräknas vid en kartering är utbredningen och djupet på vatten. Det går även att använda för att förstå flödesvägar och -volymer. De vanligaste användningsområdena innefattar lågpunktskartering, markavrinning och ledningsnätsanalys samt hur marken och ledningar samverkar i den byggda miljön. (SMHI, 2019, Alfredsson & Bern, 2017)

För att förstå översvämningar behövs en tydlig förståelse för både hydrologi samt hydrauliska processer. Det ena behandlar nederbörden medan den senare ger oss en förståelse av hur flöden utvecklas då nederbörden nått marken. Pluviala översvämningar är en kombination av flöden i ledningar, på marken och i diken (Ashley, et al., 2007). Därför är det bra att modeller behandlar både avrinningen i landskapet samt rörsystemet. En vanlig metod är att använda en kopplad 2D-metod. Det ger en representativ beskrivning av systemet (Kourtis, et al., 2017).

Dessa modeller har utvecklats som svar på den ökade utsattheten. Modeller kan förutse både vattnets spridning och utsträckningen av översvämningen både statiskt och dynamiskt. Något som underlättar planeringen och utvecklingen för att mildra effekterna av problemet. Den kan även användas för att utvärdera dagens dagvattensystem och testa kapaciteten av nya lösningar. I pluviala översvämningar är vattendjupet det viktigaste faktorn att undersöka, men även hastighet och stigningshastighet kan orsaka stora skador. Den största konsekvensen vid pluviala är vattenskadorna på fastigheter. I en tätort sker mycket av vattentransporterna på vägar samtidigt som de stora tillgångarna är byggnader. Det medför risker om vattennivåerna stiger över kantstenen.

3.2 Nuvarande metoder och arbetsätt

I hantering av pluviala översvämningar används en rad olika arbetsätt. Val av modell beror ofta på hur djupgående analys som behövs.

Den mest grundläggande metoden för att förstå utsatta områden är en lågpunktskartering. Då används en digital höjdmodell (DEM). Analysen görs ofta i GIS där alla ytor antas var hårdgjorda utan att släppa igenom vatten (DHI, 2013). Ingen hänsyn tas till hydrologin men det kan ge en överblick av vilka ytor där vatten kan bli stående efter skyfall. Den stora fördelen med en lågpunktskartering är att man kan få ett snabbt perspektiv över större områden (DHI, 2013). I en DEM behöver en se till att byggnader är tillagda. Det minskar volymen för att förvara vatten på ytan. I den nationella höjdmodellen som tillhandahålls digitalt från SCALGo är alla byggnader inkluderade.

Det finns en rad olika sätt att simulera avrinning för vatten. Den tydligaste uppdelningen är om modellen är dynamisk eller statisk. Den stora skillnaden ligger i om de tar hänsyn till tid

1: Statiska modeller

Statiska modeller antar ett konstant flöde där utflöde och inflöde i system är i jämvikt. Tidsaspekten och den rumsliga variationen för vattnet förbises. Resultatet från statiska modeller ger en överblick av maximalt djup och utbredning i slutet av översvämningsskeendet. På grund av detta är statiska modeller väldigt mycket mindre krävande när det gäller datorkapacitet (Van den Bout, et al., 2022). De rör sig ofta om flera magnituder snabbare i tidsåtgång för simuleringen.

2: Dynamiska modeller

En dynamisk modell simulerar vattnets flöde över tid och använder ofta Saint-Venants shallow-water ekvationer för att beskriva vattnets rörelse (Tesema & Abebe, 2020). De är differentialekvationer som beräknar kontinuitetsvilkortet och bevarandet av rörelsemängd i en eller två dimensioner (ibid.). De här modellerna kan förutspå utvecklingen av översvämningar för ett visst nederbördsscenario. Det ger en bild av inte endast djup och utbredning men också hastighet och när översvämningen uppstår.

2.1: 1D ledningsnätsmodell

En 1D modell av ledningsnätet ger en bild av var kapacitetsbrist i avlopp finns och var upptryckning uppstår. 1D modellering faller under MSB:s (2023) definition av förenklad analys. Det innebär både en kortare tidshorisont att designa och simulera vilket medför en mindre kostnad. I dagsläget rekommenderas de för underlag till en mer genomgående analys (Sweco, 2023). Enkla 1D ledningsnätsmodeller är egentligen endast en förlängning av tid-area metoden som används flitigt vid dimensionering av dagvattenledningar. Varje avrinningsområde har en avrinningskoefficient som reducerar mängden vatten rinner in i systemet. Vid simulering i en dimension kopplas noder samman i ett nätverk med länkar. Noderna representerar dagvattenbrunnar eller kopplingar i ledningsnätet. Dessa punkter bestämmer värdena för in- och utflöde till dagvattennätet. Noderna kan även ges egenskaper i form av pumpar och fördröjningsmagasin. I enkla drag beskriver de var och hur mycket vatten som flödar in i systemet. Länkarna tillåter att vatten flödar mellan noderna och ges sedan rörens dimension och materialparametrar. Lutningen i röret ges av höljskillnaden mellan två närliggande noder.

2.2: 1D-1D ledningsnät-yta

En endimensionell modellering går att genomföra både för att representera flödet i både ledningsnätet och i öppna kanaler. Genom att koppla en kanalmodell som representerar terrängen med en ledningsnätsmodell kan man simulera översvämningens dynamik på ytan. Dessa modeller kan förväntas ge en relativt god bild av vattenflödet på ytan i städer med hög urbanisering, då den ger upphov relativt enkla flödesförhållanden. Om de två 1D modellerna kopplas samman verkar som ett system av kanaler och dammar som för vatten till ledningsnätet. Det tillåter vatten att röra sig mellan yta och ledningsnät genom dagvattenbrunnar. Då vattnet färdas genom fördefinierade flödesvägar ställer det stora krav på den data som används samt en god förståelse av den topografiska situationen. (DHI, 2013).

2.3: 2D modell

En tvådimensionell ytmodell räknar med att vattnet färdas på ytan med två ortogonala vektorer (Tesema & Abebe, 2020). Avrinningsområdet är uppdelat i ett nätverk av celler som tilldelas

egenskaper som infiltrationsförmåga, råhet och topografi. Varje cell allokeras med hjälp av tre koordinater, X, Y, och Z (Tesema & Abebe, 2020). Med en 2D modell kan hela översvämningsförloppet undersökas dynamiskt, vilket ger en mer träffsäker bild av situationen. 2D modeller kräver mycket datorkapacitet. Det ställer samtidigt stora krav på byggandet av modellen innan simuleringen kan genomföras. För en fördjupad simulering beräknar MSB att tidsramen för arbetet räknas i veckor (Alfredsson & Bern, 2017). Det medför stora kostnader för beställare. Vidare ligger det stora krav på att den digital höjdmodellen har en tillräckligt hög upplösning för att små topografiska skillnader i terrängen ska upptäckas. Fler beräkningsceller från högupplösta höjdmodeller bidrar till en större tidsåtgång vid simulering.

2.4: 2D-1D modell

För att uppnå den mest representativa bilden av vattenflödena vid en pluvial översvämning rekommenderas en kopplad modell där flödet i terrängen rör sig två-dimensionellt och interagerar med ledningsnätet. Interaktionen sker vid dagvattenbrunnar som fungerar som både in- och utlopp mellan modellerna. Det tillåter att svackor och nedsänkningar kan fyllas upp på ytan innan de svämmas över och når ledningsnätet (Chang, et al., 2015). Om kapaciteten för ledningsnätet överstigs och vattennivån i en nod är högre marknivån kommer vattnet att flöda tillbaka till ytan (Chang, et al., 2015). Till skillnad från en kopplade 1D-1D lämpar den sig bättre för en analys i mer komplexa situationer (Tesema & Abebe, 2020). I en kopplad 2D/1D kan vatten från byggnader ledas rakt ner i ledningsnätet medan grönytor kan reducera flödet genom infiltration. Den fungerar även bättre att ta hänsyn till skillnader i topografi.

Tidsåtgång

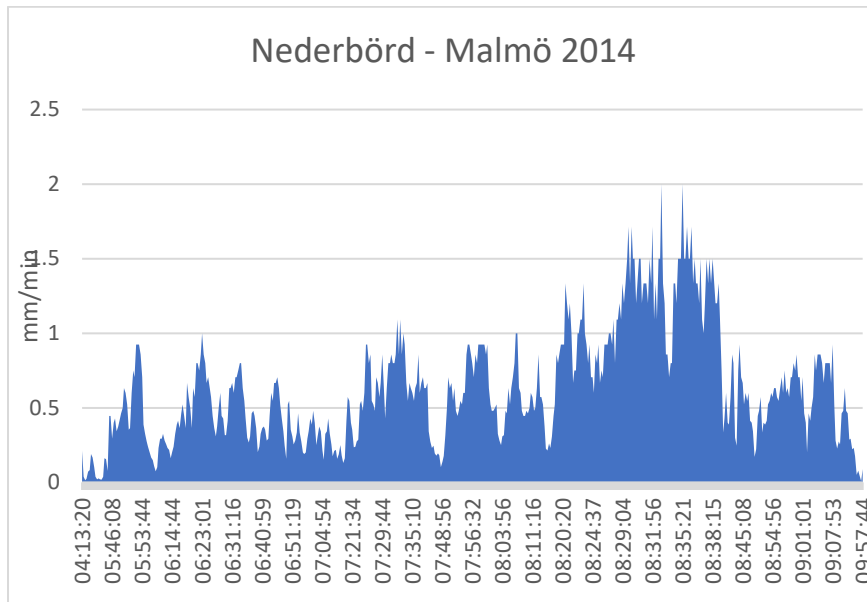
Tiden för simuleringar beror area, upplösning och tidseriens längd och kan sträcka sig från sekunder vid 1D upp till timmar och dagar vid kopplade 2D modeller. (Henonin, et al., 2013). Anledningen till att beräkningstiden ökar i två dimensioner ligger i hur många beräkningssteg det blir. I en 1D modell kan vattnet bara röra sig i en riktning. Vid två dimensioner kan vattnet vanligtvis spridas mellan 4 och 8 riktningar. Varje cell har också olika förmåga att förvara vatten beroende på ytmodellen. Vidare är varken friktion eller lutning konstant vilket medför större variation än vid flöde i ledningar. Samtidigt som vattnet ska sprida sig och dess rörelseenergi bevaras tillkommer mer vatten genom nederbörd. Det förlänger beräkningstiden ytterligare.

Även om de kopplade 2D modellerna förväntas resultera i högre noggrannhet finns det tillfällen där de enklare lösningarna kan ge tillräckligt goda resultat. Vid det tidigare nämnda fallet gällande översvämnningen i Malmö 2014 regnade det lågintensivt i två timmar innan nederbörden verkligen tog fart (Haghighatafshar, et al., 2017). Tidsserien visas finns i figur 3. Då markens infiltrationsförmåga antas minska exponentiellt mot tiden enligt Hortons modell (1939):

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (1)$$

Det kan leda till att terrängens infiltrationsförmåga är kraftigt begränsad vid ett nederbördsscenario och den stora belastningen kommer då att ske direkt på ledningsnätet. Stora delar av skadan kommer samtidigt att ske där vattnet överbelastar ledningsnätets kapacitet. Därför är en effektiv användning av 1D modeller fortfarande av stor vikt. I

extremvädersituationer kan man då använda enklare modeller för att kartlägga översvänningsdrabbade områden.



Figur 3: Nederbördsdata vid skyfall i Malmö 2014 Bildkälla: Salar Haghghatafshar.

Tabell 3: Översikt av modelleringsverktyg

Översvänningsmodell	Utbredning	Fördelar	Nackdelar
Statisk ytmodell	+	Snabb - Interaktiv	Endast slutskedet
1D	-	Snabb	Saknar visualisering
2D	+	Verklighetstrogen	Förbiser ledningsnät
1D-1D	+	Snabb	Förbiser laterala rörelser på ytan
2D-1D	+	Mest verklighetstrogen	Tidskrävande

3.3 Mjukvaror

MIKE+ (M+)

MIKE är ett simuleringsverktyg som tillåter att bygga dynamiska 1D, 2D och kopplade modeller. Det är en kraftfull mjukvara som tillåter en att skapa verklighetstroga modeller med stora möjligheter för kalibrering. Vid användning av endimensionella modeller flödar vatten i en riktning i ledningen medan vid den tvådimensionella modellen kan vatten flöda över en area. I 1D kopplas ledningsnätet till ett avrinningsområde som indatas till ledningsmodellen. Genom att koppla markavrinningsmodellen med ledningsnätet kan översvämningar som beror på överstigen kapacitet i dagvattensystemet beskrivas. En 1D modell går snabbt att simulera vilket leder till lägre kostnader men det är värt att poängtera att den stora kostnaden dock uppstår i samband med skapandet av modellen. Kommuner och VA-huvudmän har redan tillgång till kartor över ledningsnätet och digitala höjdmodeller genom Lantmäteriet vilket snabbt kan överföras till modellen. Det finns problem med hur höjdsättning av brunnar och ledningar är korrekta vilket kan kräva mycket manuellt arbete för att kartlägga. Vidare förväntas Schematiska värden för avrinning som presenteras i P110 ge tillräckligt hög noggrannhet för att tillgodose infiltration och andra förluster (Svenskt Vatten, 2016). Då mycket av materialet som behövs för en ledningsnätsmodell ofta finns tillgängligt kan resurser sparas.

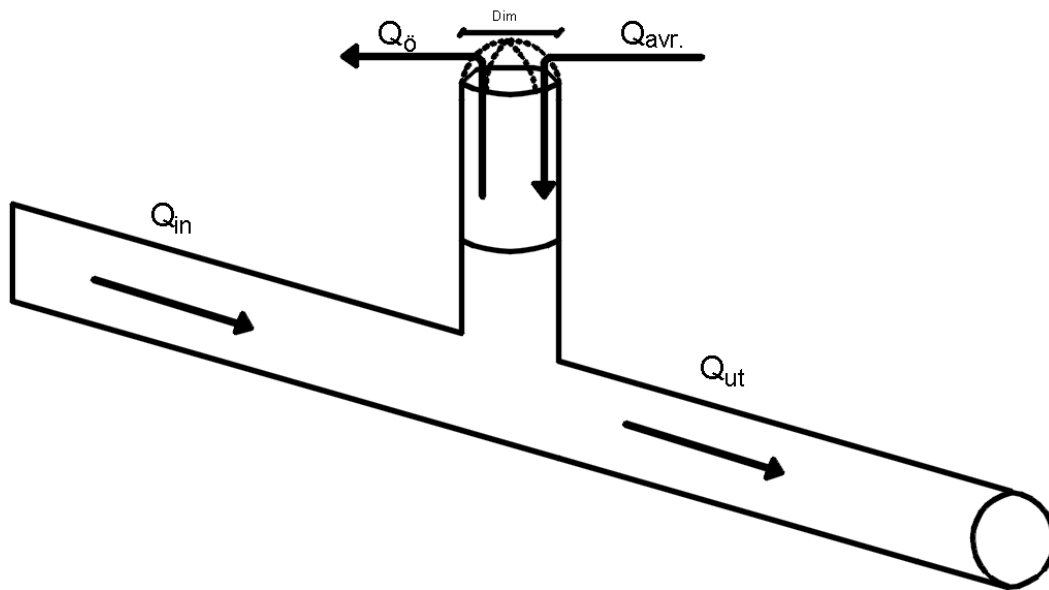
För att approximera översvämningen från en endimensionell modell behövs en metod för att bestämma volymen som lämnar systemet när kapaciteten är överbelastad. Det kan göras genom att beräkna uppträckningsvolymen i ledningsnätet.

Genom att använda massbalansen i Ekvation 2 vid varje enskild koppling går det att räkna ut volymen som lämnar systemet. Volymen kan sedan bearbetas i GIS för att visualisera översvämningen i planet.

$$Q_{ut} = Q_{in} + Q_{avr} - Q_{\ddot{o}} \quad (2)$$

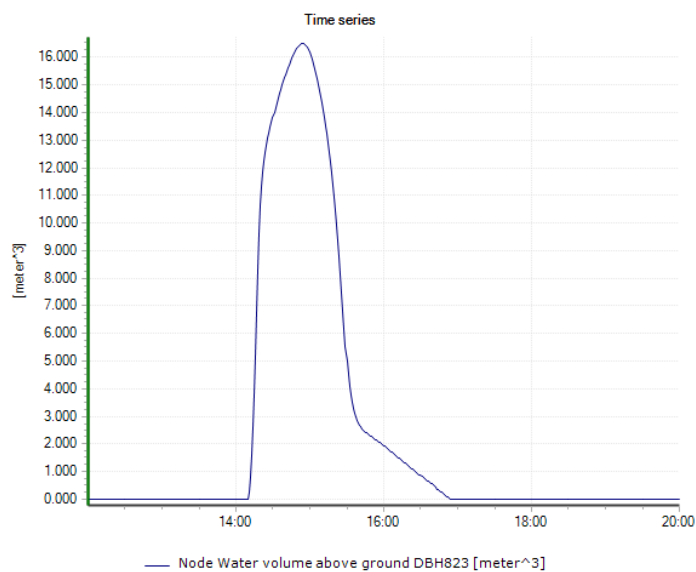
Vilket över en tid kan uttryckas som:

$$V_{ut} = V_{in} + V_{avr} - V_{\ddot{o}}]_{t_0}^{t_1} \quad (3)$$



Figur 4: Principskiss av massbalans vid dagvattenbrunn i 1D-modell.

I en endimensionell modelleras inte flödet på ytan utan avrinningsområden skapas och kopplas till nedstigningsbrunnar. Förskjutningen i flöde beror då på varje delområdes rinntid vilket beror på ytans storlek. Varje avrinningsområde är bara kopplad till en brunn. Vattnet förs därför bara in i ledningsnätet genom en brunn i varje avrinningsområde. Översvämning uppstår när vattennivån i en dagvattenbrunn överstiger marknivån. Volymen kan beräknas genom ekvationen ovan. När Q_{ut} sedan överstiger Q_{in} rinner den översvämmade volymen tillbaka ner i ledningsnätet. Det hanteras i M+ genom att en tillfällig lagringskälla placeras ovanpå brunnens där volymen rinner tillbaka ner i systemet när trycket tillåter det (DHI, 2024). Mike modellen tillåter att volymen ovanpå varje nod plockas ut direkt. Det innebär en stor tidsvinst då massbalansen inte behöver beräknas manuellt. Maxvärdet i grafen i figur 5 motsvarar den volym som lämnat ledningsnätet vid en 1D-simulering i M+.



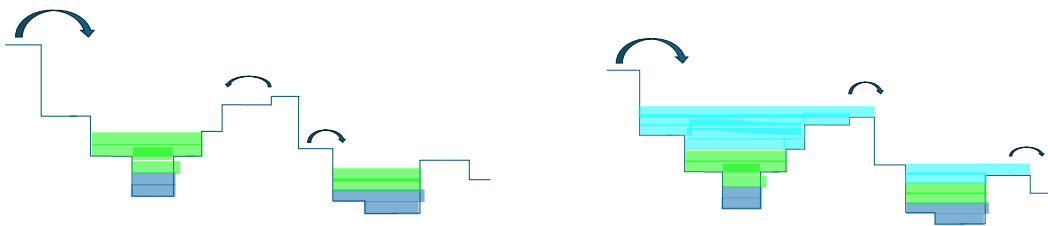
Figur 5: Tidsserie för volym ovanför nod.

SCALGO Live (SCL)

SCALGO Live är ett analysverktyg som analyserar översvämningsrisker genom att kartlägga lågpunkter. Det ger en bild av lågpunkter och rinnvägar mellan dessa, vilket möjliggör en översiktlig bedömning av hur terrängen påverkas av en viss nederbörd. Om en lågpunkt fylls, flödar det överflödande vattnet vidare till nästa lågpunkt. Denna metod bedöms ofta som tillräcklig för att bestämma översvämningsrisker i tidigt skede i detaljplaneringen eller vid översiktliga analyser. Då resultatet kommer direkt är programmet billigt och effektivt att använda.

Eftersom inte hela översvämningsdynamiken simuleras i ett hydrostatiskt verktyg, utan endast hur mycket av nederbörden som stannar på ytan, går det snabbare än en dynamisk 2D-modellering. Användarvänligheten och den snabba överblicken har gjort SCL till ett välanvänt verktyg. Det går inte att simulera specifika nederbördsscenarioer i programmet, utan det begränsas till hur mycket nederbörd som faller över hela området. Integralen i designregnet beräknas och används som regn-parameter för att visualisera utbredningen.

SCALGOs verktyg "Flash Flood Map" är designat för att simulera ytavrinning med målet att förutspå var potentiella översvämningsområden uppstår vid nederbörd. Det är en stationär modell som tillåter att nederbörden faller med en konstant intensitet över hela terrängen. Modellen tar inte hänsyn till tid utan enbart totala mängden nederbörd. I simuleringen leds vattenvolymen nedströms och fyller depressioner och lågpunkter tills deras förvaringskapacitet är uppnådd. När de lokala lågpunkterna är fulla fortsätter vattnet vidare. Depressioner i ytan kan även slås samman för att skapa en större sammanhängande volym. Modellen kan enkelt sammanfattas som en spill-fill-merge modell. Det illustreras i Figur 6. Eftersom tid inte är inblandat i simuleringen beror utbredningen endast på spatiala spridningen av vattenvolymen. Denna enkla metod för att kartlägga pluviala översvämningsområden gör det till ett användbart verktyg för snabba analyser. (SCALGO, n.d.)



Figur 6: Spill-Fill-Merge funktion i SCL. Närliggande lågpunkter fylls upp innan de flödar vidare till nästa lågpunkt.

För att beräkna hur mycket avrinning som uppstår från nederbörd används oftast avrinningsmodeller. Där tilldelas olika typer av marktäckan en faktor mellan 0 och 1 beroende på hur mycket av nederbörden som blir avrinning. I naturlig hydrologi beror detta på jordtyp och vegetationen. Avrinning kan då enkelt reduceras. I artificiellt hårdgjorda ytor som tak och vägar är i tätorter är beräkningarna lite mer omfattande då de ofta är kopplade till dagvattensystem. Därför använder SCALGO en reduktionsfaktor för hårdgjorda ytor inom tätorter.

Metoden som används i SCL är en CN-kurva för att koppla sambandet mellan nederbörd och avrinning (SCALGO, 2023). Vilket visas i Ekvation 4.

$$R = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (4)$$

Där

R = Avrinning [mm]

P = Nederbörd [mm]

I_a = Initial förlust [mm]

S = maximal retentionsförmåga [mm]

CN-kurvan har sedan empiriskt anpassats för dagvattensystem och jordarter i Sverige för att reducera avrinningen. Funktionen beräknas för varje cell för att bestämma hur mycket avrinning som uppstår. I programmet läggs en initial förlust på 29 respektive 34 mm för nederbörd på hårdgjorda ytor beroende på om det är ett separerat eller kombinerat avloppssystem (ibid.). Det följs sedan av en avrinningskoefficient på 1 på hårdgjorda ytor. Infiltrationen sker endast vid första cellen vattnet faller. CN-kurvan används idag i större utsträckning jämfört med Hortons lag. (SCALGO, 2023)

FastFlood (FF)

En annan hydrostatisk modell som erbjuder snabba simuleringar är FastFlood. Programmet är en open-sourcemonmodell, och med sin höga användarvänlighet kan ge snabba visualiseringar över översvämning vid skyfall (Van den Bout, et al., 2022). Mjukvaran är utvecklad av Bastian Van den Bout vid universitetet i Twente och är tillgängligt i webbläsaren. Programmet gör beräkningar på användarens egen dator.

Simuleringen fungerar genom att skapa flödesnätverk baserat på höjdmodellen. Därefter genomförs en statisk simulering av flödet. Då statistiska förhållanden, där in- och utflöde är lika stora, sällan uppstår i naturen korrigeras det av modellen (Van den Bout, et al., 2022). Metoden bygger på statistiska principer för att förutse maximal översvämningdjup och utbredning. En fördel gentemot SCALGO är att den tillåter egna regnfiler som kan variera spatialt i modellen. Det medför att den kan användas för att simulera flödet som uppstår av ett överbelastat ledningsnätssystem. Utöver det fungerar modellerna likvärdigt gällande översvämninganalysen.

PluvioFlow (PF)

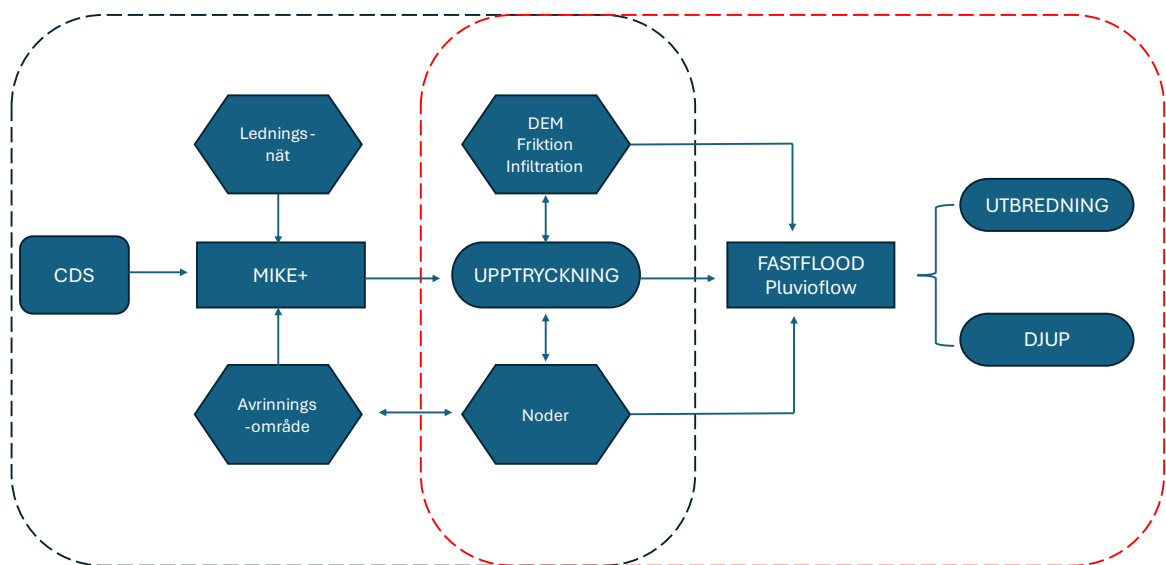
Pluvioflow är ett simuleringsvertyg integrerat i en GIS-miljö utvecklat vid Lunds universitet av Andreas Persson, Petter Pilesjö och Abdulghani Hasan. Verktuget bygger på en algoritm som verklighetstroget beräknas flödet över en DEM. Simuleringsverktuget är skapat för att erbjuda en användarvänlig metod med få input-parametrar som kan dynamiskt approximera vattendjup, översvämningsvolym och hastighet vid ett nederbördsscenario (Nilsson, et al., 2021).

Algoritmen tillåter ett mer naturligt flöde av vatten. En DEM är endast en approximation av den kontinuerliga ytan som finns i verkligheten därför uppstår antaganden och förenklingar när man skapar rinnvägar i terrängen. Modeller som endast flyttar vatten till en cell framåt i flödesriktningen ger tillräckliga resultat då terrängen är konkav och vattenmassorna konvergerar mot samma punkter (Pilesjö & Hasan, 2014). Pluvioflows metod lämnar idén om att varje cell är behandlad som en höjd i topografin och att vattnet endast färdas från cell till cell. Varje enskild cell delas upp i 8 trianglar som sedan skapas ett plan för varje triangel med cellen de ligger i samt höjder från de två närmaste cellerna (ibid.). På så sätt kan ytan approximeras mer verklighetstroget. Det tillåter även att flödesriktningarna kan bestämmas inom varje cell vilket ger en högre detaljrikedom än att bara använda cellens höjd när flödesvägar bestäms. Algoritmen har visat sig ge goda resultat i alla sorters terräng (ibid.). När modellen beräknar ackumulerat vattenmängd struntar den i punkter som är höga i topografin för att minska beräkningsmängden (Hasan, et al., 2011).

Verktuget kan simulera översvämnings med endast 5 olika variabler som alla behandlas som raster-filer. Input-parametrarna är nederbörd, manning-koefficient för ytan, infiltrationshastighet, DEM och in- och utlopp från dagvattenssystemet.

4 Material och metod

Som ett steg för att undersöka användandet av upptryckningsvolymen för att öka effektiviteten i översvämningssmodeller görs först en undersökning av ledningsnätmodellen. Därefter undersöks möjligheter att visualisera upptryckningsvolymen direkt i GIS genom en iterativ metod. Vidare sker en jämförelse mellan statiska modeller med upptryckning som belastningsvolym jämfört med blockregn över en liknande modell. Det görs i strävan att öka användbarheten av de enklare 1D-modellerna. En dynamisk 2D-modell körs också med upptryckningsvolymen. 1D-modellen kräver mindre tidsåtgång och kapacitet att köra genomföra jämfört med att modellera flödet i 2D. I figur 7 visualiseras arbetsgången med ett flödesschema.



Figur 7: Flödesschema för metod.

4.1 Underlag

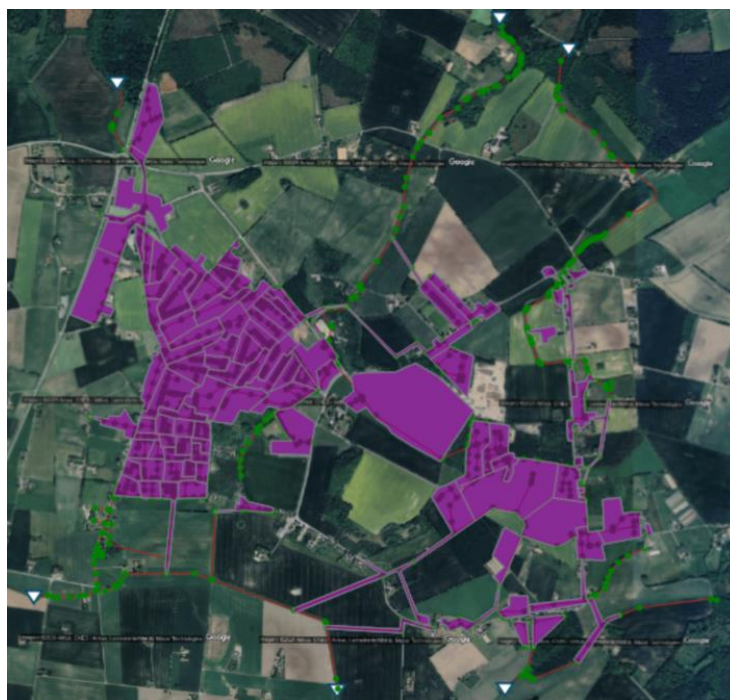
Tabell 2: Underlag för simulering och modellbyggande.

Data	Användningsområde	Källa
Digital höjdmmodell 1m x 1m	Yta för avrinning Fastflood/Pluvioflow	SCL
Dahlströms metod CDS	Design av regnscenario	Svenskt vatten
Marktäckning 1m x 1m	Manningstal för mark samt infiltrationsförmåga	SCL
1D-modeller	Beräkning av upptryckning	NSVA
Skyfallskartor Hittarp/Laröd	Analys	NSVA

4.2 Simulering MIKE+

Fallstudie

Lokal kännedom är viktig vid modellering. Hur belastningen uppstår på ledningsnätet påverkas av hur bland annat hängrännor, rännstensbrunnar och grönytor är placerade. Detta arbete kommer att använda två ledningsnätmodeller, Ekeby och Hittarp/Laröd. De hydrologiska förhållanden skiljer mellan de två orterna då Ekebys enda vattendrag består av dräneringsdiken för omgivande åkermark, medan Hittarp/Laröd påverkas både av naturliga vattendrag och havet. Urdikning av den kringliggande åkermarken gör att fördröjningskapaciteten i området är låg och dräneringsdikena transporterar snabbt vatten vid stora nederbörd som kan leda till översvämningar.



Figur 8: Ledningsnätmodell med avrinningsområden över Ekeby (Mike+).

Det andra modellen är en tätort som består av de hopvuxna samhällena Hittarp och Laröd norr om Helsingborg, se Figur 9. Orten är beläget vid Öresund med bebyggelse som är dominerad av enbostadshus. Det låga läget och närheten till havet innebär en översvämningssituation kopplad till både havshöjningar och stora nederbördsvolymer. Att en andra ort används beror på att modellen som NSVA har till sitt förfogade är uppbyggd på ett annat sätt än den för Ekeby. I modellen för Hittarp/Laröd är varje enskild nedstigningsbrunn kopplad till ett avrinningsområde. Det medför att nederbörden till en början sprids ut i systemet och vattenflödena liknar de som uppstår i verkligheten.

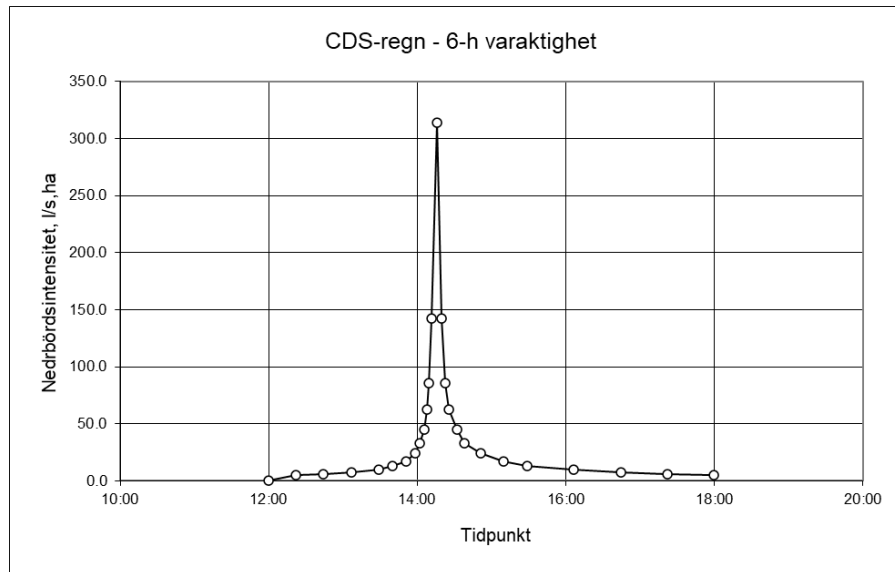


Figur 9: Ledningsnätmodell med avrinningsområden över Hittarp/Laröd (Mike+).

Dagvattennäten i orterna ingår i NSVAs verksamhetsområde. Modellerna för områdena är hydrodynamiska ledningsnätmodeller i 1D. Modellerna är uppbyggda av avrinningsområden samt länkar och noder, vilka motsvarar dagvattenledningar och nedstigningsbrunnar.

Designregn (CDS)

Nederbörden som simuleras följer formen av en Chicago designstorm (CDS). Det är ett symmetriskt regn som har högst intensitet i mitten och definieras för specifika återkomsttider. Konstruktionen av ett typregn av CDS-typ gjordes enligt *Svenskt Vatten P104* (Svenskt Vatten, 2011). Ett CDS-regn är sammansatt av blockregn med olika varaktighet. För att bättre representera ett verkligt regn läggs en skevhetsfaktor till, det rekommenderade värdet ligger på 0.37 enligt Arnell (1991). Dessutom läggs en klimatfaktor på 1,2 på hela grafen. Simuleringar gjordes för 10-års regn som motsvarar servicenivån på dagvattenledningar i befintlig bebyggelse enligt P90, se Figur 10 (Svenskt Vatten, 2004; Svenskt Vatten, 2011). Vidare skapas designregn för 30, 50 och 100-årsregn. Varaktigheten för nederbörden sätts på 6 timmar, 360 minuter, enligt Gustafsson (2019). Det är idag standard att använda CDS som modellregn i Sverige vid skyfallskarteringar. Enligt MSB bör minst två olika regnscenarior simuleras (Alfredsson & Bern, 2017).



Figur 10: 10-årsregn med 6 timmars varaktighet

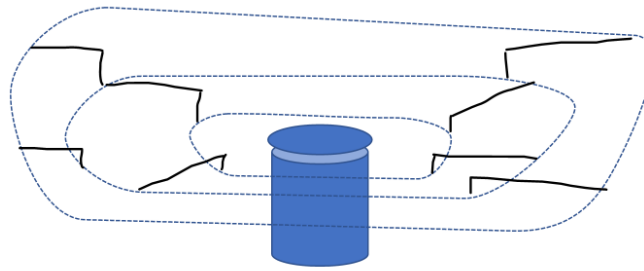
4.3 Visualisering

Databearbetning

När simuleringen är genomförd bestämdes de översvämmade noderna genom att jämföra marknivån med vattennivån för varje dagvattenbrunn i Excel. För att tillgodose felmarginalen i modellen användes endast de noder med en vattennivå 0,1 m över marknivån.

Iterativ metod

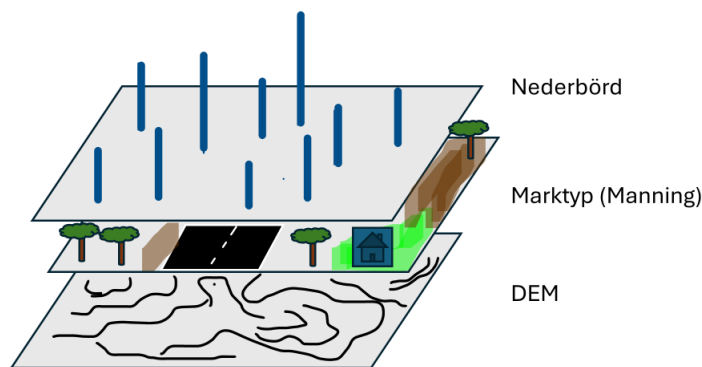
I sitt arbete använder *Emma Hallinger* en metod för att bestämma volymen på en dagvattendam med oregelbunden form (Hallinger, 2022). Metoden beräknar den ökande förvaringsvolymen för ökande vattendjup. Med hjälp av konturlinjer och lutningar i planet placeras diskar med ökande storlek i steg om 10cm på varandra för att beräkna volymen. För att bestämma översvämningsdjupet som uppstår vid varje dagvattenbrunn används hennes metod baklänges. Där en bestämd vattenvolym placeras i planet och sedan beräknas det motsvarande djupet. Den digitala höjdmodellen har en upplösning på 1x1 m. Beroende på hur slänterna runt dagvattenbrunnen får man olika djup av stående vatten för varje pålagd volym. Då en damm har brantare kanter än markytan vid en dagvattenbrunn sprider vattnet ut sig mer och vattenytorna kan sprida sig långt. Genom att göra iterationer var 10:e centimeter ökar vattendjupet och den medförande volymen tills volymen vid noden uppnås. Om översvämningsvolymen ligger mellan två iterationer interpoleras den linjärt mellan de två iterationerna. För att hitta en metod som kan representera översvämningsvolymen som uppstår av uppträckning av ledningsnätet testas initialt en kod i Python som iterativt placerar en volym på ytan för att fylla upp depressionen. Volymen placeras i punkten och räknar sedan volymökningen för varje höjdsteg som läggs till. Hur förvaringsvolymen byggs upp förklaras principiellt i Figur 11.



Figur 11: Iterativ uppbyggnad av höjdkurvor runt en nedstigningsbrunn.

Spatial belastning

Översvämningsvolymen visualiserades genom att simulera upptryckningsvolymerna som ett spatialt varierat regn på en statisk ytmodell, vilket gjordes i FastFlood. Genomförandet var inte möjligt i SCALGo Live, då de inte tillåter att simulera nederbörden med en spatial variation.



Figur 12: Rasterlager för FastFlood simulering.

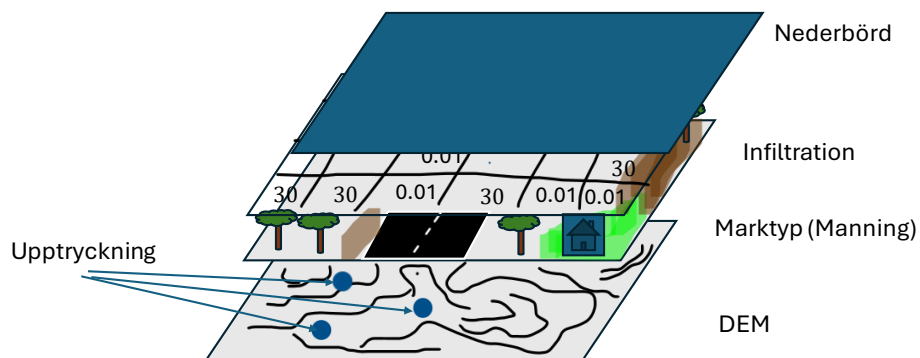
När simuleringen är genomförd kan värden för översvämnningen plockas ut ur MIKE+. Data för parametern "water volume above node" sammanföll med massbalansen som presenterades initialt fast med ett tillägg på volymen som kan förvaras i själva nedstigningsbrunnen. Denna data ligger som en tidserie. Det tyder på att vattnet förvaras tillfälligt i en virtuell reservoar ovanpå noden, och återgår till ledningsnätet när trycket tillåter det.

De noder som var drabbade exporterades till QGIS som en shape-fil. Volymen exporterades till en CSV-fil där NOD-id är kopplat till varje volym. Genom det inbyggda QGIS-verktyget "joins" lades maxvolymen som ett attribut för noden i vektor-filen. Maxvolymen används för att det antas vara den volym som hade flödat ut ur brunnen om den inte hade förvarats i den virtuella reservoaren. Det funkar för att både volymen och noden har samma ID. Varje enskild volym ligger då på rätt plats i planet. Varje översvämningsvolym har då en utgångspunkt i planet.

För att visualisera volymen används FastFlood. Verktøget tillåter att simulera nederbörd med en geografisk variation. För att representera översvämningen görs noderna om till celler med samma upplösning och dimension som den digitala höjdmødellen. Det görs med en Pythonkod som först skapar ett rutnät av tomma celler med samma storlek och upplösning som den digitala höjdmødellen. Därefter bränns volymen in i varje cell som har en nod i sig. Resterande celler har värde 0. Koden presenteras i bilaga 1. Vidare läggs både höjdmødell och nederbördsmodell och marktyp in i FastFlood. Marktypen lägger en friktionsfaktor på varje cell som är hårdgjord på 0,013 medan grönytor tilldelas en friktionsfaktor på 0,05.

Dynamisk modellering av upptryckning

För att undersöka hur upptryckningen rörde sig på ytan genomfördes en simulering av upptryckningsvolymerna i den GIS-integrerade ytmodellen i programmet Pluvioflow. Vattenspridningen simulerades från de översvåmmade brunnarna. Ett 5-timmarsscenario användes med ett konstant flöde ut eller in i varje brunn. Volymen för varje brunn spreds ut över hela 5 timmarssimuleringen då det sammanföll med den tid ledningsnätet upplever upptryckning. Samtidigt tilldelades varje brunn som inte har någon upptryckning ett inflöde på 3,64 l/s. Det är ett schematiskt värde på nedringningen i ett dagvattensystem. Två raster-filer för friktion respektive infiltration användes i modellen. Hårdgjorda ytor som vägar och tak tilldelades ett friktionsvärde på 0,013 och infiltration på 0,1 mm/h. Resterande ytor en friktion på 0,05 och infiltration på 30mm/h. Utöver det lades 1mm vatten över hela ytan som nederbörd. Modellen visar ögonblicksbilder på översvåmmingens spridning över den digitala höjdmødellen. Samtidigt kan vattenhastighet bestämmas vilket ger en bild över erosionsdrabbade områden. Indatan presenteras i figur 13:



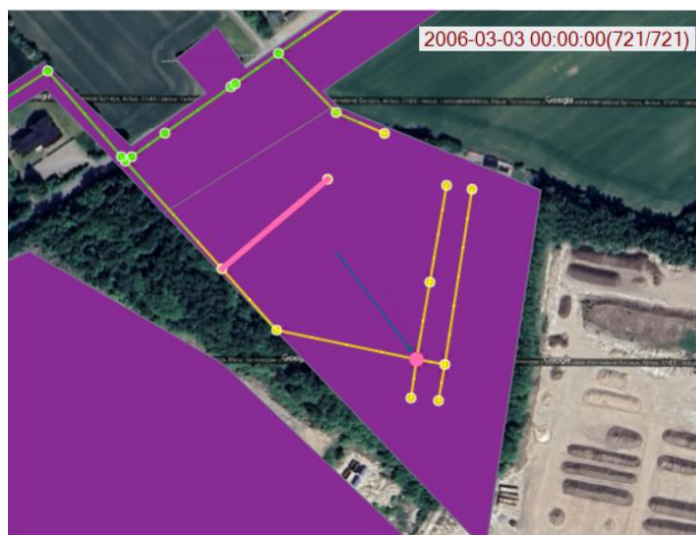
Figur 13: Rasterlager för Pluvioflow-simulering.

5 Resultat och diskussion

5.1 Upptäckning

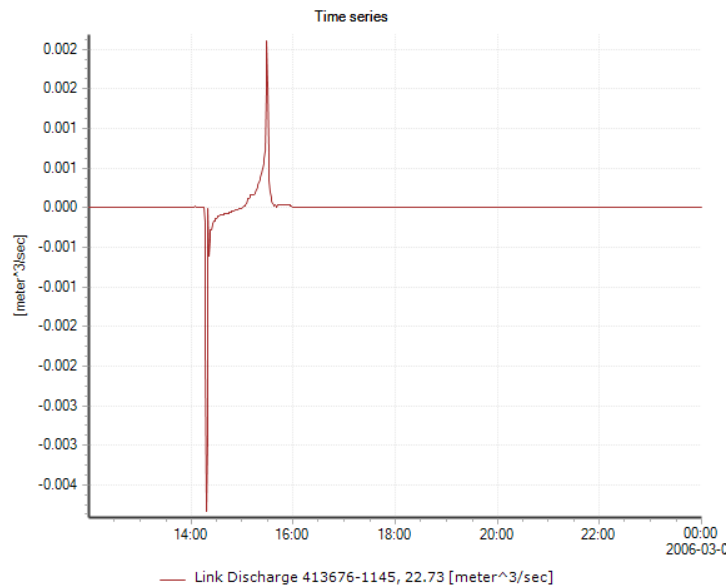
För att få en bättre förståelse av hur 1D-modeller hanterar upptäckningar jämfördes modellerna över Ekeby och Hittarp/Laröd. Resultatet identifierar en kritisk faktor för att få representativa simuleringar av upptäckning. M+ är en vanlig modell för endimensionella simuleringar, men för att bättre använda upptäckningsvolymen är det av stor vikt att modellen konstrueras på ett tillförlitligt sätt. Att använda ledningsnätmodellen för att bestämma volymerna vid översvämningar erbjuder flera fördelar. Det går framför allt fortare att simulera vatten i en dimension. Det är vidare ett system som är enklare att kalibrera. Med mätare i systemet kan hastighet, tillskottsvatten och basflöden bestämmas för olika typer av scenarier. Detta är en styrka som dynamiska 2D-modeller saknar. Att kalibrera resultat från verkliga översvämningsevent i 2D sker till största del med satellitdata. Den information som är tillgänglig att kalibrera mot är då endast utbredningen.

Vid simulering i 1D i Ekeby uppstod problem eftersom varje avrinningsområde bara har en nod som fyller på med vatten från nederbörden, vanligtvis placerad i mitten av avrinningsområdet. Detta ledde till att vatten rann uppströms i systemet i början av simuleringen. En del av volymen kunde förvaras i ledningarna tills trycket tillät vattnet att flöda nedströms igen. I verkligheten hade varje brunn tagit emot nederbörd. Ett fenomen som uppstod var att noderna uppströms om den nod som tar emot vattnet svämmade över. Detta kan förebyggas genom att dela upp avrinningsområdena i mindre delar och på så sätt tillföra nederbörden i fler punkter i systemet. De punkter som översvämmas skulle då ligga längre nedströms i systemet.



Figur 14: Inflödes-nod (rosa) samt markerad länk (rosa).

Det medförde också att ledningar som kopplas på huvudledningen långt från den nod som tar emot vattnet hade ett försumbart flöde. Grafen i Figur 15 visar flödet i ledningen som är markerad i Figur 14. Eftersom ledningen befinner sig uppströms om huvudledningen rinner inget vatten i röret förutom en liten volym som lämnar noden nedströms och rinner sedan tillbaka till huvudledningen. I verkligheten borde flödeskurvan för den markerade ledningen ha en form lik den som designregnet har eftersom den bara får vatten från en enskild nod uppströms. Det är också tydligt när man studerar de översvämmande noderna i detta avrinningsområde (Figur 16). Då hela volymen för området leds till en enskild nod, är ledningarna underdimensionerade för att tillåta att det endast rinner nedströms. Det gör att vattnet trycker uppströms i systemet. Eftersom modellen från NSVA har använts som en kopplad modell tidigare, uppstår sannolikt inte detta problem då vattnet kan transporteras över ytan till närmsta brunn. Vid 1D-modellering är detta inte fallet, och uppdelningen av flera brunnar per avrinningsområde blir problematiskt för detta användningsområde. Detta tyder på att vid 1D-modellering för att bestämma upptryckning är det viktigt att dela upp området i mindre delområden för att införa nederbörd på fler platser i systemet.



Figur 15: Flöde i markerad länk.



Figur 16: Översvämmade noder (rosa) i ett enskilt avrinningsområde.

Att vatten trycker upp bakåt är inget konstigt i ett överfyllt system, men en uppströms länk borde i början ha ett positivt flöde. Uppdelningen i Ekeby leder till att en majoritet av de noder som är kopplade till avrinningsområdet visas som översvämmade i Figur 16. De klarar inte det intensiva flödet som faller på hela avrinningsområdet vid ett simulerat 10-årsregn. För att hantera detta behöver avrinningsområdena ändras så att vattnet sprids ut mer initialt under nederbördsperioden. Om denna problematik åtgärdas blir färre noder översvämmade och uppströmsvärdena mer verklighetstroga, vilket gör att arbetsgången med massbalans för att approximera översvämningsvolymen blir mer träffsäker.

I översvämningsmodellen för Hittarp/Laröd har varje nod ett avrinningsområde, vilket gör att varje tillrinning till noden har en fördröjning beroende på storleken av avrinningsområdet. Detta belastar ledningsnätet mer naturligt. När varje nod är kopplad till ett avrinningsområde tillåter M+ att data hämtas hem för volymen som lämnar ledningsnätet för varje nod.

I fallet Ekeby orsakade uppdelningen av avrinningsområden att vatten både flödade uppströms i systemet samtidigt som Figur 15 visar att rör som är kopplade på en huvudledning inte tog emot något flöde alls. Då det initiala flödet är negativt ser vi att det första flödet i röret kommer nedströms ifrån. I verkligheten borde ett sådant rör ha ett flödesmönster som liknar designregnet eftersom det endast tar emot vatten från en enda uppströms nod. Den tidigare användningen av NSVA-modellen som ett kopplat system undvek troligen detta problem genom att tillåta vatten att transporteras över ytan till närmaste brunn, en funktion som inte finns i 1D-modelleringen.

Undersökningen tyder på att om upptryckningsvolymerna ska användas för översvämningsmodeller behövs noderna delas upp så att systemet kan belastas jämnt. Ett ökat antal avrinningsområden leder till fler beräkningar, men då 1D-modeller redan är snabba är det en minimal förändring.

Ett problem som kan uppstå vid vissa avrinningsytor för metoden är att vatten faller i en lokal lågpunkt antas fortfarande färdas till närmsta brunn i M+ följt av att sedan tryckas upp u ren brunn nedströms. Detta kan leda till en underskattning av volymer i lågpunkter uppströms i terrängen, vid en senare 2D-simulering, medan volymer nedströms överskattas. Det är dock värt att beakta att det tas viss hänsyn till det genom avrinningskoefficienten för grönytor samt att hårdgjorda ytor i en tätort med stor sannolikhet är kopplade till ledningsnätet oavsett.

En ytterligare diskussion värd att belysa är uppbyggnaden av modellen. Noderna i NSVA:s modeller är nedstigningsbrunnar. I verkligheten sker ut- och inlopp av vatten vid rännstensbrunnar. Varje nedstigningsbrunn är ofta i närheten av flera rännstensbrunnar. Detta gör att översvämningsvolymen sprids ut ytterligare över rännstensbrunnarna och inte enbart kring nedstigningsbrunnen. Rännstensbrunnar är kopplade till servicepunkter i närheten av nedstigningsbrunnar, så det rör sig det sig om en förskjutning och större utbredning i terrängen för varje volym.

5.2 Resultat från MIKE+

Tabell 4: Resultat från simuleringar i Mike+ i Hittarp/Laröd.

Återkomsttid [år]	Översvämningsvolym [m ³]	Regnvolym [mm]	Max intensitet [mm/h]	Översvämmade brunnar [-]
10	18 263	41	135,44	349
30	30 960	58	194,96	450
50	39 594	68	230,99	495
100	54 374	84,5	290,8	550

Simuleringen i MIKE+ visar att redan vid tioårsregn svämmas många brunnar i ledningsnätsystemet över, se figur 17. En dryg tredjedel av brunnarna i Hittarp/Laröd påverkas. Som förväntat har ledningsnätet en mindre påverkan vid stora regn. Metoden att endast använda upptryckningsvolymen antas fungera bättre vid små regn. En fördubbling i regnvolym ger en tredubbling i upptryckning enligt tabell 4. Vid större regn antas regn rinna över ledningar då vattenhastigheten ökar. Samtidigt fylls systemet snabbare vilket tillåter mindre vatten att rinna ner. I en 1D-modell antas allt vatten nå systemet vilket leder till stora upptryckningar. Metoden kan göras ännu mer verklighetstrogen genom hur datan används. En bättre kalibrerad 1D-modell med basflöden i ledningarna, infiltration från grundvatten och havsvattenstigning upp i ledningarna hade givit trovärdigare resultat.



Figur 17: Översvämmade brunnar (röd) vid 10-årsregn.

5.3 Visualiseringsmetoder

Iterativ metod

Genom att placera en volym lika stor som uppträckningen av vatten från 1D modellen vid varje brunn var målet att iterativt beräkna omfattningen av översvämningen på ett effektivare sätt. Resultatet från undersökningen av att använda en iterativ process för att utveckla en tidseffektiv metod för att visualisera översvämningar på en DEM i stället för att använda beräkningsintensiva 2D-simuleringar visade sig ha många utmaningar.

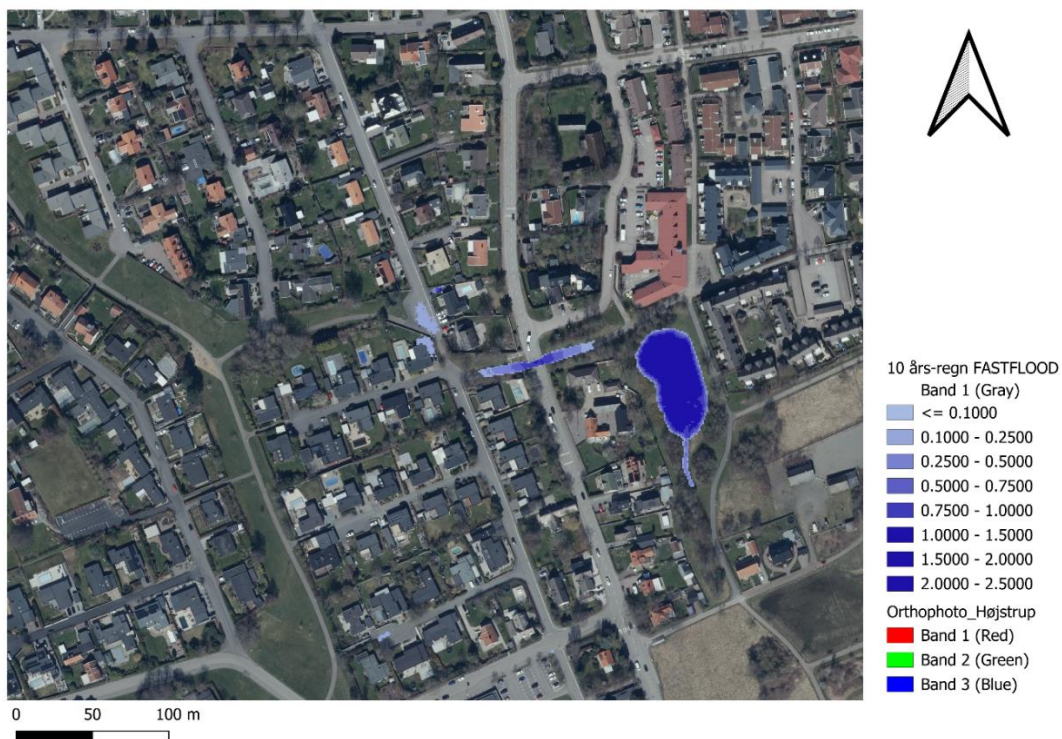
När den iterativa metoden prövas uppstår en rad problem. I första hand kommer metoden inte fungera om utloppet sker i en lokal höjdpunkt. Det finns då inte en kringliggande lågpunkt att fylla upp. Ett ytterligare problem som uppstår är om volymen är större än den lokala lågpunkten och behöver därför antingen spilla över till en kringliggande reservoar alternativt slås samman med en annan lågpunkt för att skapa en ännu större sammanhängande reservoar. Metoden har visat sig funka bra för att bestämma översvämningsvolym i hela dalgångar med en tydlig topografisk avgränsning eller till exempel en dam som i fallet som presenterades i avsnittet *visualisering*. I fallet med Hittarp och Laröd är brunnarna sällan placerade i lågpunkter i terrängen där konturlinjerna är stängda. Processen behövs utvecklas vidare för att fungera. Mer faktorer hade behövts att beaktas såsom rinnvägar och friktion på markytan. För det finns det färdiga modeller som tillåter en spridning spatialt över modellen. Metoden kan antas fungera bra för enskilda noder men vid hela system behövs en koppling mellan lågpunkter.

Metoden anses bara ha potential i terräng med stängda konturlinjer. Metoden kan ge en snabb bild av hur stor volym eller hur stort djup en damm eller depression i terrängen har men för att modellera en pluvial översvämning ställer lokala höjdpunkter och vatteninteraktionen till med problem.

Undersökningen visar att enbart sprida ut vattenvolymen i planet kring varje nod är inte bara otillräckligt och svårt att generalisera. Det finns terräng som metoden hade kunnat vara lämplig i men samverkan mellan både noder och översvämningsvolymen gör att redan färdiga statistiska modeller blir att föredra vid snabb visualisering.

Visualisering med modelleringsverktyg

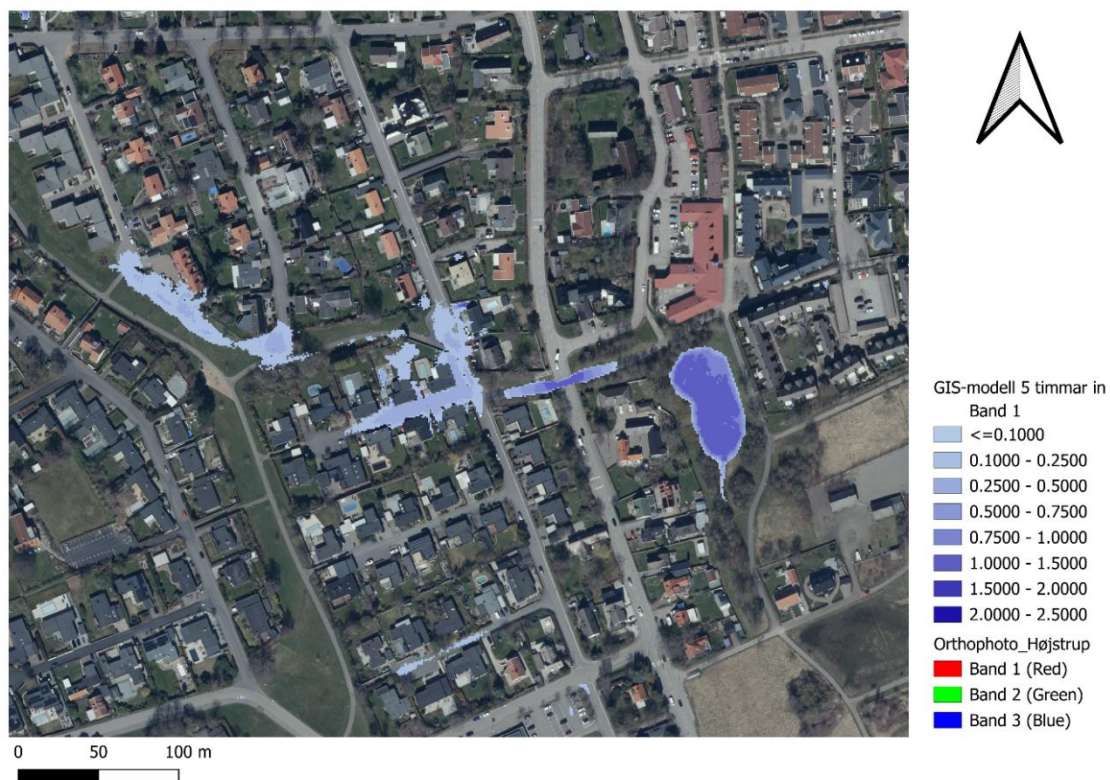
Genom att studera en punkt i mitten av kartan där det uppstår stor upptryckning ser vi att spatialt belasta en statisk modell ger en viss effekt. SCL har ingen aning om var i systemet upptryckning uppstår. Flödesvägarna skiljer sig åt om belastningen sker jämnt eller spatialt. I figurer 18 och 19 ser man en viss effekt av att spatialt variera nederbörden för att representera upptryckningen. De stora massorna som står i mitten på bild i Pluvioflow modelleringen i figur 20 saknas nästan helt i figur 19. I stället ställer sig en större vattenmassa norr om den översvämmade cykelunderfarten.



Figur 18: Översvämningsutbredning FF vid 10-årsregn.



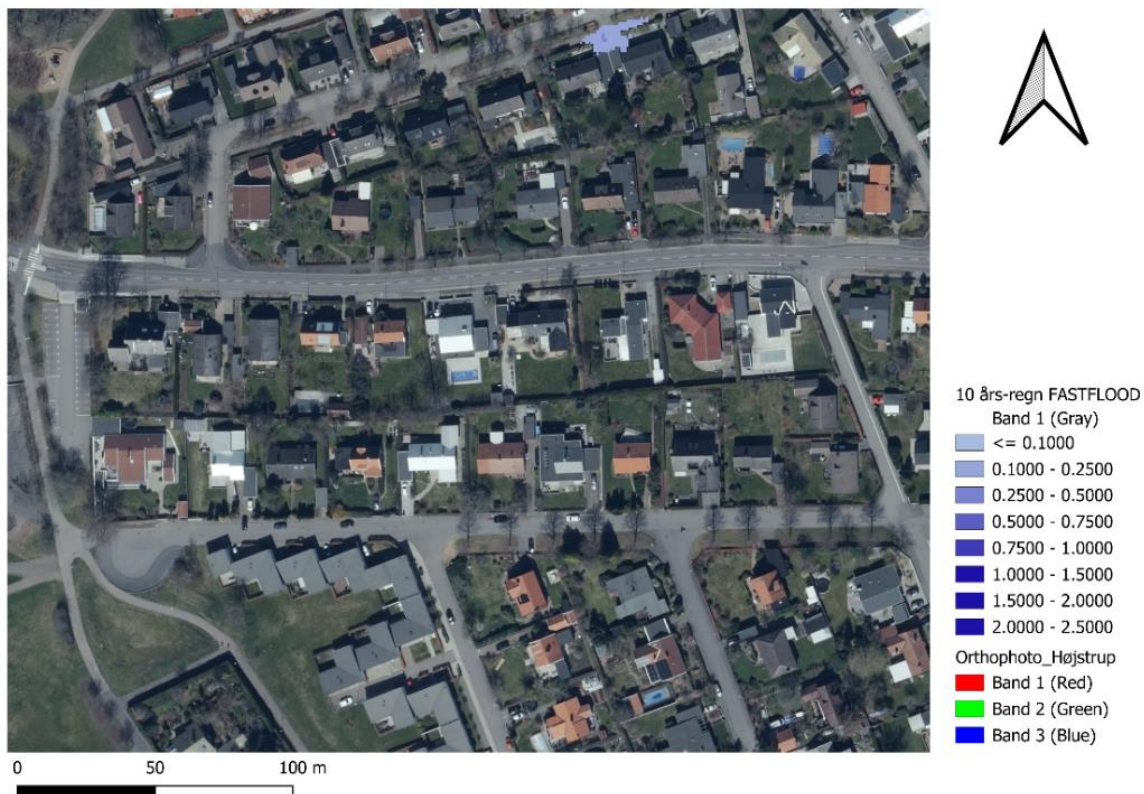
Figur 19: Översvämningsutbredning SCL vid 10-årsregn.



Figur 20: Översvämningsutbredning PF vid 10-årsregn.

Den största slutsatsen en kan dra från figurer 21–23 är dock den fundamentala skillnaden mellan statiska och dynamiska modeller. I PF står stora ytor under vatten 5 timmar in i simuleringen. Ytor som helt saknar vatten i de statiska modellerna har upp mot 0,5m vatten i Pluvioflow. Vattenhastigheterna är svåra att dra slutsatser från då upptryckningen i denna modell är mindre intensiv än i det verkliga regnscenariot. Men trots det visar den på stora vattenflöden i direktkontakt med fastigheter.

Vidare visar figurer 21–23 att ytor som inte förvarar vatten kan förbises av statiska modeller. Stora flöden uppstår rakt förbi fastigheter med djup upp mot en halvmetr vilket kan medföra stora skador. Det fungerar bra att använda upptryckningsvolymerna som belastning i den dynamiska modellen. Stora djup och höga vattenhastigheter uppstår trots att avdrag för grönytor sker både schematiskt med en avrinningskoefficient i M+ modellen och dynamiskt över grönytor i PF. Den dynamiska modellen tillåter också att vatten flödar tillbaka i noder som inte är översvämmade. Trots fler avdrag av vattenvolymer är utbredningen stor.



Figur 21: Översvämningsutbredning FastFlood vid 10-årsregn.



Figur 22: Översvänningsutbredning SCALGO vid 10-årsregn.



Figur 23: Översvänningsutbredning Pluvioflow vid 10-årsregn 5 timmar in.

När upptryckningen används minskar beräkningskravet i den dynamiska modellen. Flödet behöver inte beräknas över varje cell i den digitala höjdmodellen vilket sker när en nederbördsraster används. Studerar man översvämningsdynamiken ser man också en stor utbredning relativt snabbt. Vattnet har en hög nivå i flertalet timmar innan de kommer röra sig undan och till slut ge en bild i stil med de som uppstår i statiska modeller. Vid mindre nederbördsscenarioer kan man alltså nå samma höga och mångsida resultat och samtidigt minska beräkningskraven genom att använda upptryckning.

Upptryckning skapar en mer lokal och intensiv översvämningsdynamik. Rörssystemet transporterar vatten snabbare än vad det hade gjort på ytan. Samtidigt leder det till att vattenmassorna konvergerar. Det leder till att intensiteten ökar.

Att huvudleden (vägen med mittlinjer) i figurer 22-24 saknar flöden i de statiska modellerna kan bero både på att vattnet transporterats bort utan att det finns lokala lågpunkter att förvaras i på vägen eller att de förvaras på gatan med en vattennivå lägre än 10cm. PFs algoritm skapar höjddplan ut från varje cell i rastern tillåter den att simulera effekten av kantstenen mer naturligt. Vattennivån sprider sig över kantstenen och in på fastigheter innan den rinner nedför gatan och i väg. Skillnaden blir väsentlig ur en skadesynpunkt.

5.4 Spatalt- och jämnt fördelad nederbörd i statiska modeller

Då SCL och FF fungerar på liknande sätt är det framför allt effekten av den spatiala vattenbelastningen som beaktas i diskussionen. I SCL faller ett blockregn med samma volym som nederbördsscenarioet i M+ medan i FF belastas 2D-modellen med upptryckningsvolymerna från M+. Båda modellerna låter sedan vattnet flöda över den digitala terrängen. Beräkningarna i SCL går något snabbare då de använder sina egna servrar medan FF använder datorn. Simuleringen körs på trots att båda är tillgängliga i webbläsaren. Studerar man kartorna ser man att de är liknande i översvämningsutbredning. Resultatet från FF överensstämmer bättre med den dynamiska modellen. Vattenståndet är som förväntat inte lika stora men det visar på att det är viktigt att beakta effekten av ledningsnätet när det gäller att förflytta stora vattenmassor vid nederbörd. SCL har något större utbredning på grönytor, vilket också är förväntat.

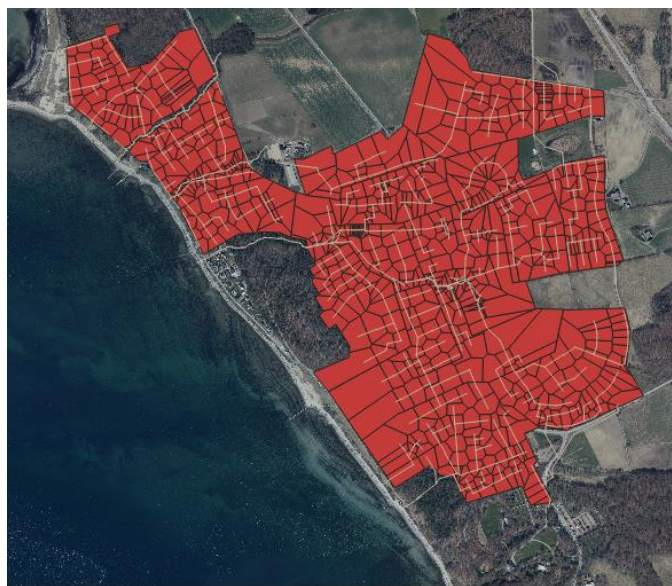
För grönytor uppstår ett problem med SCL. Då nederbörd inte kan infiltrera efter att det har lämnat cellen det landat på kan översvämningsutbredning uppstå för små vattendjup på grönytor. I verkligheten hade detta ofta infiltrerat. Därför bör blå ytor i närheten av vägar och hus ses över noga då de med stor sannolikhet inte hade uppstått alls vid små regn och är förmodligen överskattade vid större regn. I SCALGO är endast artificiella ytor kopplade till ledningsnätet genom en CN-kurva som beräknar avdrag. Resterande mängder genererar avrinning. Om de flödar långa sträckor över grönytor så kommer de inte att infiltrera. I FF används ingen infiltration alls utan endast avdrag genom avrinningskoefficient i M+ används.

Det är som sagt viktigt att poängtera att SCL och FF är statiska modeller vilket ger utbredning och djup snarare än översvämningsdynamiken. Resultatet blir att översvämningsutbredning som simuleras i dessa mjukvaror förväntas ge en mer verklighetstrogen bild av vattendjup och utbredning i slutet av nederbördsscenarioet. Samtidigt kan de leda till att lokala maxnivåer kan underskattas under samma nederbördsscenario. Men då tiden för att köra modellerna är kort och användarvänligheten hög finns det fortfarande vissa användningsområden. Det ger beslutsfattare möjligheter att testa olika lösningar, testa en rad olika scenarier och därifrån göra beslut, men det ska alltid ske i samråd med en expert inom området för att tydligt förklara begränsningarna i resultatet.

Samtidigt som jämförelsen med SCL visar att spatialt variera nederbörden i statiska modeller har en påverkan resultatet finns det andra faktorer man behöver undersöka för att säkerställa tillförlitliga resultat. Båda modellerna skapar ett system av lågpunkter och rinnvägar. Resultatet visar att många liknande lågpunkter fylls upp. Den hydrologiska cykeln kan ändras av ledningsnätet. Ledningar går inte alltid i samma riktning som de naturliga avrinningsområdena.



Figur 24: Naturligt avrinningsområde vid 10-årsregn.



Figur 25: Tekniskt avrinningsområde Hittarp/Laröd i M+.

Vid en jämförelse av de naturliga avrinningsområdena, Figur 24, med de tekniska Figur 25, ser man att majoriteten av tätorten ligger inom samma avrinningsområde. Det kommer därför väldigt lite tillskott från de kringliggande markerna. Det går därför att anta att indelningen av avrinningsområdet i M+ modellen ger en verklig bild av nederbörden som belastar ledningssystemet och tätorten i stort. Vid de kustnära områdena rör sig den största delen av vattnet rakt ner till havet. Medan i nordöstra hörnet av tätorten ändrar ledningsnätssystemet den naturliga avrinningen som annars beror på topografin. Det är viktigt att undersöka om det

uppstår extra flöden i systemet från ytavrinning när man gör en ledningsnät-simulering. I fallet kring Hittarp/Laröd kan det göras ett antagande att nederbördsvolymen som belastar ledningsnätet i M+ modellen är likvärdig med den volym som uppstår i området vid nederbörd. Det pekar samtidigt på att i områden med stora variationer mellan de tekniska och naturliga avrinningsområdena behöver man hantera tillskottsvatten i modellen. Det gör att simuleringen av upptryckningen ur ledningsnätet ger en representativ volym av vattenflödet i fallet kring Hittarp/Laröd men det finns behov av att undersöka det ytterligare.

5.5 Användningsområde vid större nederbördsvolym

För nederbörd av större volymer blir det en kraftig underskattning av vattendjup för statiska modeller generellt. Att endast använda upptryckningsvolym rekommenderas inte heller. Jämför man den maximala utbredningen för ett 100 års regn mellan statiska och dynamiska modeller missar man mycket, se Figur 27. Att vid större skyfall endast använda upptryckningsvolymerna rekommenderas inte för att vid kraftig nederbörd är det inte säkert att vattnet kan rinna ner i ledningsnätet tillräckligt snabbt för att kapaciteten ska kunna utnyttjas. Det gör att upptryckningen inte blir representativ. Vid höga återkomsttider är flödet under regnscenariot också stort vilket leder till att stora vattendjup uppstår innan det slutgiltiga skedet som visas i en statisk modell är uppnådd. Det visas tydligt när ett 100 års regn med maxdjup och -utbredning från en dynamisk 2D-modell jämförs med samma nederbörd i en statisk modell, se figur 26.



Figur 26: Jämförelse mellan 100-årsregn med statiskt modellerad upptryckning(vänster) och en kopplad 2D-1D modell (höger) med 100-årsregn.

5.6 Diskussion – val av modell

Genom att studera tidsstegen i den dynamiska modellen ser vi att översvämningen sprider sig snabbt över den digitala höjdmodellen. I verkliga fallet hade översvämningen varit ännu mer intensiv då flöden är utspridda över hela simuleringstiden i detta fall. Men det ger en överblick om hur snabbt upptryckningsvolymen kan sprida ut sig. Redan en timme in i simuleringen står stora vattenytor på gator och volymerna är kvar vid simuleringens slut efter 5 timmar. Det går att följa i Figur 27.



Figur 27: Vattnets utbredning vid 5, 60, 180 och 360 minuter.

Resultatet från den GIS-integrerade visualiseringen av översvämningens volym från 1D modellen visar att dessa volymer kommer att bidra till stora flöden med vattennivåer upp mot 0,5m i direkt kontakt med byggnader. Även om vattenmassorna kommer att röra sig bort från områden kan de hinna göra stor skada på fastigheter. Upptäckning bidrar till att vattenflödet ökar mycket lokalt i områden. Samtidigt som vattenmassorna inte nödvändigtvis håller sig kvar i närheten av brunnarna en längre tid. Det betyder att effekterna av upptryckning föredras att visualiseras är dynamiskt. Då kan även hänsyn tas till att upptryckningar inte bara skapar problem vid naturliga lågpunkter. Skadan kan beräknas oavsett vilken sorts terräng det är i en överbelastad brunn. PF är en utmärkt mjukvara att simulera det dynamiskt.



Figur 28: Vattenhastigheter efter 5 timmar i Pluvioflow.

Det är också en stor fördel att vattenhastigheten och den tillfälliga utbredningen kan visualiseras i GIS som i Figur 28. Använder man SCLs verktyg "flow accumulation" får man en överblick av rinnvägarna men det är inte möjligt att visa rinnvägarnas utbredning lateralt. Vattenhastigheten kan användas för att förutspå erosion och andra skador vilket tillåter beslutsfattare att tillämpa åtgärder som motverkar de skadorna också. I PF flödar vatten med en hastighet av mer 2 m/s runt fastigheter. Därför tillåter en dynamisk modell en tydligare överblick av potentiella skador av en lokal översvämning orsakad av en upptryckning.

Att programmet är helt integrerat i GIS och endast kräver rasterfiler är en stor fördel, då det leder till högre användarvänlighet. Det ställer bara krav på att användaren har en viss erfarenhet utav GIS-program. Utan vidare kunskap av andra modelleringsprogram kan de skapa visualiseringar av förloppet till utredningar. Vidare används endast lättillgänglig data i form av den digital höjdmodellen, marktyp och infiltration vilket gör att det snabbt går att sätta upp modellen för olika platser. Att endast använda in- och utlopp för upptryckning och nedrinning för att representera dagvattensystemet är också en styrka. VA-huvudmän behöver då inte dela med sig av säkerhetsklassade ledningsnätkartor för att simulera i 2D. Det räcker med att de delar med sig av koordinater för brunnar och ut- och inflöden.

Antalet mindre nederbördsscenarioer kommer att öka. Som tidigare belyst av Larsen (2009) kommer återkomsttiden av 10års regn att sjunka. Vidare kan risken med små regnscenarier vara lika hög som stora på grund av den låga återkomsttiden (Knutsson, 2023). Att därför ha en bra modell som snabbt och enkelt kan kartlägga denna problematik är av stor betydelse. Inte minst när förtätningen av våra städer inte ser ut att minska.

6 Slutsatser

1-dimensionella modeller kan beräkna upptryckning vid kapacitetsbrist men då är det viktigt att ha ett avrinningsområde för varje nod. Det ger en mer verklighetstrogen belastning på ledningsnätet. Det tillåter även att inflöde sker i alla noder uppströms i systemet. Utan den uppdelningen kan upptryckningen inte beräknas på ett korrekt sett. Eftersom allt vatten tillförs till en enskild nod per avrinningsområde oavsett hur många noder som finns i det. Vattnet förvaras i en virtuell reservoar ovanpå noden tills att det finns plats i ledningsnätet.

För visualisera vattenvolymer i en terräng behövs en hierarkisk struktur som bestämmer vilka volymer som hamnar i vilka lågpunkter i en digital höjdmodell. Att endast placera upp volymer i terrängen funkar endast i väldigt speciella topografiska situationer där vatten hade konvergerat naturligt till en och samma punkt. En iterativ metod fungerar inte bra för att visualisera upptryckningsvolymer då rinnvägarna är oftast mer intressanta än var lågpunkterna förvarar vatten.

Att modellera upptryckningen i en statisk modell gör skillnad och kan visa ytor som drabbas av upptryckning. SCLs avdrag för dagvattensystem fungerar bra för en översiktlig undersökning av större områden men missar att ledningsnätet konvergerar vattenmassor som kan leda till lokala översvämningar beroende på upptryckning. Det är därför viktigare att modellera dynamiskt för att förstå riskerna kopplade till upptryckning.

Den viktigaste slutsatsen är att vid upptryckning blir vattenmassorna mer lokala och intensiva än vid bara ytavrinning. Därför krävs modeller med hög noggrannhet som kan följas dynamiskt för att kartlägga riskzoner i bebyggelsen. Att använda upptryckning minskar samtidigt antalet beräkningar i den dynamiska modellen. Vilket leder till en effektivisering då det kräver mindre beräkningar än att belasta 2D modellen med ett utspritt nederbördsscenario.

Vid större nederbörd spelar ledningsnätmodellen en mindre roll i översvämningsdynamiken. Att endast använda resultatet från en 1D-modell för att visualisera utbredningen fungerar bäst vid mindre nederbörd där ledningsnätet kan hantera majoriteten av nederbördsvolymer.

7 Framtida studier

Ledningsnätet har trots sin bristande kapacitet en viktig roll i översvämningsmodeller. De kan ha en stor effekt på vattnets rinnvägar genom att inte alltid följa den lokala topografin. Tillgängligheten på bra resurser för ledningsdata kan dock sätta käppar i hjulen för snabbare modeller. Ledningsnät är säkerhetsklassade och att därför lagra de på kommersiella servrar likt SCALGo går inte.

Med tillgång till fler modeller med avrinningsområden uppbyggda likt den i Hittarp/Laröd hade effekten av att belasta ytmodellen med spatial variation kunnat utvärderas bättre.

För en fortsatt undersökning av appliceringen av upptryckningsvolymmer hade jämförelser behövts köras mot en kopplad modell. Idealt hade fler scenarier genomförts i Pluvioflow för att undersöka skillnad i simuleringstid, utbredning och rinnvägar mellan ytor som får sin belastning från nederbörd kontra upptryckning.

8 Referenser

Alfredsson, C. & Bern, E., 2017. *Vägledning för skyfallskartering*, Karlstad: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB).

Arnell, V., 1991. *Nederbördsdata vid dimensionering och analys av avloppssystem*. VAV P65 red. u.o.:u.n.

Ashley, R. o.a., 2007. *Advances in urban flood management*. Leiden: Taylor & Francis(Balkena).

Chang, T.-J., Wang, C.-H. & Chen, A. S., 2015. A novel approach to model dynamic flow interactions between storm sewer system and overland surface for different land covers in urban areas. *Journal of Hydrology*, Volym 524, pp. 662-679.

DHI, 2013. *Pluviala översvämningar Konsekvenser vid skyfall över tätorter En kunskapsöversikt*, Karlstad: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB).

DHI, 2024. *MIKE+ Collection System*. Hörsholm: DHI.

Frei, C., Schär, C., Lüthi, D. & Davies, H. C., 1998. Heavy Precipitation Processes in a Warmer Climate. *Wiley and American Geophysical Union*, pp. 1431-1434.

Haghighatafshar, S. o.a., 2017. Efficiency of blue-green stormwater retrofits for flood mitigation - Conclusions drawn from a case study in Malmö, Sweden. *Journal of Environmental Management*, 207(2018), pp. 60-69.

Hallinger, E., 2022. *Avrinnings- och CFD-modellering för optimalt vattenuttag i en dagvattendamm*, Lund: Vattenförsörjnings- och avloppsteknik, Institutionen för kemiteknik, LTH, Lunds universitet.

Hasan, A., Pilesjö, P. & Persson, A., 2011. Estimating surface flow over digital elevation models using a new improved form-based algorithm. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Volym 146, pp. 201-211.

Henonin, J., Russo, B., Mark, O. & Gourbesville, P., 2013. Real-time urban flood forecasting and modelling - a state of the art. *Journal of Hydroinformatics*, 15(3), pp. 717-736.

Horton, R. E., 1939. The interpretation and application of runoff plot experiments with reference to soil erosion problems. *Soil Science Society of American Journal*, 3(C), pp. 340-349.

Houston, D. o.a., 2011. *Pluvial (rain-related) flooding in urban areas: the invisible hazard.*, York: Joseph Rowntree Foundation.

Karlsson, V., 2023. *Metodik för framtagande av konsekvenskartor för klimatanpassad dagvattenplanering*, Lund: Institutionen för kemiteknik, LTH, Lunds universitet.

Knutsson, L., 2023. *Användning av riskbegreppet i en dagvattenkontext*, Lund: Vattenförsörjnings- och avloppsteknik, Institutionen för kemiteknik, LTH, Lunds Universitet.

Kourtis, I. M., Bellos, V. & Tsihrintzis, V. A., 2017. *Comparison of 1D-1D and 1D-2D urban flood models*. Rhodes, Greece, 15th International Conference on Environmental Science and Technology.

Kundzewicz, Z. W. & Pinskiwar, I., 2022. Are Pluvial and Fluvial Floods on the Rise?. *Water*, 14(17)(2612).

Larsen, A. N. o.a., 2009. Potential future increase in extreme one-hour precipitation events over Europe due to climate change. *Water Science & Technology*, pp. 2205-2216.

Mailhot, A. & Duchesne, S., 2010. Design Criteria of Urban Drainage Infrastructures under Climate Change. *Journal of Water Resources Planning and Management*, pp. 201-208.

Mobini, S. o.a., 2021. Analysis of pluvial flood damage costs in residential buildings - A case study in Malmö. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Volym 62.

Mottaghi, M., Kärrholm, M. & Sternudd, C., 2020. Blue-Green Solutions and Everyday Ethicalities: Affordances and Matters of Concern in Augustenborg, Malmö. *Urban Planning*, 5(4), pp. 132-142.

Nicklin, H., Leicher, A. M., Dieperink, C. & Van Leeuwen, K., 2019. Understanding the Costs of Inaction-An Assessment of Pluvial Flood Damages in Two European Cities. *Water*, 11(4)(The Challenges of Water Management and Governance in Cities).

Nilsson, H., Pilesjö, P., Hasan, A. & Persson, A., 2021. Dynamic spatio-temporal flow modeling with raster DEMs. *Transactions in GIS*, 26(3), pp. 1572-1588.

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. & Voogt, J. A., 2017. *Urban climates*. Cambridge: Cambridge University Press.

Pilesjö, P. & Hasan, A., 2014. A Triangular Form-based Multiple Flow Algorithm to Estimate Overland Flow Distribution and Accumulation on a Digital Elevation Model. *Transactions in GIS*, 18(1), pp. 108-124.

SCALGO, 2023. *White Paper: The Rainfall-Runoff Model in the Flash Flood Map in SCALGO Live Sweden*, Aarhus: SCALGO.

SCALGO, u.d. *Scalgo.com*. [Online]

Available at: <https://scalgo.com/en-US/scalgo-live-documentation/analysis/flash-flood-map> [Använd 03 06 2024].

Skarsgård, H. & Norlin, W., 2022. *Byggbar mark*, Lund: Division of Water Resource Engineering, Department of Building & Environmental Technology, Lund University.

SMHI, 2019. *smhi.se*. [Online]

Available at: <https://www.smhi.se/klimat/klimatanpassa-samhallet/exempel-pa-klimatanpassning/skyfallskartering-visar-pa-sarbara-platser-fordjupning-1.136156> [Använd 19 02 2024].

Svenskt Vatten, 2004. *Dimensionering av allmänna avloppsledningar*. P90 red. Stockholm: Svenskt Vatten.

Svenskt Vatten, 2011. *P104 - Nederbördsdata vid dimensionering och analys av avloppssystemet*. u.o.:Svenskt vatten.

Svenskt Vatten, 2016. *Avledning av dag-, dräm- och spillvatten*. P110 red. Stockholm: Svenskt vatten .

Sweco, 2023. *Metod för skyfallskartering av tätorter*, Karlstad: Myndigheten för samhällsbyggnad och beredskap (MSB).

Tesema, D. & Abebe, B. G., 2020. A review of flood modeling methods for urban pluvial flood application. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(5).

Van den Bout, B., Jetten, V., van Westen, C. J. & Lombardo, L., 2022. *A breakthrough in fast flood simulation*, Twente: University of Twente, Faculty of Geo-information science and Earth Observation.

Zhou, Q., Mikkelsen, P., Halsnaes, K. & Arnbjerg-Nielsen, K., 2011. Framework for economic pluvial flood risk assessment considering climate change effects and adaptation benefits. *Journal of Hydrology*, pp. 414-415.

9 Bilagor

9.1 Bilaga 1: Kod för att skapa spatialt regn-raster

Python kod för omvandling av noder till raster.

Kod för att konvertera resultat till nederbörd i fastflood.

```
from osgeo import gdal, ogr, osr

import numpy as np

# Hämta DEM för att få dimension, projektion, och upplösning
dem_path = "path/to/DEM.tif"
dem_ds = gdal.Open(dem_path)
dem_gt = dem_ds.GetGeoTransform()
dem_proj = dem_ds.GetProjection()
dem_width = dem_ds.RasterXSize
dem_height = dem_ds.RasterYSize

#Skapa en tom raster med samma dimension, projektion och upplösning
output_raster_path = "path/to/Ny Raster.tif/"
driver = gdal.GetDriverByName("GTiff")
output_ds = driver.Create(output_raster_path, dem_width, dem_height, 1, gdal.GDT_Float32)
output_ds.SetGeoTransform(dem_gt)
output_ds.SetProjection(dem_proj)

# Hämta lager med noder
point_layer_path = "path/to/nodes.shp"
point_ds = ogr.Open(point_layer_path)
point_layer = point_ds.GetLayer()

# Skapa rasterband
precip_band = output_ds.GetRasterBand(1)

# Ge alla celer värde 0
```

```
precip_band.SetNoDataValue(-9999)

# Bränn in värde från nod i raster

gdal.RasterizeLayer(output_ds, [1], point_layer, burn_values=[0],
options=["ATTRIBUTE=Namn för attributfält"])

#

precip_band.SetScale(1)

precip_band.SetOffset(0)

precip_band.SetStatistics(0, 0, 0, 0) # Reset statistics

precip_band.ComputeStatistics(False)

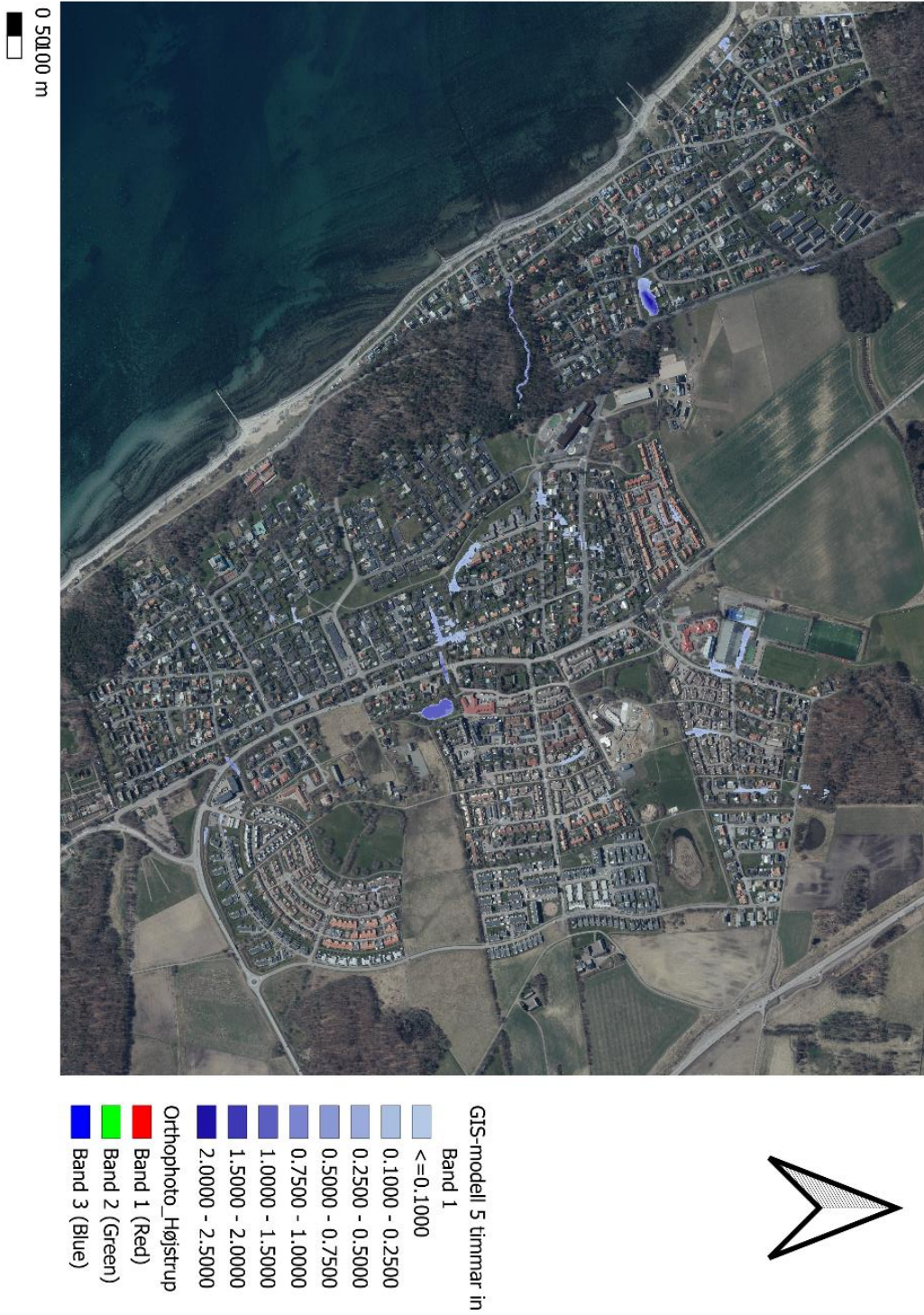
dem_ds = None

point_ds = None

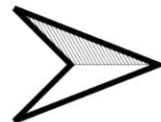
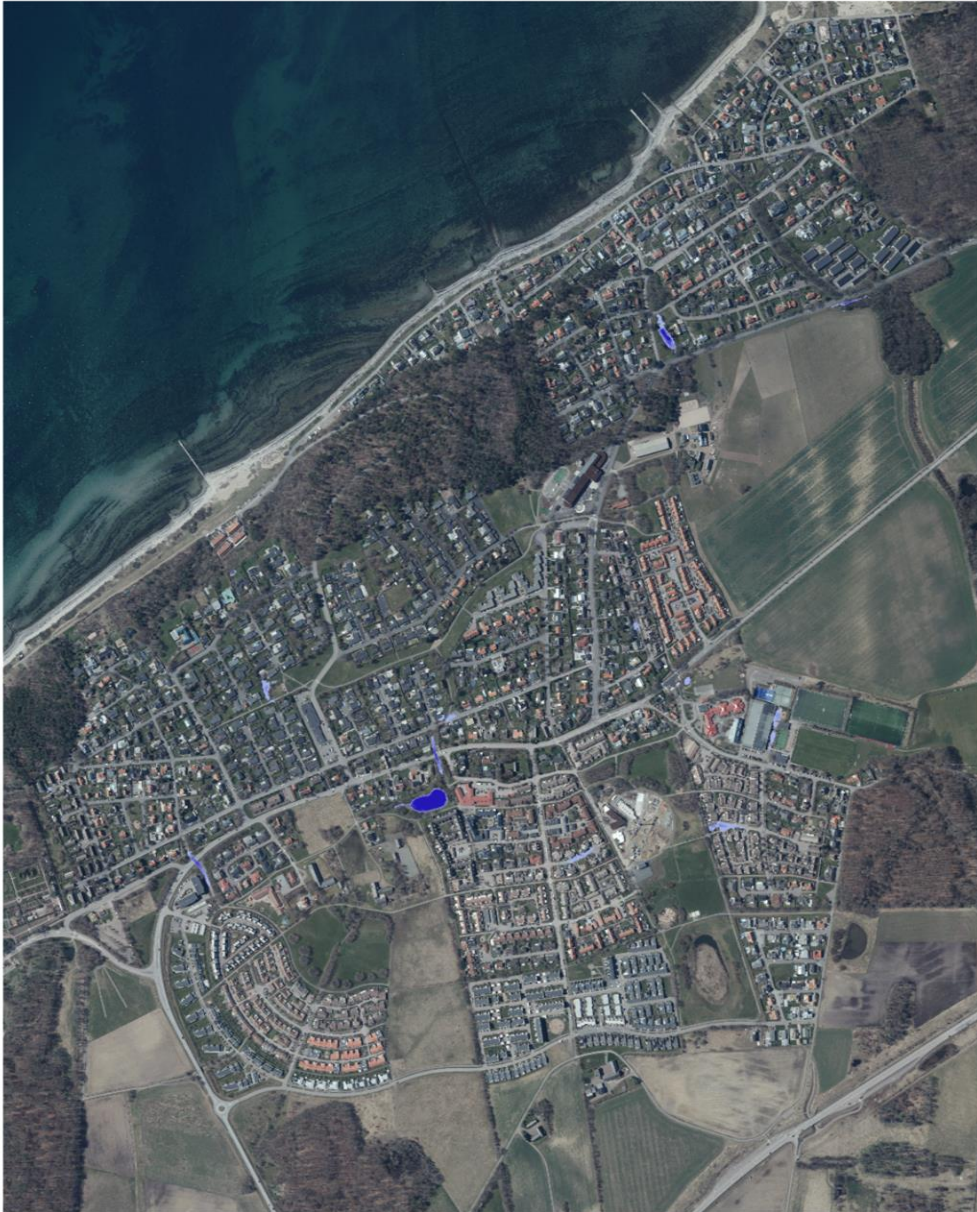
output_ds = None
```


9.2 Bilaga 2 – Utbredningskartor

Pluvioflow 10 år 5 timmar in



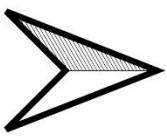
FastFlood 10 år



- 10 års-regn FASTFLOOD
- Band 1 (Gray)
 - <= 0.1000
 - 0.1000 - 0.2500
 - 0.2500 - 0.5000
 - 0.5000 - 0.7500
 - 0.7500 - 1.0000
 - 1.0000 - 1.5000
 - 1.5000 - 2.0000
 - 2.0000 - 2.5000
 - Orthophoto_Højstrup
 - Band 1 (Red)
 - Band 2 (Green)
 - Band 3 (Blue)

SCALGO 10 år

0 50 100 m



- 10 års-regn SCALGo
- Band 1 (Gray)
 - <= 0.1000
 - 0.1000 - 0.2500
 - 0.2500 - 0.5000
 - 0.5000 - 0.7500
 - 0.7500 - 1.0000
 - 1.0000 - 1.5000
 - 1.5000 - 2.0000
 - 2.0000 - 2.5000
- Orthophoto_Højstrup
- Band 1 (Red)
 - Band 2 (Green)
 - Band 3 (Blue)