



UPPSALA  
UNIVERSITET

UPTEC W 22028

Examensarbete 30 hp

September 2022

# Höjddata i översvämningsmodellering

En fallstudie om hur höjdmodellens upplösning kan förbättra precisionen hos den 1D/2D-kopplade hydrauliska modellen LISFLOOD-FP

---

Disa Ekholm

# Referat

## Höjddata i översvämningsmodellering

### - en fallstudie om hur höjdmodellens upplösning kan förbättra precisionen hos den 1D/2D-kopplade hydrauliska modellen LISFLOOD-FP

*Disa Ekholm*

Syftet med fallstudien var att undersöka möjligheterna och nyttan med att implementera en höjdmodell med högre upplösning i SMHI:s översvämningsmodellering som tillämpar den hydrauliska modellen LISFLOOD-FP. SMHI utfärdar översvämningsvarningar och det är därför av vikt att översvämningsmodelleringen håller hög kvalitet. Samtidigt kräver modelleringen tid och resurser från Nationellt Superdatorcentrum i Linköping, NSC. Därför vägdes de potentiella fördelarna med högre upplösning mot förlängd körtid.

Fallstudien bestod av två delar där en höjdmodell på två meters upplösning i xy-planet implementerades och jämfördes med den i dagsläget uppställda modellen på fem meters upplösning. Detta gjordes genom att återskapa översvämningsstillfällena med dess flöden från S-HYPE och mätningar. I studiens första del hämtades satellitdata från Copernicus från två tidigare översvämningsstillfällena för validering av översvämningsmodelleringen. De tidigare översvämningsstillfällena var dels i Emån i Småland år 2012 och dels i Västerdalälven i Dalarna år 2018. Ett index för passning beräknades mellan översvämningskartorna producerade med två respektive fem meters upplösning gentemot satellitbilderna för att kvantifiera överlappande ytor. Därtill beräknades vattendragens lutning för att undersöka om det fanns indikationer på något samband med förändring i index med ökad upplösning på höjdmodellen. Studiens andra del bestod i att undersöka hur höjdmodellens upplösning påverkar vattnets spridning kring översvämningsvallar i modellen. I undersökningen återskapades ett översvämningsstillfälle från 2020 i Helige å i Småland.

Ett antal delavrinningsområden visade sig instabila för den högre upplösta höjdmodellen och kunde därför endast simuleras med lägre flöden. Erhållna resultat visade dock på att översvämningskarteringen förbättrades med upplösningen två meter vid jämförelse med data från Copernicus. Körtiden ökade dock med över 12 gånger vid simulering av högre upplösning. Vidare visades tröskeleffekter i studiens resultat, då översvämningsvallen stoppade vattnet i den högre upplösta höjdmodellen men inte i den med lägre upplösning.

På grund av stabilitetsproblemet och studiens begränsade omfattning, kunde slutsats inte dras om huruvida SMHI bör implementera en höjdmodell med två meters upplösning i systemet för översvämningsvarningar. Däremot kunde konstateras att stabiliteten i modellen måste öka för att det ska vara möjligt. Slutligen drogs slutsatsen att det förekommer tröskeleffekter mellan de två höjdmodellerna och att prestandan ökar generellt för den högre upplösningen när det kommer till precisionen i översvämningsmodelleringen.

**Nyckelord:** Översvämningsmodellering, hydraulisk modellering, LISFLOOD-FP, kopplad 1D/2D-modell, höjdmodell, DEM, upplösning, tröskeleffekt

*Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala universitet (UU)  
Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala, Sverige*

## Abstract

### Elevation data in inundation modelling

#### - a case study about how the resolution of the digital elevation model can increase the precision for the 1D-2D coupled hydraulic model LISFLOOD-FP

*Disa Ekholm*

The purpose of this case study was to examine the possibilities and advantages of implementing a DEM with higher resolution in inundation modelling at SMHI, the Swedish Meteorological and Hydrological Institute, which uses the hydraulic model LISFLOOD-FP. The institute issues flood warnings and therefore it is of high importance that the inundation modelling gives adequate results. On the other hand, running the models at a higher spatial resolution takes more time and resources. Therefore, potentially improved modelling results were discussed in a context of prolonged runtime.

The case study consisted of two parts where a Digital Elevation Model, DEM of two meter resolution was implemented and compared to the five meter DEM that is currently in use. This was done by recreating previous flooding events by using discharge data from S-HYPE. In the first part, satellite data from Copernicus from two previous flooding events in Sweden were used for model validation in comparison with the results from inundation models of SMHI for the different DEM:s. An index was calculated to quantify the overlapping inundation areas. The events were at the river Emån in 2012 and at Västerdalälven in 2018. Moreover, the slope of the rivers within each study area was calculated to investigate correlation between improved flood modelling results for higher DEM resolution and slope of the rivers. The second part of the study investigated flood embankments for the two different DEM:s around Helige å river. A flooding event which took place in 2020 was recreated and the water flow around the built embankments was compared for the two resolutions.

Running the models, it turned out that simulations of several subcatchment areas were unstable with the two meter DEM, and could only be run with lower flow. The obtained results, however, revealed an improved inundation modelling for the DEM with a resolution of 2 m for all study areas in comparison to the data from Copernicus; however the runtime was increased by over 12 times. Moreover, the results also showed threshold effects, where the flooding was impeded by the flooding embankment with the two meter DEM but not at the lower resolution.

Due to the stability issue and the limited scope of this study, it cannot be concluded whether SMHI should implement the two meter DEM in their flood warnings system. However, it was concluded that the stability has to be increased to make it feasible. It was also concluded that there are threshold effects between the two DEM:s and that the performance seems to increase overall for the higher resolution when it comes to precision of the modelling.

**Keywords:** Flood inundation modelling, LISFLOOD-FP, 1D-2D coupled model, hydraulic modelling digital elevation model, DEM, resolution, threshold effect

*Department of Earth Sciences, Air, Water and Landscape Sciences, Uppsala university (UU)  
Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala, Sweden*

## Förord

Denna rapport utgör den avslutande delen på civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet (UU) och Sveriges lantbruksuniversitet (SLU). Studien omfattar 30 HP och har gjorts på uppdrag av SMHI i Norrköping med handledare Nina Bosshard. Roger Herbert vid Institutionen för geovetenskaper på Uppsala universitet har varit ämnesgranskare.

Jag vill börja med att tacka min handledare Nina Bosshard och ämnesgranskare Roger Herbert för stöttning och vägledning genom arbetet. Jag vill rikta ett särskilt tack till Fredrik Schück på SMHI för allt stöd med översvämningsmodelleringen som möjliggjorde mitt arbete och som tog sig mycket tid att besvara mina frågor. Tack också till SMHI för möjligheten att skriva arbetet hos er. Ett speciellt tack också till hydrologerna på avdelningen samhälle och säkerhet på SMHI, för alla trevliga fikastunder och det goda mottagandet.

Eftersom uppsatsen markerar slutet på studietiden vill jag också passa på att tacka alla vänner från universitetstiden som förgyllt de gångna åren. Utan er hade tiden i Uppsala inte varit densamma. Tack även till Marcus som inspirerat mig att söka efter nya utmaningar.

Disa Ekholm  
Norrköping, september 2022

Copyright ©Disa Ekholm och Institutionen för geovetenskaper, Luft- vatten- och landskapslära, Uppsala universitet (UU)

UPTEC W 22028, ISSN 1401-5765

Digitalt publicerad i DiVA, 2022, genom institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet. (<http://www.diva-portal.org/>)

# Populärvetenskaplig sammanfattning

## Höjddata i översvämningsmodellering - en fallstudie

Disa Ekholm

Översvämningskatastrofer i Sverige orsakar stora skador på egendom och infrastruktur, och utgör i vissa fall även ett säkerhetshot för befolkningen. Över 1000 översvämningskatastrofer inträffar varje år till följd av höga vattennivåer i sjöar och vattendrag. För att i tid hinna förbereda räddningstjänst och andra aktörer, har SMHI ett varningssystem för översvämningskatastrofer sedan i oktober 2021. Varningssystemet bygger på översvämningskartor som är beräknade av översvämningsmodellen LISFLOOD-FP, en modell som simulerar översvämningskatastrofer kring vattendrag. Kartorna tas fram genom att simulera olika stora flöden genom många av Sveriges vattendrag.

Modellen LISFLOOD-FP utvecklas och tillhandahålls av Bristols universitet. Hos SMHI körs programmet automatiskt via ett antal steg med kod skriven i språket Python. Flodfåran modelleras som en linje och ytan omkring som ett rutnät där vattnet kan sprida ut sig vid översvämningskatastrofer. Flodfåran är förenklad till en rektangulär form och friktionen, *Manningstalet*, kalibreras innan modellen kan simuleras. Den omkringliggande ytan representerar terrängen, med en så kallad höjdmodell, från Lantmäteriet. SMHI tillämpar i dagsläget ett rutnät med dimensionerna  $5 \times 5$  meter. Detta innebär att den höjdmodell över landskapet som används har ett höjdvärde för varje sådan ruta och visar därför en förenklad bild av terrängen. Generellt ges då en mer utslätad version av landskapet där små höjder och gropar minskar eller försvinner. När vattnet flödar över höjdmodellen, strömmar det enligt den förenklade bilden vilket påverkar resultatet för översvämningskatastrofer.

I den här fallstudien undersöktes om översvämningskartorna kan förbättras så de stämmer bättre överens med hur den faktiska översvämningskatastrofen blir vid ett visst flöde av vatten. Det gjordes genom att använda en höjdmodell med högre upplösning, ett rutnät på  $2 \times 2$  meter. Syftet med studien var också att undersöka om resultatet förbättras mer för brantare eller flackare vattendrag, för att kunna implementera förbättringen för den mest gynnsamma vattendragstypen. Dessutom undersöktes tröskelleffekter genom att studera vattnets rörelse kring översvämningsvallar för de två höjdmodellerna. Med dagens höjdmodell som har en fem meters upplösning tar översvämningskarteringen cirka två veckor att köra på Nationellt Superdatorcentrum i Linköping (NSC). Därför vägs nyttan med den noggrannare höjdmodellen mot ökning i beräkningstid.

För att implementera höjdmodellen med två meters upplösning, behövde några ändringar göras i koden som anropar LISFLOOD-FP. Dels behövde rutnätet ritas upp med rätt dimensioner. Dels behövde också vattendraget ritas med rätt upplösning. Dessutom utökades koden så att en textfil med vattendragens lutning skrevs ut. Slutligen ändrades koden så att det manningstal som tagits fram för den grövre höjdmodellen också tillämpades för den med högre upplösning.

Studien bestod av två delar. I båda delarna återskapades tidigare översvämningskatastrofer i modellerna genom att låta motsvarande flödesmängd rinna genom vattendraget i modellen. I studiens första del jämfördes översvämningskartor från modelleringen med satellitbilder från två tidigare översvämningskatastrofer. Satellitbilder hämtades från Copernicus. De översvämningskatastrofer som återskapades var dels i Emån i Småland 2012, med hjälp av mätdata för flödet, och dels en översvämningskatastrofer i Västerdalälven i Dalarna 2018, med hjälp av simulerat flöde i modellen S-HYPE. Tre delavrinningsområden, det vill säga mindre delar av den yta varifrån vatten rinner till vattendragets huvudfåra, valdes för varje översvämningskatastrofer. Delavrinningsområdena simuleras enskilt i LISFLOOD-FP. För att jämföra översvämningskartorna med satellitbilderna tillämpades ett index för överlappande yta, som beräknades i GIS. Dessutom beräknades vattendragens lutning för att undersöka om den överlappande ytan ökade mer för ett brant eller flackt sluttande vattendrag. Emån rinner genom meanderbågar i studieområdet medan Västerdalälven har en rakare sträckning.

I den andra delen av studien undersöktes hur vattnet flödar kring översvämningsvallar i de två olika upplösningarna. En tidigare översvämningskatastrofer i Helige å i Småland år 2020 återskapades i modellen, också med simulerade flöden i S-HYPE. Längs en del av åns sträckning finns en översvämningsvall med tillhörande dike. Översvämningskatastrofer modellerades med de två olika höjdmodellerna för att sedan jämföra de två resultaten.

Under studiens gång visade det sig i flera fall att körningarna av LISFLOOD-FP blev instabila när höjdmodellen med två meters upplösning användes. Medan programmet kördes, växte sig felet allt större så att ytan aldrig nådde stabilitet. Vad problemet beror på är delvis oklart, men kan eventuellt härledas till hur delavrinningsområdena ser ut. I områden med skarpa lutningar såsom dammar kan simuleringen försvåras.

Därför fick många delavrinningsområden istället simuleras med ett mindre flöde, något som visade sig ge mer stabilitet. Resultaten som gick att få fram visade att index för överlappande yta mellan modellerad översvämningsyta och satellitdata ökade med den högre upplösta höjdmodellen för alla delavrinningsområden i studien. Ökningen var dock olika stor för olika delavrinningsområden och varierade mellan 0,9 % till 200 %. Resultatet visade också att vattendragen som ingick i studien hade olika lutning, men att det inte fanns något tydligt samband till förbättrat index utifrån det begränsade resultatet från studien. Från studiens andra del visade resultatet att översvämningsvallarna hindrade utbredningen av vatten i höjdmodellen med två meters upplösning men inte med fem meters upplösning. I översvämningskartan från femmetersmodellen framträdde dock översvämningsvallen vilket visar att den inte blivit helt utjämnad. För byte av höjdmodell förlängdes beräkningstiden med över 12 gånger, vilket skulle innebära en total beräkningstid på över ett halvår för alla Sveriges delavrinningsområden.

Studiens resultat var dock präglad av ett antal felkällor, där den främsta bedömdes som kvaliteten på satellitdatan. Eftersom översvämningsmodelleringen jämfördes mot denna, hade den stor inverkan på resultatet. Metoden hade också sina begränsningar, bland annat det index som användes för att jämföra översvämningsytan med satellitdata eftersom de två baserades på olika antaganden. Att undersökningen gjordes i form av en fallstudie begränsade också möjligheten att dra slutsatser om översvämningsmodelleringen i stort. Därför rekommenderas vidare studier inom området.

Med underlag av studien ses möjligheterna för SMHI att tillämpa den högupplösta höjdmodellen som begränsade till följd av instabiliteten som uppstår vid modellkörning. Om stabiliteten kan öka, finns dock potential att förbättra översvämningsmodelleringens precision genom att öka höjdmodellens upplösning. Studien visade att det då kan vara lämpligt att välja ut delavrinningsområden med översvämningsvallar eller liknande för att optimera förbättringen utan att förlänga beräkningstiden avsevärt.

# Innehåll

<b>1 Inledning</b>	<b>1</b>
<b>2 Problemformulering</b>	<b>1</b>
2.1 Syfte . . . . .	2
2.2 Frågeställningar . . . . .	2
<b>3 Teori</b>	<b>3</b>
3.1 Modelltyper för översvämningsmodellering . . . . .	3
3.2 LISFLOOD-FP . . . . .	4
3.2.1 Flödesberäkningar i LISFLOOD-FP . . . . .	4
3.2.2 Stabilitet i LISFLOOD-FP . . . . .	6
3.3 Indata till LISFLOOD-FP . . . . .	6
3.3.1 Hydrologiskt underlag . . . . .	7
3.3.2 Randvillkor . . . . .	7
3.3.3 Höjdmodell . . . . .	8
3.3.4 Bottendata . . . . .	8
3.3.5 Manningstal . . . . .	9
3.4 Kalibrering av modellen . . . . .	10
3.5 Osäkerheter i modellen . . . . .	10
3.5.1 Hydrologiskt underlag . . . . .	10
3.5.2 Höjdmodell . . . . .	11
3.5.3 Fel- och känslighetsanalys . . . . .	11
3.6 Bearbetning av modellresultat . . . . .	11
3.6.1 Klassificering av varningar - tolkning av utdata . . . . .	11
3.6.2 Modellvalidering . . . . .	12
3.7 Aktuellt forskningsläge om höjddata i översvämningsmodellering . . . . .	13
3.7.1 Betydelse av höjdmodellens kvalitet vid endimensionell översvämningsmodellering . . . . .	13
3.7.2 Understanding the effects of digital elevation model resolution and building treatment for urban flood modelling . . . . .	13
3.7.3 A New Automated Method for Improved Flood Defense Representation in Large-Scale Hydraulic Models . . . . .	14
3.7.4 Detaljerad översvämningskartering för Eskilstunaån . . . . .	14
3.7.5 Towards a large-scale locally relevant flood inundation modeling framework using SWAT and LISFLOOD-FP . . . . .	14
<b>4 Metoder</b>	<b>16</b>
4.1 Platser för fallstudien . . . . .	16
4.1.1 Emån . . . . .	17
4.1.2 Västerdalälven . . . . .	18
4.1.3 Helige å . . . . .	19
4.2 Översvämningskartering . . . . .	20
4.2.1 Flödesdata . . . . .	20
4.3 Del 1: Kvantifiering av modellresultat och vattendragsslutning . . . . .	22
4.3.1 Kvantifiering och validering av resultaten . . . . .	22
4.3.2 Vattendragsslutning . . . . .	22
4.4 Del 2: Tröskeffekter . . . . .	23
<b>5 Resultat</b>	<b>24</b>
5.1 Beräkningstid . . . . .	24
5.2 Del 1: Kvantifiering av resultaten och vattendragsslutning . . . . .	25
5.2.1 Emån . . . . .	25
5.2.2 Västerdalälven . . . . .	27
5.2.3 Vattendragsslutning . . . . .	29
5.3 Del 2: Översvämningskartor för undersökning av tröskeffekter . . . . .	29
5.3.1 Helige å . . . . .	29

<b>6</b>	<b>Diskussion och analys</b>	<b>31</b>
6.1	Del 1: Upplösning, passningsindex och vattendragsslutning . . . . .	31
6.2	Del 2: Upplösning och översvämningsvallar . . . . .	31
6.3	Avvägning mellan förbättrade modellresultat och ökad beräkningstid . . . . .	33
6.4	Felkällor och begränsningar . . . . .	34
6.4.1	Indata . . . . .	34
6.4.2	Metod . . . . .	35
6.4.3	Stabilitet . . . . .	36
6.5	Vidare studier . . . . .	37
<b>7</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>38</b>
<b>A</b>	<b>Appendix</b>	<b>II</b>
A.1	Detaljerade översvämningskartor Emån . . . . .	II
A.2	Detaljerade översvämningskartor Västerdalälven . . . . .	V
A.3	Detaljerade översvämningskartor Helige å . . . . .	VIII



## Ordlista

**Tabell 1:** Förklaring av ämnesspecifika ord och begrepp som förekommer i rapporten

<b>Ord</b>	<b>Förklaring</b>
Avrinningsområde	En yta där allt vatten rinner till samma punkt i ett vattendrag
Bestämmande sektion	Avgränsning inom ett vattendrag i form av en tröskel eller avsmalning. Inom en bestämmande sektion finns ett entydigt samband mellan vattenföring och djup
Delavrinningsområde	En del av ett avrinningsområde där vattnet samlas i samma punkt i ett vattendrag
Digital elevation model (DEM)	SV: Digital höjdmodell. En tredimensionell modell av terrängen i något område baserad på höjddata
Friktionslutning	Översatt från eng. friction slope. Hastigheten med vilken energi förloras i ett vattendrag längs dess lutning på grund av friktion [m/m]
Hydraulisk modell	En samling matematiska flödesekvationer som beskriver hur ett vattendrag beter sig från mekanisk synvinkel. Används till exempel för att räkna på vattnets nivå eller hastighet
Hydraulisk radie	En kvot mellan vattendragets tvärsnittsarea och den våta perimetern. Högre kvot innebär större flöde på grund av minskad friktion mot ytan
Hydrologisk modell	En modell som beskriver någon del av vattnets kretslopp genom den hydrologiska cykeln. Kan användas för att till exempel räkna på vattenflöden i ett avrinningsområde
LISFLOOD-FP	En kopplad 1D/2D hydraulisk modell som beräknar översvämmad yta kring vattendrag, där vattendraget modelleras i en dimension och flodbanken i två. Tillhandahålls av Bristols universitet och används av bland andra SMHI:s prognos- och varningstjänst
Manningstal	Parameter för att beskriva råhet som styr en ytas friktion mot vattnet
S-HYPE	Hydrologisk modell som beräknar flödet i avrinningsområden i hela Sverige samt delar av Finland och Norge. Utvecklad av SMHI
Triangulated irregular network (TIN)	Representation av en yta genom ett nät bestående av trianglar
Tröskeffekt	I denna rapport menas en tydlig skillnad mellan två översvämningskartor där vattnet sprider ut sig på olika sätt i samma område beroende på vilken höjddata som används
Våt perimeter	Den yta där vätskan har kontakt med omgivande material, som i denna rapport syftar till där vattnet har kontakt med mark och vattendragets botten
Återkomsttid	Anger hur hög sannolikhet en viss händelse har. Händelsen inträffar eller överträffas i genomsnitt en gång under den angivna återkomsttiden

# 1 Inledning

## SMHI:s prognos- och varningstjänst för översvämningar

I Sverige sker årligen runt 1600 översvämningar med ett skadebelopp på cirka 120 miljoner kronor till följd av skador på bland annat bostäder och infrastruktur (Svensk försäkring, 2021). Därtill utgör översvämningar en risk för människors hälsa. Under perioden 1901-2010 inträffade 190 betydande översvämningar varav vid sju tillfällen har människor omkommit. Vid flera tillfällen har människor behövt evakueras för att undvika farliga situationer. 70 % av dessa betydande översvämningar hade sitt ursprung i vattendrag eller sjöar (Alfredsson, 2012).

För att prognostisera vilka områden som riskerar att drabbas av översvämning vid höga vattenflöden används översvämningssmodellering, ett prognosverktyg för att kunna minimera och förbereda sig på konsekvenserna av en översvämning. Det möjliggör exempelvis planering av effektiva räddningsinsatser eller att miljöfarlig verksamhet som är lokaliserad i riskområden kan flyttas (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, MSB (2014)). SMHI har sedan i oktober 2021 ansvarat för att utfärda översvämningssvarningar på nationell nivå som en del av prognos- och varningstjänsten (SMHI Kunskapsbanken, 2021).

Utöver att vara ett varningsverktyg som SMHI använder sig av för att utvärdera när översvämningssrisk föreligger, kan översvämningssmodellering i stort även nyttjas av andra aktörer och för andra ändamål. Bland annat kan modelleringen tjäna som verktyg vid stadsplanering. Genom att utnyttja kunskap och forskning om klimatförändringarnas förväntade effekt på vattenflöden, kan också framtidens översvämningssrisk prognostiseras. Då antas vattenflöden för olika framtidsscenarioer i modellen vilket kan ge underlag vid planering av bebyggelse och andra verksamheter. Man kan också planera för framtida översvämningssrisker genom att uppföra skyddsvallar som kan testas i modellen med olika design och storlek på vallen för bästa motståndskraft (MSB, 2014).

## 2 Problemformulering

För översvämningssmodellering finns en avvägning mellan precision och resursåtgång. En ökad precision kan leda till mer korrekta prognoser och översvämningssvarningar, medan priset ofta är ökad beräkningstid och energifåtgång. För att öka precisionen kan högre upplöst höjddata användas i modelleringen, vilket innebär att vattnet kan flöda genom en mer verklighetstrogen modell av terrängen. Nackdelen är att en högre upplösning också innebär fler datapunkter och därmed tyngre beräkningar. För att optimera nyttan med en högre upplösning utan att avsevärt förlänga beräkningstiden, kan vissa områden väljas ut där skillnaden är särskilt stor beroende på höjddata. Att välja ut sådana områden förutsätter kunskap om vilka områden som gynnas mest av en höjddata modell med högre upplösning.

I denna studie undersöks om vattendragets lutning skulle kunna vara ett kriterium för att välja ut områden att modellera med högre upplösning. Vidare undersöks också om områden med översvämningssvallar skulle gynnas särskilt av en högre upplösning genom tröskeleffekter som gör att översvämningssvallen påverkar vattnets flöde i modellen.

Tre större översvämningar som inträffat under 2000-talet i Sverige var vid Emån i Småland under sommaren år 2018, Västerdalälven i Dalarna under våren 2012 samt vid Helige å i Småland år 2020. I den här studien återskapas dessa händelser i SMHI:s översvämningssmodell och resultatets precision beroende av den höjddata som använts undersöks. De två förstnämnda översvämningstillfällena används för att på ett kvantitativt sätt undersöka hur översvämningsskarteringens precision förändras med ökad upplösning samt om denna eventuella förbättring är relaterad till vattendragets respektive lutning. Det sistnämnda översvämningstillfället används istället för att visuellt analysera skillnader mellan hur vattnet sprider ut sig i höjddata modeller med olika upplösning.

## 2.1 Syfte

Syftet med projektet är att utreda om det skulle vara fördelaktigt att implementera högre upplösning på höjddata i SMHI:s översvämningsmodell för någon typ av vattendrag, där vattendragstyp definieras utifrån dess lutning. Detta görs genom att undersöka huruvida en högre upplösning på höjdmodellen ger förbättrade modellresultat samt kostnaden för denna förbättring i fråga om förlängd beräkningstid. Vidare undersöks särskilt huruvida en högre upplösning skulle göra dämmande strukturer synliga för modellen.

## 2.2 Frågeställningar

Syftet uppfylls genom att undersöka:

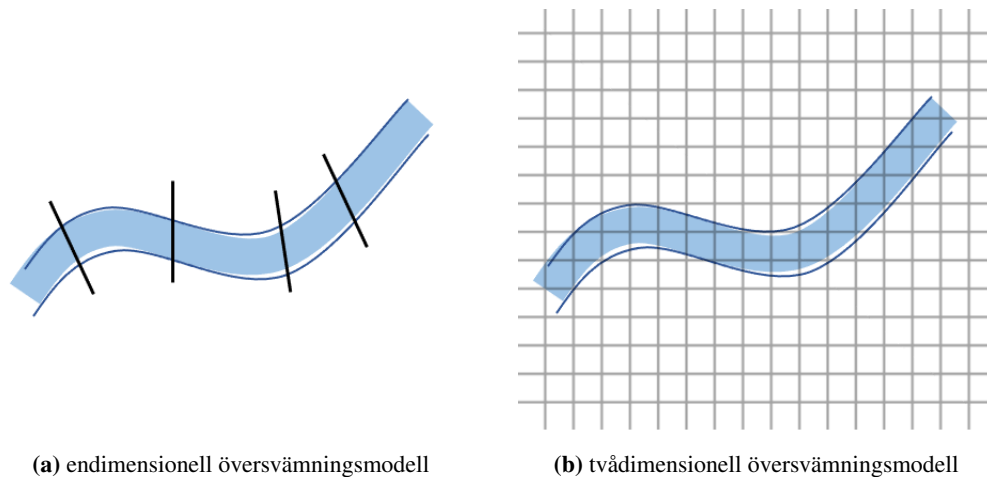
- Är ett eventuellt förbättrat modellresultat vid ökad upplösning på höjdmodellen relaterat till vattendragets lutning?
- Förekommer tröskeeffekter vid upplösningen två meter som gör att avgörande dämmande strukturer blir synliga för modellen?
- Är det gynnsamt med avseende på förbättrat modellresultat kontra ökad beräkningstid, att implementera högre upplösning på höjddata för någon särskild typ av vattendrag i SMHI:s översvämningsmodeller?

### 3 Teori

Teoriavsnittet behandlar grunderna inom översvämningsmodellering (kapitel 3.1) och beskriver mer specifikt den modell som SMHI använder sig av vid namn LISFLOOD-FP (kapitel 3.2, 3.3 och 3.4). Vidare beskrivs osäkerheter i denna modell samt hur modellresultatet bearbetas (kapitel 3.5 och 3.6). Slutligen behandlas det aktuella forskningsläget inom översvämningsmodellering (kapitel 3.7).

#### 3.1 Modelltyper för översvämningsmodellering

En hydraulisk modell kan vara i en eller två dimensioner eller en kombination av de två (figur 1). En endimensionell modell beskriver vattendraget med hjälp av tvärsektioner av själva vattendraget och av den närliggande miljön. I modellen beräknas sedan vattnets nivå och hastighet för varje tvärsektion som tillsammans ger en bild av översvämningsläget, en vattenståndsprofil. I en tvådimensionell modell beskrivs däremot den närliggande omgivningens topografi och vattendragets bottengeometri i ett rutnät. I den typen av modeller beräknar man i vilka rutor vattnet befinner sig vid varje tidpunkt och vattnet kan hitta en väg mellan rutorna och utdata från modelltypen är vattendjup och flödeshastighet i varje ruta.



(a) endimensionell översvämningsmodell

(b) tvådimensionell översvämningsmodell

**Figur 1:** Schematiska bilder över en endimensionell (a) och en tvådimensionell (b) diskretisering av ett vattendrag.

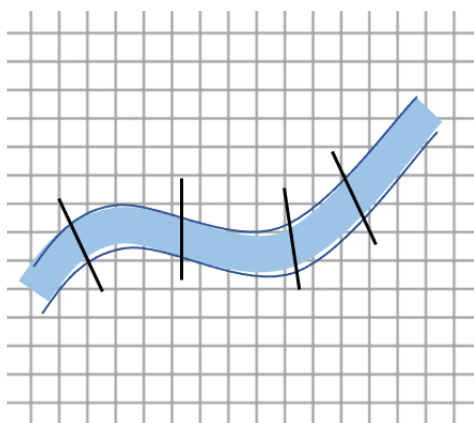
Den tvådimensionella modelltypen är betydligt mer beräkningstung och tidskrävande än endimensionella modeller. För att minska beräkningstiden kan man behöva ha ett rutnät med låg upplösning, vilket ger en grövre skattning av vattnets väg i terrängen. I flackare terräng kan en tvådimensionell modell vara fördelaktig eftersom vattnet letar sig fram i topografin. I en endimensionell modell flödar å andra sidan vattnet endast emellan de valda tvärsektionerna.

För att kalibrera en översvämningsmodell används ofta data från tidigare översvämningsfotografier av översvämmade ytor. Det möjliggör beräkning av ytans råhet, vattnets friktion mot ytan, en parameter som kallas Manningstal (MSB, 2014).

För SMHI:s översvämningsmodellering används modellen LISFLOOD-FP (De Roo & Bates, 2000). Största delen av den kod som används för att producera översvämningskartorna är skriven i programspråket Python och till mindre del i R. Koderna kontrolleras och underhålls av SMHI. För att generera översvämningskartorna körs programmen på nationellt superdatorcentrum vid Linköpings universitet (NSC) (Alpford-Wylde & Girons-Lopez, 2022).

## 3.2 LISFLOOD-FP

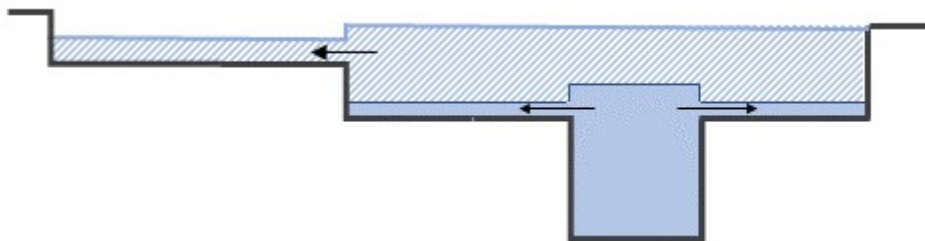
LISFLOOD-FP är en hydraulisk modell som utvecklats och tillhandahålls av Bristols universitet. Den första utgåvan skapades i början av 2000-talet av forskarna Paul Bates och Ad De Roo (De Roo & Bates, 2000). Modellen har sedan utvecklats kontinuerligt av flertalet verksamma inom universitetet. LISFLOOD-FP är en kombination av en en- och tvådimensionell modell, en såkallad kopplad 1D/2D-modell, och användaren får som utdata ett rutnät, grid, med information om vattendjup och vattenhastighet för varje ruta vid varje tidpunkt. Vattenfåran modelleras som en endimensionell hydraulisk modell, det vill säga i form av tvärsektioner medan flodbanken modelleras som en tvådimensionell modell (figur 2). Vid översvämnings-simulering kan även hydrografer fås för utflöde ur modellen samt på andra önskade punkter. Vattenflödet beräknas som en flodvåg som strömmar genom fåran med hjälp av numeriska lösningar på Saint-Venants ekvation, en variant av Navier-Stokes ekvationer. När denna fåra överfylls med vatten, låter modellen vatt-net spilla ut över den omgivande terrängen som modelleras som ett rutnät med höjddata i två dimensioner (Trigg m. fl., 2013).



**Figur 2:** Schematisk modelluppställning i LISFLOOD-FP, där flodfåran modelleras med tvärsnitt i en dimension (svarta linjer) och flodbanken i två dimensioner (rutnät).

### 3.2.1 Flödesberäkningar i LISFLOOD-FP

I modellen fylls volymer med vatten allt eftersom det flödar in med hjälp av hydrauliska ekvationer som beskrivs närmare längre fram i avsnittet. När flodfåran är fylld, rinner vatten över till flodbankens rutnät tills dess att vattennivån inte skiljer sig mellan två intilliggande rutor (University of Bristol, School of Geographical Sciences, u. å.) (figur 3).



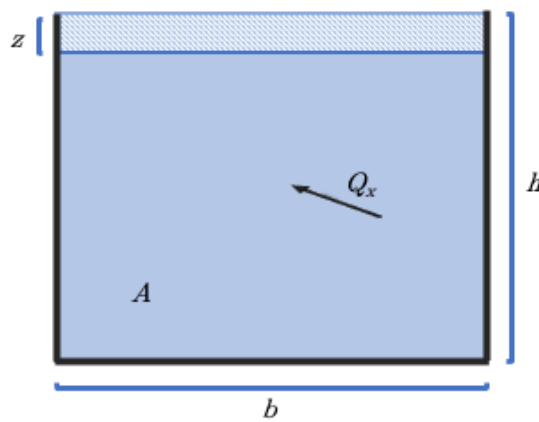
**Figur 3:** Schematisk bild över hur flodfåran och terrängen fylls med vatten i LISFLOOD-FP. När vattennivån stiger i flodfåran breder vattnet ut sig åt sidorna tills nivån är utjämnad i sidled.

För att på ett matematiskt sätt kunna beskriva vattnets rörelse genom de endimensionella tvärsektionerna av flodfåran, tillämpas Navier-Stokes ekvationer i LISFLOOD-FP (ekvation 1 och 2).

$$\underbrace{\frac{\partial Q_x}{\partial t}}_{\text{lokal acceleration}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q_x^2}{A} \right)}_{\text{konvektiv acceleration}} + \underbrace{gA \frac{\partial(h+z)}{\partial x}}_{\text{vattnets lutning}} + \underbrace{\frac{gn^2 Q_x^2}{R^{3/4} A}}_{\text{friktionslutning}} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

där ekvation 1 beskriver momentets bevarande och ekvation 2 beskriver masskontinuitet, alltså bevarandet av den totala massan, där  $Q_x$  ( $m^3/s$ ) är flödet i  $x$ -riktning,  $A$  ( $m^2$ ) arean på flödets tvärsektion,  $h$  ( $m$ ) vattendjupet,  $z$  ( $m$ ) vattennivåhöjningen,  $g$  ( $m/s^2$ ) gravitationsaccelerationen,  $n$  ( $m^{1/3}/s$ ) Manningstalet,  $R$  ( $m$ ) den hydrauliska radien,  $t$  ( $s$ ) tiden och  $x$  ( $m$ ) sträckan i  $x$ -led. Se även visualisering i figur 4.



**Figur 4:** Tvärsnitt av en flodfåra i LISFLOOD-FP

Hur ekvationerna 1 och 2 används i modellen beror på tillgänglig data och önskat tidssteg. För LISFLOOD-FP finns ett antal numeriska lösare som baseras på olika antaganden och förenklingar av Navier-Stokes ekvationer. LISFLOOD-FP antar data i SI-enheter både som in- och utdata till ekvationerna i modellen. De olika lösarna baseras på olika antaganden kring flödet och övriga förutsättningar i vattendraget. De använder sig således av förenklade versioner av ekvation 1 (Trigg m. fl., 2013). I SMHI:s översvämningssmodellering används Subgrid-lösaren för den endimensionella flodfåran (Neal m. fl., 2012). Subgrid-lösaren är den senaste utvecklade metoden för att representera flodfåran i den tvådimensionella terrängen och representerar således den endimensionella delen av 1D/2D-modellen. Med hjälp av friktionstalet, marklutningen och vattnets lokala acceleration beräknas flödet mellan tvärsektionerna. Den konvektiva accelerationen antas obetydlig och bortses ifrån (ekvation 3).

$$\underbrace{\frac{\partial Q_x}{\partial t}}_{\text{lokal acceleration}} + \underbrace{gA \frac{\partial(h+z)}{\partial x}}_{\text{vattnets lutning}} + \underbrace{\frac{gn^2 Q_x^2}{R^{3/4} A}}_{\text{friktionslutning}} = 0 \quad (3)$$

Lösaren beräknar flödet för varje segment av flodfåran samt flödet för intilliggande del av flodbanken. Metoden är speciellt anpassad för att fungera väl även när begränsad data om flodfårans tvärsektioner finns tillgå (Trigg m. fl., 2013). Metoden baseras på en ändlig numerisk differentialanalys med framåtdifferens som är beräkningseffektiv enligt tidigare analyser. Flodfåran delas upp i ett subgrid, mindre rutnät, vilket också tillämpas för att beräkna hur vattnet svämmar över till omkringliggande ytor. Den största felkällan i modellen finns i den höjddata som används för att skapa använd höjddata (Neal m. fl., 2012).

För den tvådimensionella flodbanken används Adaptive-lösaren. Adaptive-lösaren antar också friktions- och vattenlutningstermerna i ekvation 1 som relevanta, men försummar både lokal och konvektiv acceleration (ekvation 4) (Trigg m. fl., 2013).

$$\underbrace{gA \frac{\partial(h+z)}{\partial x}}_{\text{vattnets lutning}} + \underbrace{\frac{gn^2 Q_x^2}{R^{3/4} A}}_{\text{friktionslutning}} = 0 \quad (4)$$

Där ekvation 4 används i kombination med kontinuitetsekvationen (ekvation 2) för att bygga upp modellen för respektive lösare.

Adaptive-lösaren tillämpar en endimensionell approximation av en diffusionsvåg i både x- och y-riktning längs markplanet vilket ger en tvådimensionell vattenutbredning. Lösaren lämpar sig väl för uppsättning av höjddata genom GIS i ett raster. Speciellt för lösaren är att tidssteget inte är konstant genom simuleringen, en följd av att stabilitet anses bero på vattendjup, marklutning, manningstal och cellstorlek vilket innebär att optimalt tidssteg varierar. Detta har till fördel att modellen blir stabilare eftersom vattnet inte hinner tömmas från en cell till nästa på ett tidssteg, som annars kan leda till att vattnet strömmar tillbaka i felaktig riktning under nästkommande tidssteg. Nackdelen är att beräkningstiden kan bli lång och kostnaden stor för hög upplösning eftersom det optimala tidssteget för lösaren minskar kvadratisk med cellstorleken (Trigg m. fl., 2013; Hunter m. fl., 2005).

### 3.2.2 Stabilitet i LISFLOOD-FP

Adaptive-lösaren bidrar till modellens stabilitet, men den beror även på andra faktorer enligt Trigg m. fl. (2013). Dammar och vallar representeras på ett eget sätt i modellen. Istället för att flödet mellan två sådana celler styrs av Mannings formel, beräknas det av en speciell fördämningsekvation (ekvation 5) (Trigg m. fl., 2013).

$$Q = Cb(2gH)^{1,5} \quad (5)$$

Där Flödet  $Q$  relateras till en flödeskoefficient  $C$ , vattendragets bredd  $b$ , samt lägesenergin i vattnet ovanför fördämningen  $H$ .

Detta orsakar instabilitet vid de tillfällen då vattnet inte kan flöda kring fördämningen genom intilliggande celler. För att undersöka hur vattnet flödar kring vallen, kan flödet innan och efter vallen undersökas (Trigg m. fl., 2013).

### 3.3 Indata till LISFLOOD-FP

För tillämpning av LISFLOOD-FP behövs olika indata. Indata till SMHI:s uppsättning av LISFLOOD-FP hämtas från olika källor:

- Flödesberäkningar för avrinningsområden, hydrologiska data, hämtas från SMHI:s modell S-HYPE (SMHI, u. å.)
- Höjddata i form av höjdmodell samt geografisk data om vattendrag, sjöar och byggnader hämtas från Lantmäteriet (Lantmäteriet, 2022a)
- Information om infrastruktur hämtas från Trafikverket (Trafikverket, 2020)
- Data om känsliga miljöer eller förorenade områden hämtas från Länsstyrelser
- Indelning i markanvändning fås från CORINE databas (European Environment Agency, 2017)
- Högupplöst hydrografisk information hämtas från God Hydrografi (Lantmäteriet, 2021)

Den rådata som används till indata har således stor inverkan på modellresultatet (Alpford-Wylde & Girons-Lopez, 2022).

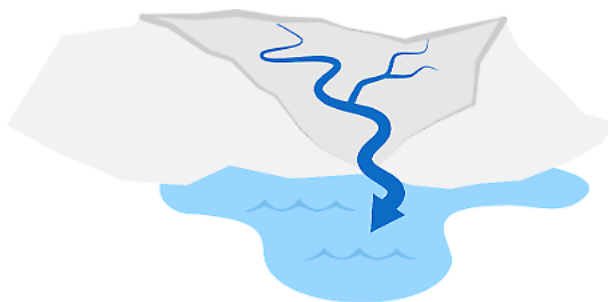
### 3.3.1 Hydrologiskt underlag

En viktig parameter i översvämningsmodelleringen är det hydrologiska underlaget i form av flödet, den mängd vatten som rinner genom vattendraget ( $m^3/s$ ). Det är ofta angivet i återkomsttid, det antal år det i genomsnitt tar för ett flöde av den angivna storleken att inträffa eller överträffas. Med andra ord anger återkomsttiden sannolikheten att ett visst flöde, eller större, ska inträffa. Ett flöde med en återkomsttid på 100 år har 1 % sannolikhet att inträffa under ett enskilt år. Viktigt att ta hänsyn till vid exempelvis samhällsplanering är dock att när man ser över en längre tidsperiod är sannolikheten ackumulerad, alltså är sannolikheten att ett 100-årsflöde inträffar eller överträffas under en tidsperiod på 100 år 63 % och sannolikheten att det inträffar eller överträffas under en 1 000-årsperiod är 100 % (Tabell 2) (MSB, 2014).

**Tabell 2:** Ackumulerad sannolikhet (%) för att några vanliga återkomsttider ska inträffa eller överträffas, utvärderat för några vanliga tidsperioder, data från MSB (2014). Tabellen läses som att för vald återkomsttid i vänstra kolumnen, för vald utvärderad tidsperiod på översta raden, erhålls ackumulerad sannolikhet att återkomsttiden inträffar eller överträffas, där vald rad och kolumn möts i tabellen

Återkomsttid (år)	Utvärderad tidsperiod (år)				
	10	20	50	100	1 000
10	65	88	99	100	100
50	18	33	64	87	100
100	10	18	39	63	100
1 000	1	2	5	10	63

Flödesmängden för en viss återkomsttid beräknas i den hydrologiska modellen S-HYPE som tillhandahålls och utvecklas av SMHI (SMHI Kunskapsbanken, 2022). I S-HYPE beräknas flöden i avrinningsområden, det vill säga avgränsade områden där vattnet flödar ned i ett och samma vattendrag. Avrinningsområdet begränsas ofta av vattendelare i form av höjdryggar (figur 5). Avrinningsområdena kan i sin tur delas i olika delavrinningsområden och flödesdata kan hämtas specifikt för dessa i S-HYPE. Som indata i S-HYPE används nederbörd och lufttemperatur från den meteorologiska prognosen på SMHI och som utdata ges ett utflöde av vatten från hela avrinningsområdet eller delavrinningsområdet. I LISLFLOOD-FP simulerar SMHI i dagsläget ett konstant inflöde under hela simulerade tidsperioden (Alpford-Wylde & Girons-Lopez, 2022).



**Figur 5:** Schematisk bild över ett avrinningsområde ©SMHI.

Omfattningen av konsekvenserna efter en översvämningskatastrof kan variera beroende på dess utsträckning, som i sin tur beror till stor del av flödet, men också på antalet objekt som potentiellt kan påverkas. Därför kan man med flödesmodellering både undersöka översvämningskatastrofer vid låga återkomsttider, alltså hög sannolikhet men mindre omfattande konsekvenser, respektive längre återkomsttider som har lägre sannolikhet men ofta större konsekvenser. För just samhällsplanering är även de längre återkomsttiderna relevanta eftersom den planerade stadsdelen, byggnaden eller infrastrukturen ska kunna stå i många år framöver (MSB, 2014).

### 3.3.2 Randvillkor

Hur ett modelleringsområde ska avgränsas avgörs i SMHI:s översvämningsmodellering av motsvarande delavrinningsområde i S-HYPE. I SMHI:s uppsättning av LISLFLOOD-FP finns endast de större och mer betydande vattendragens delavrinningsområden, med en uppströms area på minst  $50 \text{ km}^2$ , modellerade och



övriga ingår inte i modellen. Dessutom krävs att avrinningsområdet inte domineras av sjöar, i sådana fall används istället en annan modell som är anpassad för just sjöar, en så kallad lågpunktsmodell, Outlet lake (Olake). Delavrinningsområdet buffras med en sträcka på 3000 m. Detta görs för att modellens kanter ses som oändligt höga av vattnet vilket kan skapa onaturliga vattenvägar om kanterna är satta precis intill avrinningsområdet. Därtill flyttas också närmaste vattenyta, sjö eller hav, nedströms så att avståndet är minst 10 000 m för att undvika att vattnet rinner tillbaka in i modellområdet. Dessa säkerhetsmarginaler tas bort när modelleringen är gjord så att endast resultatet av ursprungliga området erhålles (Alpford-Wylde & Girons-Lopez, 2022).

För översvämningssmodeller beskriver randvillkoren de förutsättningar som gäller för modellens in- och utflöde. Det inflödande vattnet kan väljas till önskad återkomsttid som simuleras i SMHI:s hydrologiska modell S-HYPE för punkten vid utflödet till det aktuella vattendraget. Utflödet enligt S-HYPE tillämpas sedan som inflöde till LISFLOOD-FP. Nedströms randvillkor sätts ofta som en vattennivå i en sjö eller bassäng som utgående vatten kan flöda till. Ytterligare randvillkor kan vara in- och utflöden från bifåror, men de bortses ifrån i SMHI:s uppsättning eftersom in- och utflöde förväntas vara detsamma. Dessa randvillkor lägger tillsammans grunden för ett så kallat översvämningsscenario (MSB, 2014; Alpford-Wylde & Girons-Lopez, 2022).

### 3.3.3 Höjddata

Höjddata, det vill säga information om hur landskapet och bottenformen ser ut är viktiga delar i en översvämningssmodell. Man kan även ta hänsyn till vilka eventuella byggnader, broar eller dammar som finns i och omkring vattendraget. Höjddata används i form av ett raster där varje ruta har ett höjdvärde, en digital höjddata (DEM). I LISFLOOD-FP flödar sedan vattnet genom höjddata där ett värde för djup och flödes hastighet kan ges för varje ruta i höjddata. Det går alltså inte att få högre slutlig upplösning i översvämningssmodelleringen än höjddata och således är höjddata upplösning avgörande (MSB, 2014). Höjddata kan för kartering i Sverige hämtas från Lantmäteriet, som har hög upplösning och en noggrannhet på 0,1 m i höjddata och 0,3 meter i planet (Lantmäteriet, 2022b). För att få mer fullständiga data om omgivningens utseende kan även vägbankar, översvämningssvallar och andra detaljer läggas in i höjddata (MSB, 2014).

I SMHI:s uppställning av modellen används höjddata i form av en DEM som hämtas från Lantmäteriet (Alpford-Wylde & Girons-Lopez, 2022). Lantmäteriets höjddata finns tillgängligt via internettjänsten Markhöjddata Nedladdning och är rikstäckande. Det grid med en meters upplösning som finns att ladda ned, interpoleras genom en stegvis bilinjär interpolation till önskad upplösning. Data lagras i en pyramid med pixelstorlekar som utöver 1 meter även innehåller höjddata med lägre upplösning i storlekarna  $2^x$  för någon exponent  $x$  upp till 4096 meters upplösning (Lantmäteriet, 2022c). SMHI tillämpar i dagsläget en upplösning på fem meter (Alpford-Wylde & Girons-Lopez, 2022).

### 3.3.4 Bottendata

Information om vattendragets botten är också av stor vikt för modellen. Sådan data kan tas fram genom att kartera botten med ekolod för att modellera den verkliga bottengeometrin, alternativt tillämpa någon geometrisk förbestämd form eller beräknings samband istället för att använda mätdata (MSB, 2014). I Sverige saknas data för bottenform och broar för de flesta vattendrag och det finns inte heller en nationell databas med befintlig data. I SMHI:s modell antas därför vattendraget ha en rektangulär form för att kringgå bristen på data från bottenkarteringar, vilket möjliggör modelleringen (figur 4). Vidare antas att vattendraget är betydligt längre än det är brett (Alpford-Wylde & Girons-Lopez, 2022). Detta innebär dock en osäkerhet eftersom det är en grov förenkling av verkligheten i många fall som delvis men inte helt kan kompenseras i modellkalibreringen.

Speciella föremål som dammar och broar kan vara särskilt viktiga att få med i en hydraulisk modell eftersom de påverkar flödet i hög utsträckning. Vid en bro kan vattendraget inte heller svämma över. Data över dessa kan antingen erhållas från Trafikverkets bro- och tunnelförvaltningssystem, hos kommunen eller privata ägare. Viktigast att inkludera är hur brokonstruktionen är utformad och hur bred bron är i vattendragets flödesriktning. Dammar behöver å andra sidan beskrivas mer detaljerat eftersom de har större påverkan på flödet. Uppgifter om dammar finns hos den som äger dammen, och de viktigaste aspekterna är dammens mått och utformning samt tröskelnivåer. Vidare är det väsentligt att ta reda på relationen mellan vattennivån

i dammen och det utflödande vattnet från utskoven. För hydraulisk modellering i en dimension placeras tvärsektionerna med fördel just före och efter dammar för bästa modellresultat (MSB, 2014).

Flodfårans djup i den rektangulära kanalen beräknas i SMHI:s Pythonkod som anropar LISFLOOD-FP utifrån ett empiriskt samband som tagits fram med en metodik från Leopold & Maddock (1953) (ekvation 6).

$$h = 0.655 \times Q^{0.317} \quad (6)$$

Där  $Q$  ( $m^3/s$ ) är flödet. Djupet  $h$  ( $m$ ) antas vara konstant i modellen för hela den modellerade sektionen, oavsett om nya flodgrenar tillkommer eller inte. Data om flodfårans bredd hämtas primärt från Lantmäteriet om det finns tillgängligt för vattendraget i fråga. I annat fall beräknas bredden på vattendraget som ett medelvärde utifrån längd och area (ekvation 7).

$$\bar{b} = \frac{l}{A} \quad (7)$$

Där  $b$  ( $m$ ) är bredden,  $l$  ( $m$ ) är längden och  $A$  ( $m^2$ ) är arean, med tillgänglig data för area och längd inom det modellerade området. I andra hand beräknas vattendragets genomsnittliga bredd med ett hydrauliskt samband (ekvation 8).

$$\bar{b} = 10.909 \times Q^{0.461} \quad (8)$$

Där  $Q$  ( $m^3/s$ ) är flödet. Detta samband ger dock sämre resultat (Alpford-Wylde & Girons-Lopez, 2022).

### 3.3.5 Manningstal

Manningstal är en konstant som anger friktionen mellan vattnet och en yta och används vanligen för att beräkna flöden inom hydraulik. Talet beräknas vanligen i Mannings formel (ekvation 9).

$$V = R^{2/3} \frac{\sqrt{\sin(a)}}{n} \quad (9)$$

Där  $V$  är vattnets medelhastighet,  $R$  är vattnets tvärsnittsarea dividerat med den våta perimetern, och  $a$  är vattnets lutningsvinkel.  $n$  är manningstalet (Nationalencyklopedin, u. å.[a]). I SMHI:s uppsättning av LISFLOOD-FP antas manningstalet vara konstant för olika markanvändning på översvämningssytan (tabell 3). Lågst manningstal är satt för stadsmiljö och jordbruksmark. För skog och byggnader sätts manningstalet högre. Detta kan tolkas som att friktionen mellan vattnet och dessa ytor är större, vilket delvis beror på att vattnet behöver hitta vägar runt hus och växter som ger turbulenseffekter (Alpford-Wylde & Girons-Lopez, 2022).

**Tabell 3:** Manningstal som tillämpas i SMHI:s översvämningssmodellering för olika typer av ytor. Data hämtad från Alpford-Wylde & Girons-Lopez (2022), baserat på Acrement & Schneider (1984) och Chow (1959).

Markanvändning	Manningstal
Skog	0,15
Jordbruksmark	0,03
Stadsmiljö	0,02
Byggnader	0,20

Manningstalet för flodfåran är i SMHI:s uppsättning initialt satt till 0,033 men kalibreras sedan i modellen. Samtliga manningstal påverkar vattnets flöde i LISFLOOD-FP genom att reglera vattenhastigheten och rörelsen mellan olika typer av ytor (Alpford-Wylde & Girons-Lopez, 2022; Acrement & Schneider, 1984).

### 3.4 Kalibrering av modellen

Kalibreringen är ett sätt att till viss del kompensera för alla de förenklingar som görs i en hydraulisk modell. För att få relevanta modellresultat behöver modellen kalibreras mot mätvärden i form av uppmätta vattennivåer och motsvarande flöden. De uppmätta vattennivåerna kan antingen tas direkt från mätdata av vattenståndet om sådan data finns, eller uppskattas från flygfoton. I kalibreringsprocessen tillämpas samma flöden, det vill säga randvillkor uppströms, som mätvärdena och modellresultatet jämförs med uppmätta vattennivåer (MSB, 2014). För att dessa ska stämma överens justeras markens råhet i flodfåran genom Manningstalet som i SMHI:s uppsättning initialt är satt till 0,033. Kalibreringen i SMHI:s uppställning av LISFLOOD-FP genomförs för ett lågt flöde vid en tidpunkt. Processen är automatisk och genomförs med hjälp av en Pythonkod. Metoden ger även möjlighet att kvantifiera modellfelet (Alpford-Wylde & Girons-Lopez, 2022).

### 3.5 Osäkerheter i modellen

På grund av de antaganden och begränsningar som finns, både i SMHI:s uppsättning av LISFLOOD-FP genom Pythonkoden samt i själva LISFLOOD-FP, medföljer osäkerheter i modellen. Några av de ovan nämnda anpassningarna har gjorts och kan göras genom val av indata för att minska osäkerheterna, men det finns fortsatt brister med modellen, däribland att användningen av LISFLOOD-FP är begränsad till då tillräcklig data finns att tillgå. Det innebär definierade randvillkor, främst i form av in- och utflöde av vatten, samt höjdmodellens kvalitet. Det krävs också att man känner till något om bottengeometrin (Trigg m. fl., 2013). Denna data fås i SMHI:s uppsättning främst genom några speciella antaganden och genom beräkningar.

Det finns fyra typer av modellosäkerheter som bidrar till den totala osäkerheten i modelleringen. Dessa kommer enligt Willis m. fl. (2019) från:

- indata, däribland hydrologiskt underlag och höjdmodell
- parametrar, däribland manningstal
- modellstrukturen, konstruktionen av LISFLOOD-FP
- modellvalideringen, exempelvis metodval för att validera modellresultatet

#### 3.5.1 Hydrologiskt underlag

När det gäller flödesdata till modellen, antas inflödet motsvara utflödet från vattendragets avrinningsområde enligt S-HYPE. Detta innebär att man förbiser alla eventuella biflöden till vattendraget eftersom flödesmängden blir densamma i hela den modellerade flodfåran. Man antar också att inflödet är konstant under en tidsperiod på minst 30 000 simulerade sekunder. När in- och utflödet är tillräckligt lika och översvämningsytan inte längre ändras, stannar simuleringen. Detta antas vara uppfyllt om in- och utflöde skiljer sig med mindre än 2 % samt om ytan ändras sig mindre än 0,03 % mellan två tidssteg. Maximal simuleringstid är 500 000 sekunder, motsvarande ungefär 140 timmar. Att flödet är konstant under så lång tid kan leda till fel och problem med modellen. Dels medförs en risk för fel i avrinningsområden med liten lutning eftersom vattnets väg blir svårare att modellera då det lika gärna kan spilla ut över kanterna som att flöda vidare ned i flodsystemet. Ett konstant högt flöde under simuleringstiden kan ge såpass mycket vatten att översvämningen kraftigt överskattas. Dels krävs endast en liten vattenvolym för att skapa en stor översvämning över en flack yta, vilket innebär att en flödestopp på 140 timmar också kan ge kraftigt överskattade översvämnningar i jämförelse med en verklig, betydligt snabbare flödestopp. Fel kan också uppstå vid typer av översvämnningar där flödets utveckling över tid är viktigt, exempelvis vid skyfall eller kraftigt regn när flödestoppen är avgörande för översvämningen, samt vid vårflod då istället totala volymen orsakar översvämning. För utlopp antas två olika varianter beroende på förutsättningarna. För de vattendrag som mynnar ut i en sjö eller ett hav används vattenytan som randvillkor. För andra vattendrag antas en förlängning av vattendraget med samma lutning i 10 km nedströms som låter vattnet passera nedåt i systemet (Alpford-Wylde & Girons-Lopez, 2022).

Eftersom den hydrauliska modellen kalibreras efter tillgänglig mätdata, är kvaliteten och tillgången till sådan en viktig faktor. För flödesdata behövs representativa data som mätts i relevant mätperiod i

förhållande till den återkomsttid man valt att arbeta med. Eftersom det hydrologiska underlaget har en betydande effekt på översvämningskarteringen kan befintlig data behöva kompletteras genom ytterligare bottenkartering, mätningar av vattennivån samt flödesmätningar. Därtill kan noggrannare mätning av dammar och broar minska osäkerheter i modellen (MSB, 2014).

### 3.5.2 Höjdmmodell

Vilken utbredning i översvämningsyta som motsvaras av beräknad vattennivå beror till stor del på topografin kring flodfåran. Därför innebär beräkningen av översvämningsutbredningen också att osäkerheter byggs in i modellresultatet. Dessa uppstår främst på grund av osäkerheter i använd höjddata, som dels består av mätosäkerhet. Lantmäteriets höjdmmodell har dock noggrannheten 0,1 m i höjddled och 0,3 meter i planet, vilket leder till särskilt stora risker för felaktiga modellresultat vid flackare terräng. Dels består den av osäkerheter som orsakas av förenkling och interpolation beroende på val av upplösning och interpolationsmetod. Upplösningen handlar dels om avståndet mellan tvärsnitterna i vattendraget för endimensionella hydrauliska modeller och dels om rutnätets storlek på höjdmodellen i tvådimensionella modeller. Den digitala höjdmodellen (DEM) är alltid en förenkling av verkligheten och därav finns alltid ett inbyggt fel i modellen kopplat till höjddata. I princip innebär dock en högre upplösning en mer korrekt höjdmmodell och således ett mer riktigt modellresultat (MSB, 2014; Lantmäteriet, 2022b).

### 3.5.3 Fel- och känslighetsanalys

Kalibrering är ett sätt att kompensera för skillnader mellan modellresultat och uppmätt data. Skillnaden kan också ses som osäkerheten i modellresultatet och kan uttryckas i ett felintervall. Vanligtvis har felintervallet en storleksordning på meternivå men kan minskas genom kalibreringen till decimeternivå. Feluppskattningen gäller dock bara för punkter där modellen kalibrerats mot mätdata och dessutom bara för de flöden som modellen kalibrerats mot. I övriga punkter och för övriga storlekar på flöde är felmarginalen okänd. Osäkerheten kan därför skattas mer generellt genom en känslighetsanalys, vilket innebär att modellkänsligheten testas och utvärderas med avseende på varje parameter, däribland Manningstal och flödet. Detta görs genom att införa små ändringar för respektive parameter och utvärdera skillnaden i modellresultatet. På så sätt visas dels vilken eller vilka parametrar som påverkar resultatet mest, dels i vilken utsträckning modellresultatet kan variera (MSB, 2014).

Vid simulering mäts felet i termer av ett flödesfel och ett volymfel. Dessa härstammar ur lösningen på Navier-Stokes ekvationer om massans och momentets bevarande (ekvation 1 och 2). I den verkliga världen ska lösningarna för dessa två stämma överens med varandra, i annat fall är det fysikaliskt omöjligt och LISFLOOD-FP ger information om volym- och flödesfel. I modellen är dessa fel dock inte alltid noll men ska helst ligga i närheten för att simuleringen ska betraktas som lyckad (Gasiorowski & Szymkiewicz, 2007).

## 3.6 Bearbetning av modellresultat

Ofta illustreras översvämningsmodelleringen på kartor, så kallade översvämningskarteringar. En visuellt tydlig bild kan vara avgörande för beslutsfattare inom samhälls- eller beredskapsplanering. Kartorna skapas genom att bearbeta modellresultaten i ett GIS-program (MSB, 2014). Modellresultatet används av SMHI:s prognos- och varningstjänst för att utfärda varningar beroende på översvämnings omfattning (Alpford-Wylde & Girons-Lopez, 2022).

### 3.6.1 Klassificering av varningar - tolkning av utdata

Skadorna av en översvämnings beror som tidigare nämnt på översvämnings omfattning, men även på andra aspekter i det område som drabbas. Bostäder, viktig infrastruktur och farlig verksamhet som påverkas av översvämnings leder till större kostnader och risker i samhället än när obebodd mark utan infrastruktur översvämmas. För översvämningsvarningarna finns därför olika klassificeringar av varningar som beror av översvämningsdjup samt vad som finns på den översvämmade ytan, även kallat konsekvensbaserade varningar (Alpford-Wylde & Girons-Lopez, 2022).

Kriterierna för de konsekvensbaserade varningarna har blivit utformade i samarbete med räddningstjänsten och länsstyrelser i Sverige och har till syfte att indikera konsekvensernas omfattning. Översvämningarna finns initialt i klasserna orange och röd i en skala från minsta påverkan till största och de utfärdas beroende på förväntad påverkan på bland annat hus, vägar, järnvägar eller jordbruksområden. För röd varning krävs till exempel att mer än fem byggnader drabbas av ett översvämningdjup på minst 30 centimeter. För den orangea varningen krävs däremot att mellan två och fem byggnader med mindre än 200 meter mellan varandra drabbas av en översvämning med ett djup på mindre än 30 centimeter, eller att mer än fem byggnader drabbas av en översvämning mindre än 30 centimeter (Tabell 4) (Alpford-Wylde & Girons-Lopez, 2022).

**Tabell 4:** Kriterier för utfärdande av översvämning varningar vid översvämning av byggnader. Data från Alpford-Wylde & Girons-Lopez (2022)

Varningsklass	Kriterium för byggnader	Översvämningdjup
Orange	2-5 byggnader, < 200 m mellan varandra	< 30 cm
Röd	> 5 byggnader	> 30 cm

Vid översvämning av vägar gäller istället att den orangea varningsnivån utfärdas då regionala vägar drabbas medan den röda varningen utfärdas då nationellt viktiga vägar såsom motorvägar översvämmas (tabell 5) (Alpford-Wylde & Girons-Lopez, 2022).

**Tabell 5:** Kriterier för utfärdande av översvämning varningar vid översvämning av vägar. Data från Alpford-Wylde & Girons-Lopez (2022)

Varningsklass	Översvämmad vägtyp
Orange	Regional väg
Röd	Nationell väg

För övriga kriterier hänvisas till SMHI. Vid utfärdande av en varning diskuteras också modellresultatet med drabbad länsstyrelse för att i samrådan ha en dialog kring förväntade konsekvenser av den prognostiserade översvämningen (Alpford-Wylde & Girons-Lopez, 2022).

### 3.6.2 Modellvalidering

Modellvalidering och validering av resultat är ett komplext ämne. SMHI har idag inget standardiserat sätt för att validera modellresultatet och resulterande varningar, delvis på grund av avsaknad av data från tidigare översvämningar (Alpford-Wylde & Girons-Lopez, 2022). En metod för att validera översvämningar är dock att jämföra med satellitdata från ett översvämningstillfälle liksom i studien av Rajib m. fl. (2020). Detta innebär dock att man med denna metod endast kan validera modellresultat på platser där satellitdata från tidigare översvämningar finns. Vidare innebär metoden att modellresultatet endast kan valideras om man modellerat för samma återkomsttid som uppmättes vid just det översvämningstillfället, som diskuteras av Rajib m. fl. (2020) i rapporten som beskrivs mer detaljerat under avsnitt om aktuell forskning (avsnitt 3.7).

Satellitbilder kan hämtas från Copernicus, ett projekt som förvaltas av EU-kommissionen och har till uppgift att observera jorden på ett sätt som kan komma till nytta för planet och människor (Copernicus, 2022). Myndigheten för samhällskydd och beredskap (MSB) har möjlighet att aktivera Copernicus satelliter vid händelser, och får då satellitbilder och annan relevant information. Detta gjordes bland annat under branden i Västmanland 2018 samt vid ett antal översvämningstillfällen. Denna data finns att hämta på webbplatsen för MSB:s aktivering av Copernicus (MSB, u. å.). Aktiveringen av Copernicus vid översvämningar kan ge information om översvämningens spridning och djup. Ytan tas fram utifrån fotografier över området och vattendjup beräknas i vissa fall med hjälp av en höjdmödel. Informationen har ett positionellt medelfel på 6,5 meter och över 85 % säkerhet att avgöra översvämningstyporna och olika upplösning för olika slutprodukter. Dessa osäkerheter kan tillsammans vägas till en större osäkerhet som dock inte är kvantifierad (European Union, 2022).

### 3.7 Aktuellt forskningsläge om höjddata i översvämningsmodellering

Nedan följer referat av några relevanta rapporter och artiklar inom forskningsområdet som återspeglar olika metoder och avgränsningar för studier av översvämningsmodellering. Avsnittsrubrikerna motsvarar rapporternas och artiklarnas titlar.

#### 3.7.1 Betydelse av höjddata modellers kvalitet vid endimensionell översvämningsmodellering

Studien som genomfördes av Brandt (2009) hade bland annat till syfte att undersöka hur upplösningen på höjddata påverkade översvämningsutbredning i modellen HEC-RAS, en endimensionell översvämningsmodell. Studien var en fallstudie där två platser längs Eskilstunaån undersöktes, varav den ena något flackare i terrängen och den andra mer kuperad (USACE Hydrologic Engineering Center, 2022). Hur kuperad terrängen var bedömdes genom vattendragets lutning. I undersökningen användes SMHI:s högsta beräknade flöde. För att kunna jämföra översvämningsens utbredning beroende av höjddata, kördes modellen med de olika cellstorlekarna varpå polygoner med vattentäckta områden skapades i Arc-View GIS via en TIN-modell (triangulated irregular network). Den totala arean av översvämmad yta beräknades för samtliga körningar av modellen med olika höjddata och jämfördes. Därtill beräknades skillnaden mellan strandlinjens placering för de olika höjddata och jämfördes. Resultaten visade att mer högupplöst data inte gav någon betydande skillnad i vattenstånd, men påverkade vattnets utbredning i terrängen på flodbanken. Störst skillnad erhöles för flackare terräng mellan högre och lägre upplösning på höjddata. Enligt studien krävdes dock cellstorleken 50 meter för att någon märkbar förändring i vattendragets bredd skulle visas. För översvämningsutbredningen gav lågupplöst höjddata bredare tvärsektioner men mindre utbredning. I detta fall var skillnaden mellan utbredningen för olika upplösning störst för den flackare terrängen. Själva höjddatamodellen skilde sig mest för det mer sluttande området mellan de olika upplösningarna. I resultaten visades också att största osäkerhet i strandlinjen fanns där vattendragets lutning övergick från brant till flackare sluttning mot flodfåran. Skillnaden i resultatet som följde av förändrad cellstorlek på höjddata visade sig också motsvaras av skillnaden då manningstalet för flodfåran ändrades. Vidare konstaterades att även kornstorlek och annan data kan inkluderas för att minska osäkerheten i modellen (Brandt, 2009).

#### 3.7.2 Understanding the effects of digital elevation model resolution and building treatment for urban flood modelling

Fallstudien av Jiang m. fl. (2022) gjordes på en stad i sydöstra Kinas kustregion uppe i bergen och hade till syfte att undersöka effekten av höjddatamodellens upplösning på översvämningsmodelleringens resultat i modellen FLO-2D, en tvådimensionell översvämningsmodell, samt HEC-RAS, en endimensionell modell för flodfåran (FLO-2D software inc., 2021; USACE Hydrologic Engineering Center, 2022). I studien undersöktes även bottengeometris och byggnaders inverkan. Detta för att undersöka optimal upplösning på höjddatamodellen för modellering av blixttöversvämning i staden, orsakat av exempelvis skyfall, och översvämningsområden som sprider sig över flodbädden från ett vattendrag. För modellvalideringen användes ett medelfel, Root Mean Square Error (RMSE) (ekvation 10).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (D_i^s - D_i^b)^2}{N}} \quad (10)$$

Där  $RMSE$  blir minsta kvadratfelet,  $D_i^s$  är maximalt simulerat översvämningsdjup,  $D_i^b$  är maximalt uppmätt översvämningsdjup och  $N$  antalet datapunkter. För att kvantifiera kvaliteten på de spatiala resultaten, tillämpades ett index, fit (FI) (ekvation 14):

$$FI = \frac{A_p \cap A_r}{A_p \cup A_r} \times 100\% \quad (11)$$

Där  $A_p$  är modellerad översvämningsarea och  $A_r$  den uppmätta översvämningsarean.  $FI$  anger hur väl dessa överensstämmer i procent (%).

För fallstudien visade resultaten att lägre upplösning på höjddatamodellen fick olika effekt på översvämningsmodelleringen för de två fallen. För de urbana blixttöversvämningsområdena underskattades översvämningsdjupet. Särskilt när upplösningen blev lägre än storleken på hus och byggnader, blev precisionen sämre. I artikeln diskuteras detta som en effekt av hur byggnader hanteras i modellen, speciellt för lägre upplösning. För översvämningsområden som härstammar från ett vattendrag, visade resultaten å andra sidan att en lägre upplöst

höjdmodell gav en överskattning av översvämningarna, vilket kan bero på att flodfårans geometri ändras vid låg upplösning. I studien rekommenderas därför en cellstorlek som är mindre än flodfårans bredd (Jiang m. fl., 2022).

### 3.7.3 A New Automated Method for Improved Flood Defense Representation in Large-Scale Hydraulic Models

Studien av Wing m. fl. (2019) genomfördes med syfte att undersöka en metod för att undkomma de problem som uppstår vid stor cellstorlek på höjddata, eftersom det resulterar i en för utsmetad höjdmodell. Den föreslagna metoden i studien var att hitta relevanta topografiska aspekter i landskapet, i detta fall dämmande strukturer, som sedan sparades för att läggas på den utjämnade höjdmodellen. Metoden gav förbättrade översvämningssimuleringar, främst i områden där dämmande strukturer jämnats ut i den grövre höjdmodellen. Resultaten för de två storskaliga fallstudierna fick en precision nära översvämningssimulering i liten skala, vilket är högre. Nackdelen med metoden är dock att mycket detaljerad höjddata behöver vara tillgänglig, vilket inte är fallet för större delen av jorden. Vidare betonas också att alla dämmande strukturer som plockas fram med metoden inte är designade som översvämningsskydd och därför inte med säkerhet håller under tryck från översvämmande vatten. Slutligen konstateras att metoden också kräver att höjdmodellen har en cellstorlek mindre än 10 m för att ge effekt (Wing m. fl., 2019).

### 3.7.4 Detaljerad översvämningsskartering för Eskilstunaån

SMHI genomförde en detaljerad översvämningsskartering för en sträcka på 23 km längs Eskilstunaån och jämförde med en översiktlig skartering gjord av SMHI vid tidigare tillfälle, samt med en detaljerad skartering gjord av räddningstjänsten. För undersökningen användes den endimensionella modellen MIKE11. Som indata användes bottendata från ekolodning och höjddata från laserskanning. För att skapa översvämningsskartorna, beräknades först 100-årsflöde och beräknat högsta flöde. Vattennivån beräknades sedan för varje tvärsektion vid respektive flöde. Slutligen beräknades översvämningssytan genom att låta vattnet breda ut sig över höjdmodellen. För att jämföra den detaljerade och den översiktliga översvämningsskarteringen, plottades vattendjupet mot sträckan längs hela vattendraget för de två skarteringarna. Skillnaden i vattendjup beräknades. För att jämföra översvämningssytan, ritades de in för respektive modell i samma översvämningsskarta för överblick och översvämningssytorna beräknades och jämfördes kvantitativt. Resultatet visade stora skillnader mellan den detaljerade och översiktliga skarteringen, till följd av skillnader i använd höjddata (Yacoub m. fl., 2005).

### 3.7.5 Towards a large-scale locally relevant flood inundation modeling framework using SWAT and LISFLOOD-FP

I studien av Rajib m. fl. (2020) tillämpades en metod för modellvalidering med hjälp av satellitbilder på tidigare översvämningar. Dessa hämtades från Landsat för valt datum och valdes på områden med olika topografi och markanvändning. I ArcGIS undersöktes översvämningssytan på bilderna i RAW-format genom att först dela upp bilden i olika polygoner utefter markanvändning och sedan använda maximum likelihood för att bedöma översvämningssytan. Översvämmade områden omvandlades också till polygoner för att jämföra med modellresultat. I rapporten diskuteras nackdelar med metoden. Dels finns risken för molntäcke vid valda dagar och tidpunkter vilket förhindrar analysen. Dels stämmer inte alltid bildernas tid med modellutdata, eftersom de är ögonblicksbilder medan modellen ger ett genomsnitt över en viss tidsperiod. Dessa problem undveks genom att välja valideringstillfällen när molnfria satellitbilder fanns att tillgå samt att översvämningen i sin helhet varade flera dagar.

För att jämföra översvämningssytorna användes i studien två index, varav det ena för fit och det andra correctness (ekvation 12 och 13):

$$F = \frac{A_{rm}}{A_r + A_m - A_{rm}} \quad (12)$$

$$C = \frac{A_{rm}}{A_r} \quad (13)$$

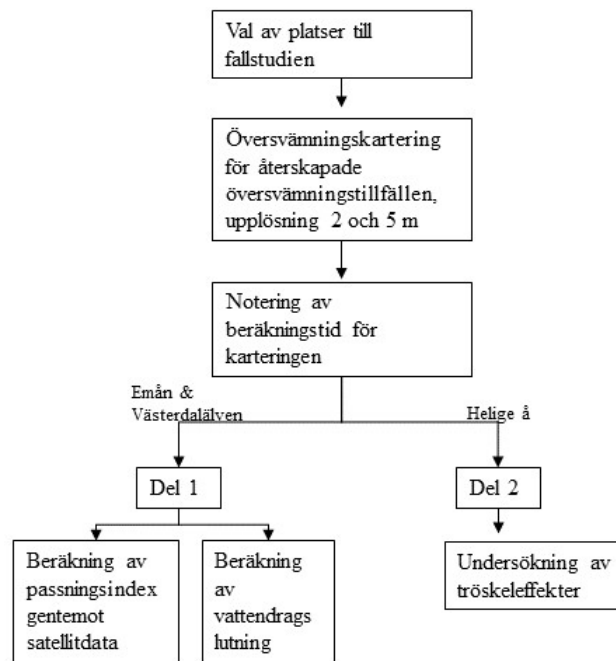
Där  $F$  och  $C$  är index för passning respektive precision,  $A_r$  är arean av översvämningssytan på satellitbilderna,  $A_m$  den modellerade översvämningssytans area och  $A_{rm}$  den överlappande ytan. Både  $F$  och  $C$  kan anta värden mellan 0 och 1. När  $F = 1$ , motsvarar satellitbilden och modellresultatet varandra till 100 %, och

lägre värden på  $F$  indikerar att det finns skillnader i form av antingen över- eller underestimering.  $C$  visar istället hur stor del av översvämningytan från satellitbilderna som också modelleras. Detta innebär enligt artikeln att om  $C = 1$ , täcks hela översvämningytan från satellitbilderna av modellresultatet, men det säger inget om vilka andra ytor som eventuellt också täcks av modellens resultat (Rajib m. fl., 2020).



## 4 Metoder

För att uppfylla studiens syfte att utreda nyttan med implementering av en höjdmodell med högre upplösning, genomförs översvämningskartering med olika höjdmodeller för olika modellområden i en fallstudie. I metoden används LISFLOOD-FP i SMHI:s egen uppsättning med de antaganden och begränsningar som nämnts i avsnitt 3. Data hämtas från källor listade under avsnitt 3.3. Metoden består av två delar. I första delen undersöks hur översvämningsmodelleringens precision påverkas av höjdmodellens upplösning genom att jämföra översvämningskartor mot satellitdata. Vidare undersöks vattendragsslutningen för att eventuellt upptäcka ett samband. I undersökningen återskapas två tidigare översvämningsstillfällen, dels i Emån och dels i Västerdalälven. I den andra delen av studien undersöks istället tröskeleffekter genom att analysera hur vatten flödar kring skyddsvallar i översvämningsmodelleringen. I den delen av studien återskapas ett översvämningsstillfälle i Helige å (figur 6). Resultaten från del 1 och 2 vägs sedan mot en eventuell skillnad i beräkningstid mellan de två upplösningarna för att besvara frågeställningen om det är gynnsamt att implementera den högre upplösta höjdmodellen i SMHI:s översvämningsmodeller.



**Figur 6:** Schematisk bild över metodens steg och uppbyggnad

Samtliga kartor i rapporten är skapade med Topografiska webbkartan och Ortofoto färg, 0,5 m ©Lantmäteriet.

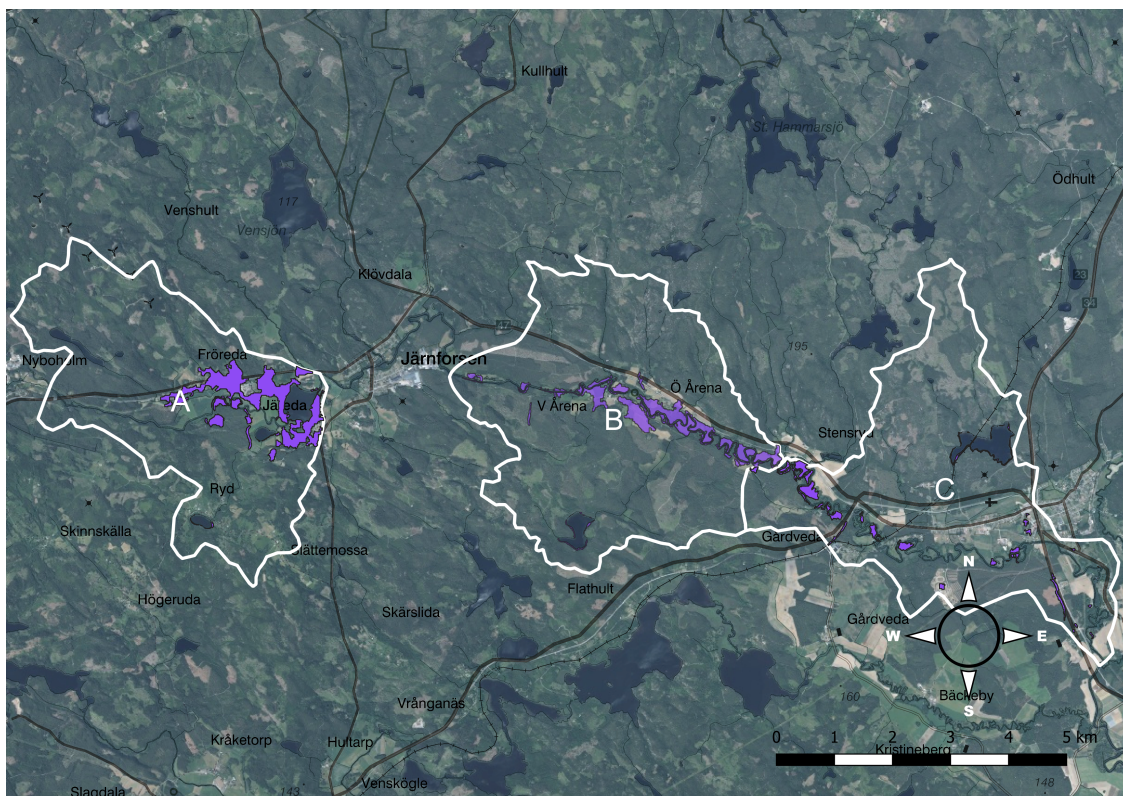
### 4.1 Platser för fallstudien

I fallstudien undersöks tre studieområden med tidigare översvämningsstillfällen; Emån i Småland, Västerdalälven i Dalarna och Helige å i Småland. För varje studieområde väljs tre stycken delavrinningsområden, som modelleras separat i LISFLOOD-FP. För att välja specifika delavrinningsområden till fallstudien, undersöks vilka som har hög modellkvalitet enligt SMHI:s tidigare tester. Områden med sämre kvalitet eller utan underlag är under utveckling och används därför inte i denna studie. Modellkvaliteten har dock utvärderats för modeller konstruerade på höjdmodeller med en tidigare interpolationsmetod och med fem meters upplösning.

De två första studieområdena, Emån och Västerdalälven, väljs med syfte att besvara frågeställningen om huruvida vattendragets lutning har relevans vid val av upplösning på höjdmodellen, eftersom de två studieområdena förväntas ha olika lutning i terrängen. Vidare bedöms det eventuellt förbättrade modellresultatet på ett kvantitativt sett, vilket möjliggörs av tillgänglig valideringsdata i form av satellitdata från Copernicus. Upplösningen för satellitdata från Emåns översvämningsstillfälle var  $2,1 - 4,6 \times 2,8$  meter, medan den från Västerdalälven var  $10 \times 10$  meter (European Union, 2012; European Union, 2018). Det tredje studieområdet, Helige å, väljs för att undersöka tröskeleffekter vid den högre upplösningen med avseende på översvämningsvallar.

#### 4.1.1 Emån

I Emån förekom en översvämning under sommaren 2012 till följd av kraftig nederbörd i området som påverkade både Emåns huvudfåra samt andra vattendrag i närheten (Sporrong, 2012). MSB aktiverade Copernicus vid tillfället som fotograferade området 9 juli 2012 klockan 12:59. Från Copernicus hämtas valideringsdata i form av GIS-datalager med polygoner för översvämmad yta, beräknad utifrån satellitbilderna och erhållen från MSB (u. å.) De delavrinningsområden med god modellkvalitet som väljs i området är placerade längs Emån innan den rinner samman med Silverån. Längst uppströms ligger delavrinningsområde A väster om Järnforsen. Öster om Järnforsen ligger de andra två delavrinningsområdena B och C. Bortom östra kanten om C ligger tätorten Målilla (figur 7).



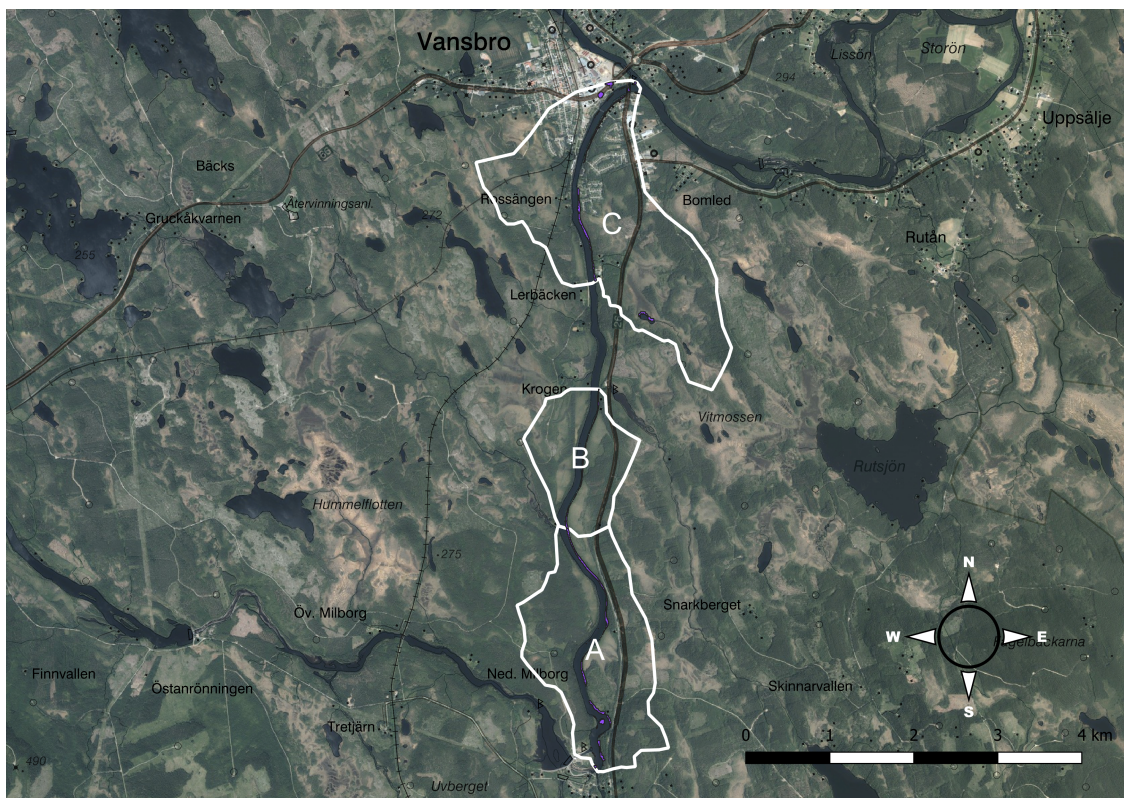
**Figur 7:** Valda delavrinningsområden (markerade A, B och C) för fallstudieområdet kring Emån. Vattnet flödar österut i Emån från delavrinningsområde A till C. Lila ytor visar översvämningsyta enligt Copernicus 2012-07-09.

Emåns sträckning genom dessa delavrinningsområden slingrar sig i meanderbågar, vilket ofta innebär ett flackare vattendrag (Nationalencyklopedin, u. å.[a]). Studieområdet är därför särskilt lämpligt för att undersöka höjdmoddellens effekt på översvämningsmodelleringen i flackare terräng och lägre vattendragsslutning. Enligt satellitbilderna från Copernicus var en stor del av den översvämmade ytan kring de östra delarna av delavrinningsområde A. I delavrinningsområde B var översvämmade ytan jämnare fördelad längs med vattendraget och vid delavrinningsområde C var den översvämmade ytan mindre och främst lokaliserad på flodbankarna i meanderbågarna (figur 7).

#### 4.1.2 Västerdalälven

I Västerdalälven förekom en översvämning i maj 2018 till följd av kraftig snösmältning. Även denna gav upphov till en aktivering av Copernicus den 13:e maj 2018 kl 16:23, på begäran av MSB. Denna data från Copernicus används som valideringsdata och erhålls som ett polygonlager med översvämmad yta från MSB (u. å.). Flödesriktningen går från söder till norr. De tre delavrinningsområdena som valts är placerade längs en relativt rak sträcka i vattendraget, och kan därför antas ha högre vattendragslutning än Emån. Därför lämpar sig studieområdet väl för att undersöka höjdmodellens effekt på översvämningsmodelleringen i mer sluttande terräng. Delavrinningsområdena A och B ligger i anslutning till varandra strax efter att Västerdalälven gjort en kraftig krökning, från att ha flödat i sydostlig riktning till att flöda i nordlig riktning. Delavrinningsområde C ligger ytterligare ca. en kilometer norrut i anslutning till Vansbro (figur 8).

Enligt satellitbilderna från Copernicus var den översvämmade ytan längs med vattendraget smalare än vattendragsbredden i samtliga delavrinningsområden. I delavrinningsområde B var översvämningsytan särskilt smal och därmed svårare att se i figur 8, dock inte obefintlig.



**Figur 8:** Valda delavrinningsområden (Markerade A, B och C) kring Västerdalälven. Flödesriktningen är från söder till norr genom A, B och C. Lila yta visar översvämningsyta enligt Copernicus 2018-05-13.

### 4.1.3 Helige å

Som ett tredje fallstudieområde används Helige å i Småland vid tätorten Gemla där skyddsvallar uppförts vid sidan av vattendraget för att förhindra översvämningar. Fallstudieområdet används därför särskilt för att undersöka frågeställningen om upplösningens utsmetningseffekt på viktiga objekt i terrängen. För Helige å saknas data från Copernicus, men ett översvämningstillfälle förekom i mars 2020 och data från detta tillfälle finns i form av privatpersoners dokumentation och nyhetsartiklar (Martelleur, 2020; Alm, 2020) (figur 9). Däremot saknas data om översvämmad yta utöver de bilder och filmklipp och övrig dokumentation. Därför finns inte möjlighet att validera resultatet av karteringen mot i dagsläget befintliga data. Området används därför endast för att undersöka hur vattnet flödar runt skyddsvallarna för olika upplösning på höjdmodellen, samt om skyddsvallarna blir mer eller mindre synliga för någon av upplösningarna som implementeras.



**Figur 9:** Bilder från översvämningstillfället i Gemla från Martelleur (2020)

Vattenflödet genom avrinningsområdet startar i Gemla sjö nordost om Gemla och rinner sedan söderut genom studieområdet, genom delavrinningsområde A, B och C. I norra delen av delavrinningsområde A, strax 500 meter norr om skyddsvallens norra ände, finns en damm i Helige å (figur 10).



**Figur 10:** Valda delavrinningsområden kring Helige å (markerade A, B och C). Vattnet flödar från norr till söder. Röd linje markerar översvämningens placering.

Skyddsvallen med tillhörande dike är placerad längs med vattendragets västra sida och sträcker sig från en punkt strax söder om Hagalund till strax innan slutet på delavrinningsområde B (figur 10). I delavrinningsområde C finns alltså ingen skyddsvall. På bilden syns vallen som en röd linje. Skyddsvallen uppfördes år 1937 med syfte att skydda omgivande mark från översvämning och för att dränera marken nordväst om ån. Höjden varierade mellan 0,5 och 1,5 meter med en krönbredd på två meter och en basbredd på mellan 3,6-6 meter. Bredvid vallen grävdes ett 0,5-2,5 meter djupt dike (Statens Lantbruksingenjör, 1937) (figur 10).

## 4.2 Översvämningskartering

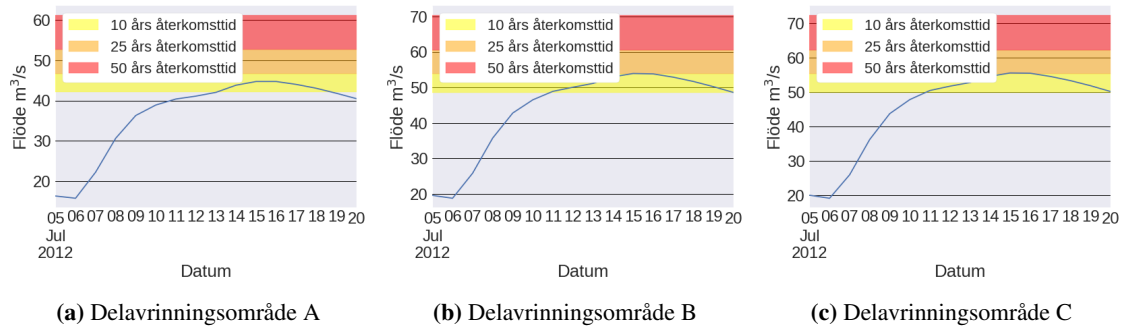
Översvämningskarteringen genomförs med de olika höjdmmodellerna med fem och två meters upplösning. Höjdmmodellerna hämtas från Lantmäteriet och interpoleras med Lantmäteriets interpolationsmetod. Denna interpolationemetod är uppdaterad och inte densamma som SMHI tidigare tillämpat vid sina översvämningskarteringar (Alpford-Wylde & Giron-Lopez, 2022). SMHI:s nuvarande översvämningsmodell för vattendrag är konstruerad efter en höjdmmodellsupplösning på fem meter. Därför kan denna upplösning modelleras utan förändringar i modellkoden. För två meters upplösning behövs dock modifieringar i de delar av koden som på något sätt relaterar till upplösningen för att få modelleringen att fungera.

För översvämningskarteringen utförs beräkningarna på varje delavrinningsområde i studien separat och i enlighet med den teori som anges i avsnitt 3. Koden som SMHI tillämpar är skriven i Python och går igenom ett antal beräkningssteg. Först hämtas höjdmmodeller för valda studieområden med upplösningarna fem respektive två meter från Lantmäteriet. För översvämningsmodelleringen skapas en domän utifrån delavrinningsområdet som anger den yta som ska studeras, det rutnät som används samt placeringen av vattendraget och dess in- och utlopp. Detta beräkningssteg modifieras i studien dels med den ingående höjdmmodellen och dels med det diskretiserade avstånd modellen använder för att bygga upp vattendragets sträckning. Avståndet behöver vara mindre än upplösningen för att vattendraget ska bli kontinuerligt, och är för fem meters upplösning vanligen tre meter. För två meters upplösning tillämpas ett steg på en meter. Modellkoden skrivs också om så att en loggfil med vattendragsslutning skrivs ut i samband med att modellens domän byggs. Modellerna kalibreras sedan automatiskt för fem meters upplösning för att få friktionskoefficienten, *manningstalet*, för vattendragets botten. Detta manningstal för flodfåran används även för modelleringen på två meters upplösning. Därpå anropas LISFLOOD-FP och simuleringen initieras. Då fördelas det ingående flödet genom att dividera med höjdmmodellens upplösning. Slutligen sker en efterbehandling av utdata där vattenytor såsom själva vattendraget klipps från den översvämmade ytan. Även andra översvämmade ytor inom det buffrade modelleringsområdet än just kring det undersökta vattendraget, exempelvis kring biflöden och andra sjöar i delavrinningsområdet, klipps bort inför beräkningarna av resultatens kvantifiering.

### 4.2.1 Flödesdata

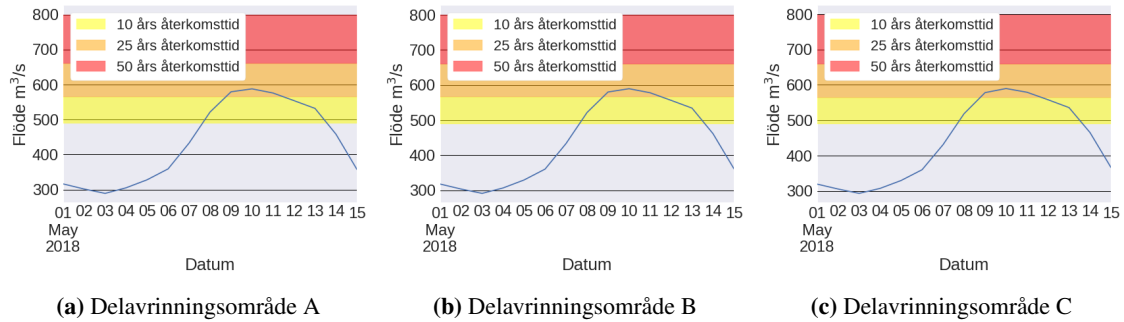
För att utdata från modellkörningarna ska vara möjliga att validera gentemot data från Copernicus, används flöde från översvämningstillfällena vid Västerdalälven, Emån som indata till LISFLOOD-FP. För översvämningstillfället vid Helige å inhämtas flödesdata för att återskapa det verkliga översvämnings scenariot. Flödesdata hämtas från S-HYPE.

I hydrograferna från S-HYPE för översvämningen i Emån 2012 kulminerar flödet långt senare än den 9 juli då Copernicusdata finns tillgänglig. Den 9 juli var flödet i de tre delavrinningsområdena enligt S-HYPE ca.  $35 \text{ m}^3/\text{s}$ , motsvarande mindre än 10 års återkomsttid (figur 11). Det högsta flödet enligt hydrografen inträffade den 15:e juli och var då ca.  $45 \text{ m}^3/\text{s}$ , motsvarande 10-25 års återkomsttid. Vid översvämningstillfället gjordes också mätningar av flödet i Emån av SMHI. Mätningarna togs vid Emmernäs, en station placerad strax innan Emån rinner samman med Silverån nära utloppet från delavrinningsområde C, strax sydost om vad som visas i figur 7. Mätdata visar att flödestoppen låg runt den 9-12 juli och att flödet maximalt uppmätte ca.  $75 \text{ m}^3/\text{s}$ , vilket motsvarar 100 års återkomsttid (Sporrong, 2012) (figur 11). Eftersom detta bättre överensstämmer med Copernicusdatan för översvämningen, bedöms den som mer korrekt och används som indata till modellen. Därmed görs antagandet att S-HYPE underskattat flödet vid detta tillfälle samt att flödet inte ökat nämnvärt mellan mätstationen vid Emmernäs och inloppet till delavrinningsområdena A och B, utan samma flöde kan tillämpas vid alla tre delavrinningsområden.



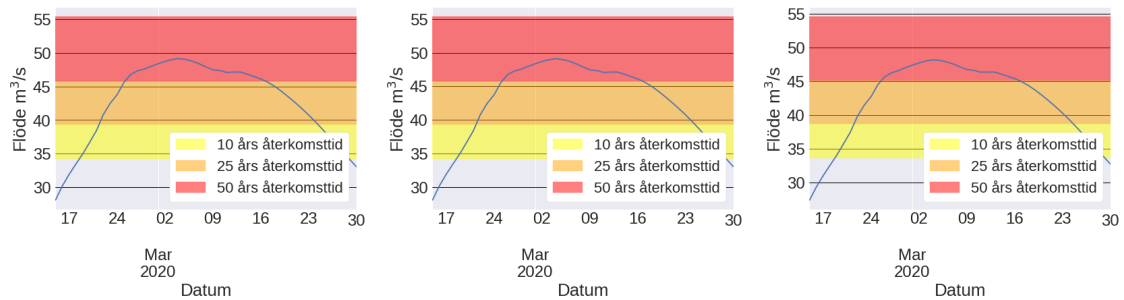
**Figur 11:** Hydrografer från S-HYPE för delavrinningsområdena A, B och C under översvämningstillfället i Emån under juli 2020.

För översvämningstillfället vid Västerdalälven inhämtas hydrologiska data från S-HYPE. Flödet för de valda delavrinningsområdena var ca  $580 \text{ m}^3/\text{s}$  vilket motsvarar ett 25-årsflöde. Hydrograferna kulminerar strax innan vald simuleringsdag då Copernicus bilder togs den 9 maj 2018 (figur 12). Eftersom körningarna i LISFLOOD-FP tillämpar ett konstant flöde under upp till 140 timmar, antas ett flöde motsvarande något mindre än flödestoppen vara relevant att använda som indata, i detta fall valdes  $550 \text{ m}^3/\text{s}$ . Antagandet baseras på hydrografen som visar att det maximala flödet inte varade under så lång tidsperiod, vilket innebär en risk att överskatta översvämningen.



**Figur 12:** Hydrografer från S-HYPE för delavrinningsområdena A, B och C under översvämningstillfället i Västerdalälven 2018.

Även för Helige å används flödesdata från S-HYPE som indata till LISFLOOD-FP. Enligt hydrograferna kulminerar flödet under första veckan i mars och det maximala flödet når nära  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ , vilket motsvarar ett 50-årsflöde (figur 13). Eftersom flödet bör ha varit konstant över 140 timmar för att simuleringen ska bli som mest realistisk, väljs ett flöde något mindre än det maximala flödet, i detta fall  $45 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Figur 13:** Hydrografer från S-HYPE för delavrinningsområdena A, B och C under översvämningstillfället i Helige å 2020.

### 4.3 Del 1: Kvantifiering av modellresultat och vattendraglutning

Denna del i metoden genomförs för att svara på frågeställningen om vattendraglutning kan relateras till förbättrat modellresultat. Därför kvantifieras först resultaten enligt följande beskrivning.

#### 4.3.1 Kvantifiering och validering av resultaten

För kvantifiering av resultaten och modellvalidering jämförs översvämningsyta och vattendjup med satellitbilderna från Copernicus för respektive delavrinningsområde vid Emån och Västerdalälven. Jämförelsen görs med det index  $FI$  som tillämpas av Jiang m. fl. (2022) (ekv. 14), härnäst kallat passningsindex.

$$FI = \frac{A_p \cap A_r}{A_p \cup A_r} \times 100\% \quad (14)$$

Där  $A_p$  är modellerad översvämningsarea och  $A_r$  den uppmätta översvämningsarean.  $FI$  anger hur väl dessa överensstämmer i %.

Arean för de översvämmade områdena beräknas i QGIS för både satellitbilderna och översvämningskartorna med olika upplösning med statistikverktyget, varpå snittet och unionen av de två ytorna kan beräknas till passningsindex. Passningsindex beräknas för respektive upplösning i jämförelse med Copernicusdata. Detta görs eftersom inte bara översvämningsarea utan var den är placerad är avgörande för relevanta och träffsäkra översvämningsvarningar. Passningsindexet blir ett mer noggrant sätt att utvärdera modellberäkningarna och att utnyttja tillgången på satellitdata. Översvämningsdata från Copernicus innehåller dock även översvämmade biflöden och dylikt inom respektive delavrinningsområde och dessa klipps bort för beräkning av passningsindex eftersom endast översvämnningen kring de tre utvalda vattendragen modelleras i LISFLOOD-FP.

Förändringen i passningsindex då upplösningen ökas från 5 meter till 2 meter beräknas för att kvantifiera en eventuell förbättring (ekvation 15).

$$Skillnad = \frac{FI_{2m} - FI_{5m}}{FI_{5m}} \quad (15)$$

Där skillnaden anger skillnaden i procent (%) då upplösningen ökas från 5 till 2 meter,  $FI_{2m}$  (%) är beräknat passningsindex för upplösningen 2 meter och  $FI_{5m}$  (%) är beräknat passningsindex för 5 meter.

#### 4.3.2 Vattendraglutning

Resultatet från kvantifieringen i form av passningsindex granskas i relation till lutningen i respektive vattendrag för att undersöka om det finns indikationer på något potentiellt samband mellan förbättrade modellresultat med högupplöst höjddata och vattendraglutning. Beräkningstiden mäts för samtliga delavrinningsområden för att kunna vikta mot eventuellt förbättrade modellresultat.

För att kvantifiera topografin på ett relevant sätt, används vattendragets lutning liksom i studien av Brandt (2009) och som även diskuterades av Yacoub m. fl. (2005). Vattendragets lutning är en komponent i både Subgrid- och Adaptive-lösaren (ekvation 3 och 4) som påverkar flödet i flodfåran och undersöks därför som kvantifieringsparameter för terrängtyp i denna studie.

Lutningen beräknades redan i SMHI:s script som en del av modelluppställningen. Denna beräkningen tillämpas i denna studie. Beräknaren tar höjddata för vattendragets botten från höjddata för inloppet respektive utloppet för modelldomänen, vilket innefattar respektive delavrinningsområde samt den buffrade omkringliggande ytan. Risker med beräknaren är därför att den överskattar lutningen, men eftersom målet är att kunna avgöra för vilka delavrinningsområden som högupplöst data är att föredra, ger metoden användbara resultat som kan tillämpas på hela modelldomänen för SMHI:s översvämningsmodellering. Vattendragets längd tas med i beräkningen och lutningen beräknas således som lutningen i meter per meter vattendragssträckning i planet.

#### **4.4 Del 2: Tröskeffekter**

För att besvara frågeställningen om huruvida tröskeffekter förekommer mellan höjdmodellerna med två respektive fem meters upplösning, undersöks hur vattnet flödar kring översvämningvallar i modellen. Från översvämningkartorna för Helige å undersöks visuellt om översvämningvallen smetas ut för någon upplösning på höjdmodellen. Med utsmetning menas att höjdmodellens upplösning leder till att översvämningvallen slätas ut i sådan utsträckning att den inte längre kan stoppa vattnet från att flöda över vallen. Särskilt undersöks om vallens dimensioner är tillräckliga för att stoppa en översvämning med det flöde som undersöks, för någon av upplösningarna. Bristen på valideringsdata innebär att de två översvämningkartorna endast jämförs med varandra.



## 5 Resultat

Resultaten från körningarna med olika upplösning men samma ingående flöde visade att det förekom skillnader i passningsindex för modelleringen med de olika höjdmodellernas upplösning, med högre index för högre upplösning. Det visade även att det förekom skillnader mellan vattendragens lutningar, men att dessa inte entydigt kunde relateras till passningsindex. Beräkningstiden skilde sig också för de olika höjdmodellerna, där upplösningen på två meter hade längre beräkningstider för samtliga delavrinningsområden.

Ett oväntat stabilitetsproblem uppstod vid de flesta av simuleringarna i LISFLOOD-FP. Detta problem innebär att felet, det vill säga volym- och flödesfelet, ökade kraftigt under simuleringens gång och därmed minskades den adaptiva steglängden avsevärt ner till storleksordningen tusendels sekund från den initiala steglängden i storleksordningen tiondels sekunder. Simuleringen kunde således inte fullföljas, och inget resultat heller erhållas för dessa körningar. Stabilitetsproblemet kunde kringgås genom att minska det ingående flödet och därför visar resultatet i en del av fallen ett lägre flöde än planerat i avsnitt 4.2.1. Samtliga fall av instabilitet förekom för två meters upplösning utom för delavrinningsområde A vid Helige å där instabilitet visade sig vid enbart fem meters upplösning. I de fall det ingående flödet förändrades, tillämpades det för båda upplösningarna för delavrinningsområdet. Därtill simulerades även det planerade flödet för upplösningen på fem meter då det var möjligt. Vidare detaljer kring de flöden som simulerades presenteras i avsnitten om respektive fallstudieområde nedan.

Problemet med instabilitet var också orsaken till att modellerna endast kalibrerades för fem meters upplösning, eftersom kalibreringen innebär att LISFLOOD-FP behöver genomföra simuleringar i modellerna. Kalibreringen för två meters upplösning blev således inte genomförbart eftersom simuleringen fick för stort fel och krashade.

I de följande avsnitten presenteras översiktliga översvämningsskartor samt övriga resultat för de tre modellerade delavrinningsområdena kring Emån, Västerdalälven samt Helige Å. För mer detaljerade kartor över respektive delavrinningsområde hänvisas till Appendix A.

### 5.1 Beräkningstid

Beräkningstiden var i genomsnitt som längst för höjdmodellen med upplösningen två meter för samtliga delavrinningsområden (tabell 6). Genomsnittlig simuleringstid i LISFLOOD-FP för modellerna med två meters upplösning var 510 min vilket motsvarar över 12 gånger den genomsnittliga simuleringstiden för modellerna med fem meters upplösning, som uppmättes till 41 min.

**Tabell 6:** Simuleringstid i LISFLOOD-FP för respektive upplösning på höjdmodellen för de olika delavrinningsområdena i varje modellområde samt medelvärde för respektive upplösning

Modellområde	Delavrinningsområde	Modelleringsstid [min]	
		2 m upplösning	5 m upplösning
Emån	A	380	37
	B	510	39
	C	340	31
Västerdalälven	A	-	-
	B	530	43
	C	860	41
Helige å	A	310	-
	B	290	51
	C	360	45
<b>Genomsnittlig tid [min]</b>		<b>510</b>	<b>41</b>

## 5.2 Del 1: Kvantifiering av resultaten och vattendragslutning

Resultaten från del 1 visade att ett flertal delavrinningsområden blev instabila för körningar med höga flöden. Vidare visades att passningsindex generellt ökade för den högre upplösningen. För vattendragslutningen visades att Emån hade lägre lutning än Västerdalälven för valda sträckor.

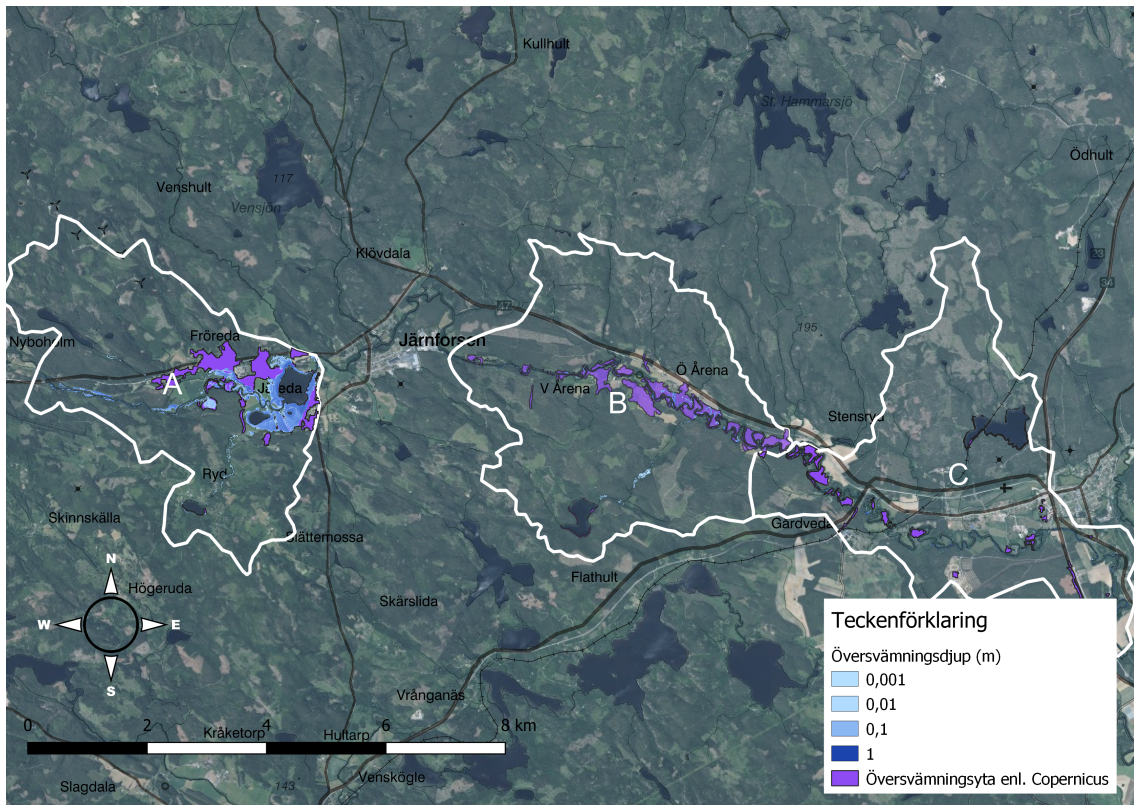
### 5.2.1 Emån

Översvämningstillfället i Emån 2012 kunde inte helt återskapas i översvämningsskarteringen eftersom modelleringen för delavrinningsområde B och C inte kunde genomföras med flödet på 75 m<sup>3</sup>/s. För delavrinningsområde B användes därför ett flöde på 60 m<sup>3</sup>/s, motsvarande 25 års återkomsttid enligt figur 11 och för C ett flöde på 50 m<sup>3</sup>/s, motsvarande den undre gränsen för 10 års återkomsttid enligt figuren. För delavrinningsområde A kunde simuleringen genomföras med flödet 75 m<sup>3</sup>/s.

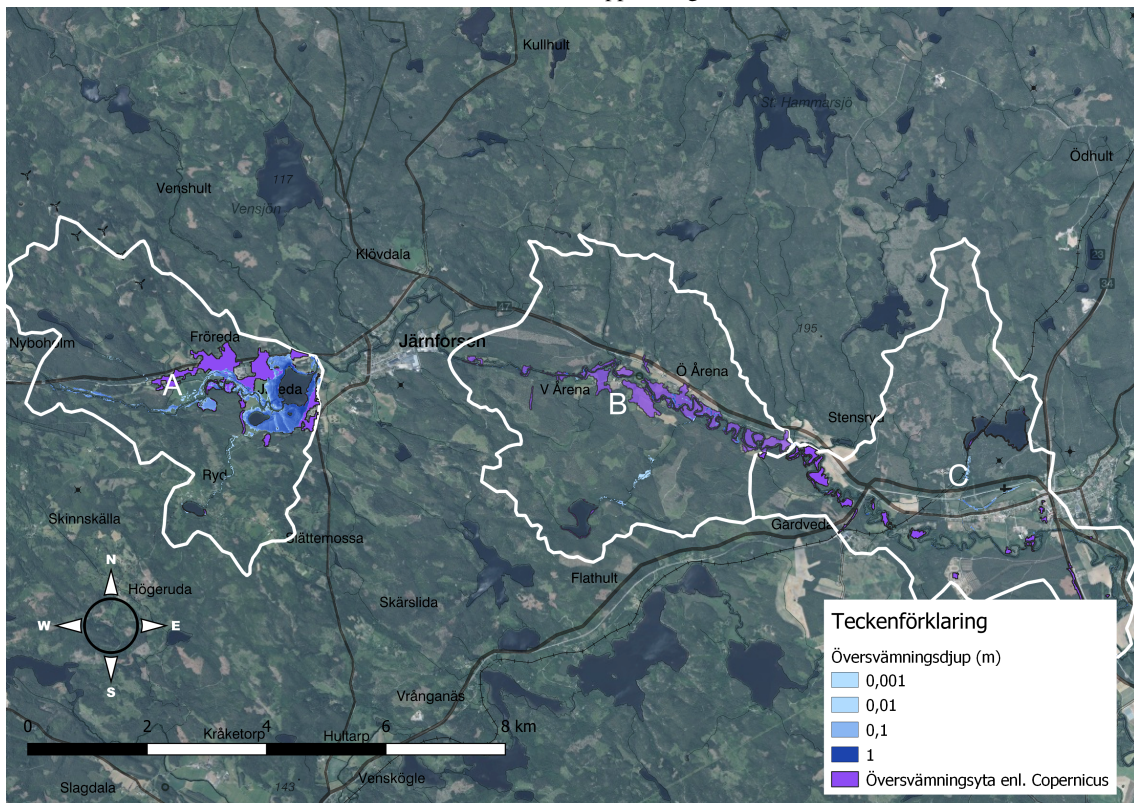
Resultatet från översvämningsskarteringen vid Emån visade att passningsindex var högre för den högre upplösningen i samtliga delavrinningsområden. Den minsta förbättringen erhöles dock för delavrinningsområde A där det planerade flödet kunde simuleras. Det visades dock att då det tilltänkta flödet tillämpades för upplösningen på 5 meter i delavrinningsområde B och C, blev passningsindex som högst (tabell 7).

**Tabell 7:** Passningsindex för översvämningsskarteringarna jämfört med översvämningssyta enligt Copernicus för översvämningsskartering i Emån. (\*) Passningsindex när tilltänkta flödet enligt avsnitt 4.2.1 simulerades.

Delavrinningsområde	Simulerat flöde [m <sup>3</sup> /s]	Passningsindex FI [%]		
		2 m upplösning	5 m upplösning	Förbättring
A	75	23,5	23,3	0,9
B	60	5,35	4,41 (18,1*)	21
C	50	1,32	0,44 (1,29*)	200



(a) Två meters upplösning



(b) Fem meters upplösning

**Figur 14:** Översvämningskartor från modellering med höjdmodeller med två m (a) och 5 m (b) upplösning kring Emån. Blå yta är modellerad översvämningsyta och lila yta (bakomliggande) översvämningsyta enligt Copernicus. Modelleringen gjordes med flöden på  $75 \text{ m}^3/\text{s}$  för delavrinningsområde A,  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  för delavrinningsområde B och  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  för delavrinningsområde C.

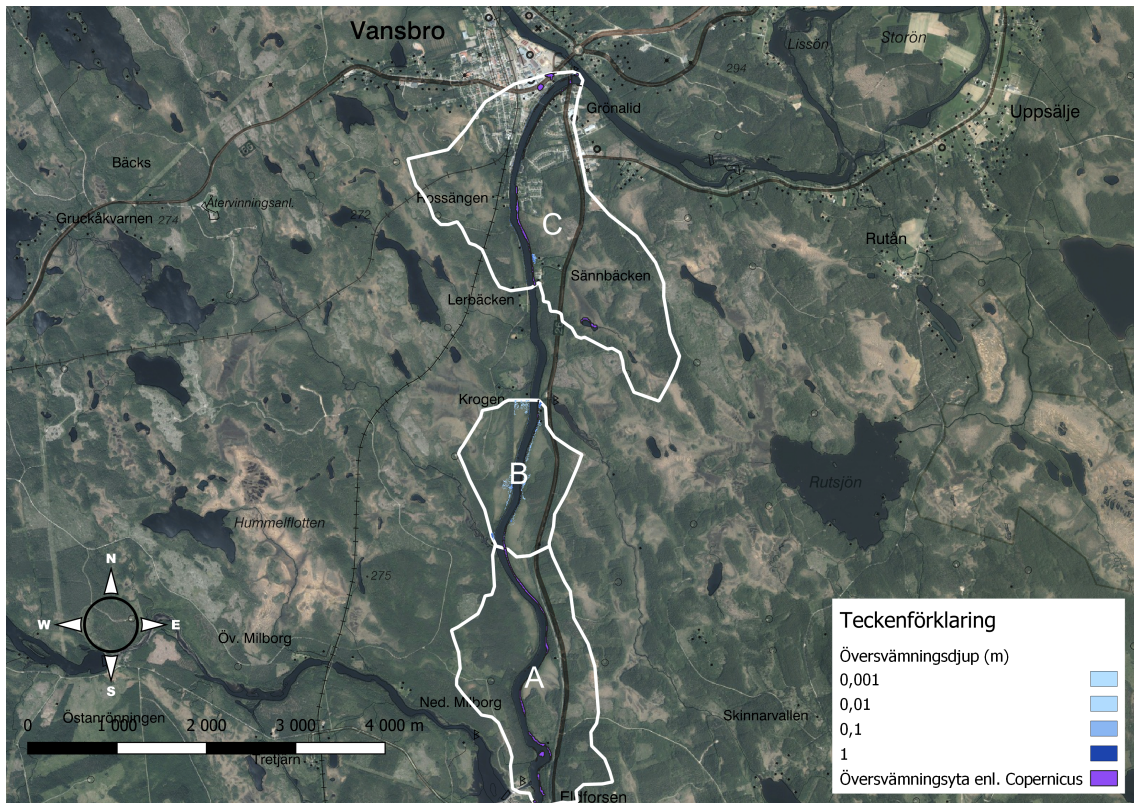
### 5.2.2 Västerdalälven

Översvämningstillfället i Västerdalälven 2018 gick inte att till fullo återskapa med flöden som var enligt avsnitt 4.2.1. Delavrinningsområde B kunde köras med ett flöde på 400 m<sup>3</sup>/s, delavrinningsområde C med ett flöde på 300 m<sup>3</sup>/s. Båda dessa motsvarar mindre än 10 års återkomsttid enligt figur 12. Delavrinningsområde A visade sig vara instabilt för alla testade flöden för två meters upplösning.

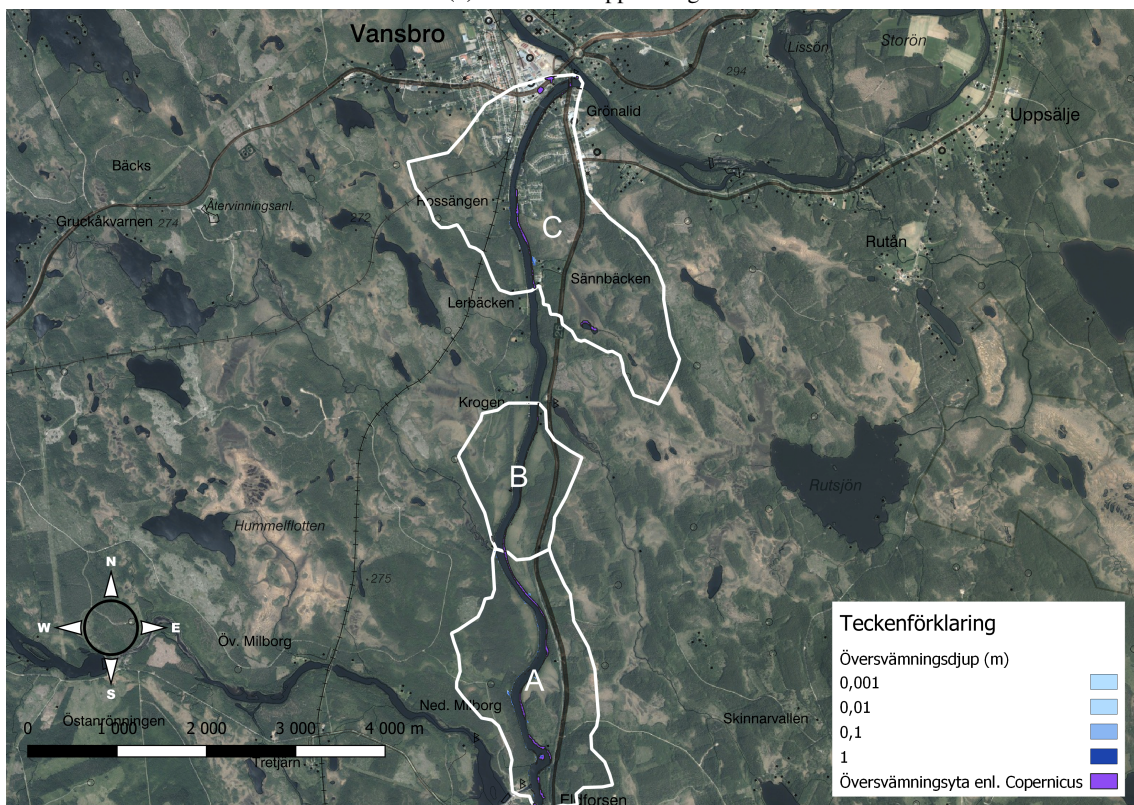
Resultatet visade att passningsindex var högre för den högre upplösningen på två meter. Även då simuleringen gjordes för flödet som var under översvämningstillfället enligt avsnitt 4.2.1 för fem meters upplösning, blev passningsindex lägre. För delavrinningsområde A kunde modellen med två meters upplösning inte köras för något av de testade flödena på 450, 400, 300, 200 och 100 m<sup>3</sup>/s. Delavrinningsområdena B och C kunde inte heller simuleras med flödet 450 m<sup>3</sup>/s i enlighet med avsnitt 4.2.1 och fick därför simuleras med lägre ingående flöde (tabell 8).

**Tabell 8:** Passningsindex för översvämningsskarteringarna jämfört med översvämningssyta enligt Copernicus för översvämningssmodellering i Västerdalälven. (\*) Passningsindex när tilltänkta flödet enligt avsnitt 4.2.1 simulerades.

Delavrinningsområde	Simulerat flöde [m <sup>3</sup> /s]	Passningsindex FI [%]		
		2 m upplösning	5 m upplösning	Förbättring
A	-	-	- (1,3*)	-
B	400	2,1	0 (0,56*)	∞
C	300	1,0	0,38 (0,44*)	160



(a) Två meters upplösning



(b) Fem meters upplösning

**Figur 15:** Översvämningskartor från modellering med höjdmodeller med två m (a) och 5 m (b) upplösning kring Västerdalälven. Blå yta är modellerad översvämningsyta och lila yta (bakomliggande) översvämningsyta enligt Copernicus. Modelleringen gjordes med flöden på 400 m<sup>3</sup>/s för delavrinningsområde B och 300 m<sup>3</sup>/s för delavrinningsområde C. Ingen översvämningskartering kunde genomföras för delavrinningsområde A.

### 5.2.3 Vattendragslutning

Resultatet från beräkningen av lutningen visade att den för delavrinningsområdena vid Emån generellt var mindre än hälften av lutningen i Västerdalälven. Vid Emån stod lutningen för delavrinningsområde A ut med den högsta lutningen medan B och C hade en lutning på mindre än en tredjedel. För Västerdalälven var skillnaderna mindre, mest lutade vattendraget i delavrinningsområde C medan lutningen var något lägre i delavrinningsområdena A och B. (tabell 9).

**Tabell 9:** Lutningen hos vattendragen i respektive delavrinningsområde, beräknat från inflödet till utflödet av den buffrade domänen

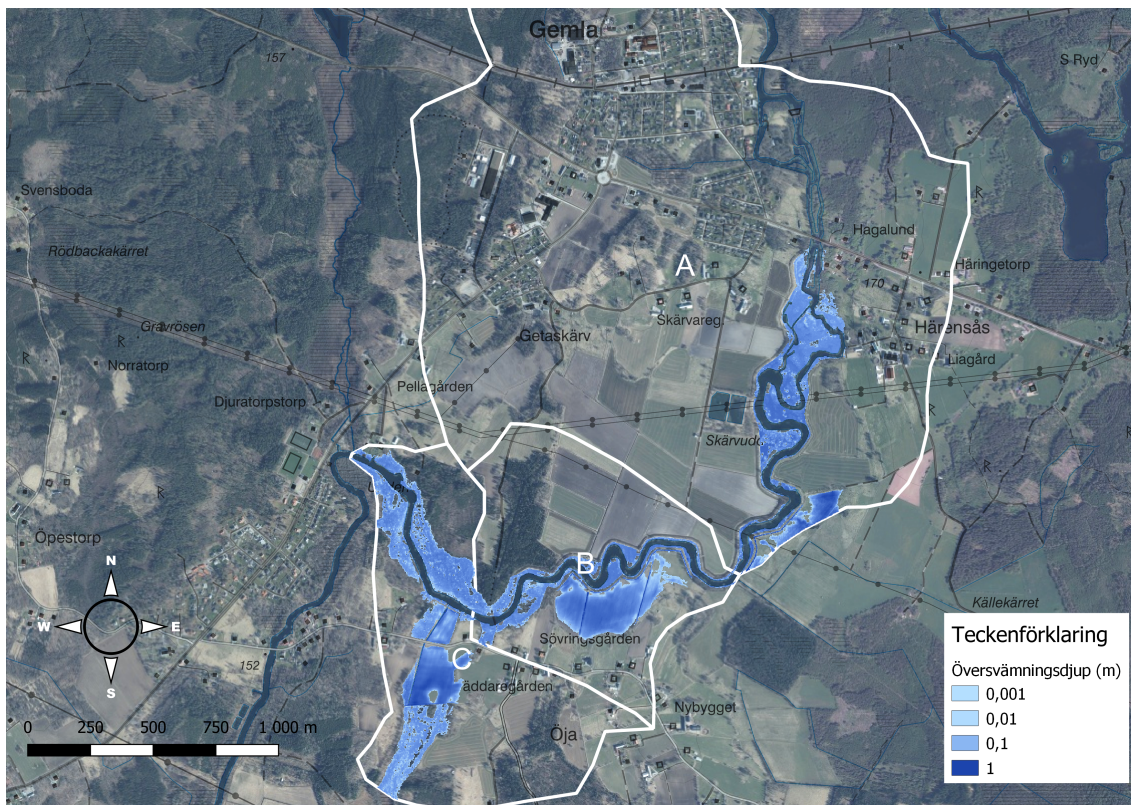
Översvämningstillfälle	Delavrinningsområde	Lutning [ $1 \times 10^{-4} m/m$ ]	Genomsnitt [ $1 \times 10^{-4} m/m$ ]
Emån	A	5,5	2,9
	B	1,3	
	C	1,8	
Västerdalälven	A	5,4	6,3
	B	6,4	
	C	7,0	

## 5.3 Del 2: Översvämningsskartor för undersökning av tröskeeffekter

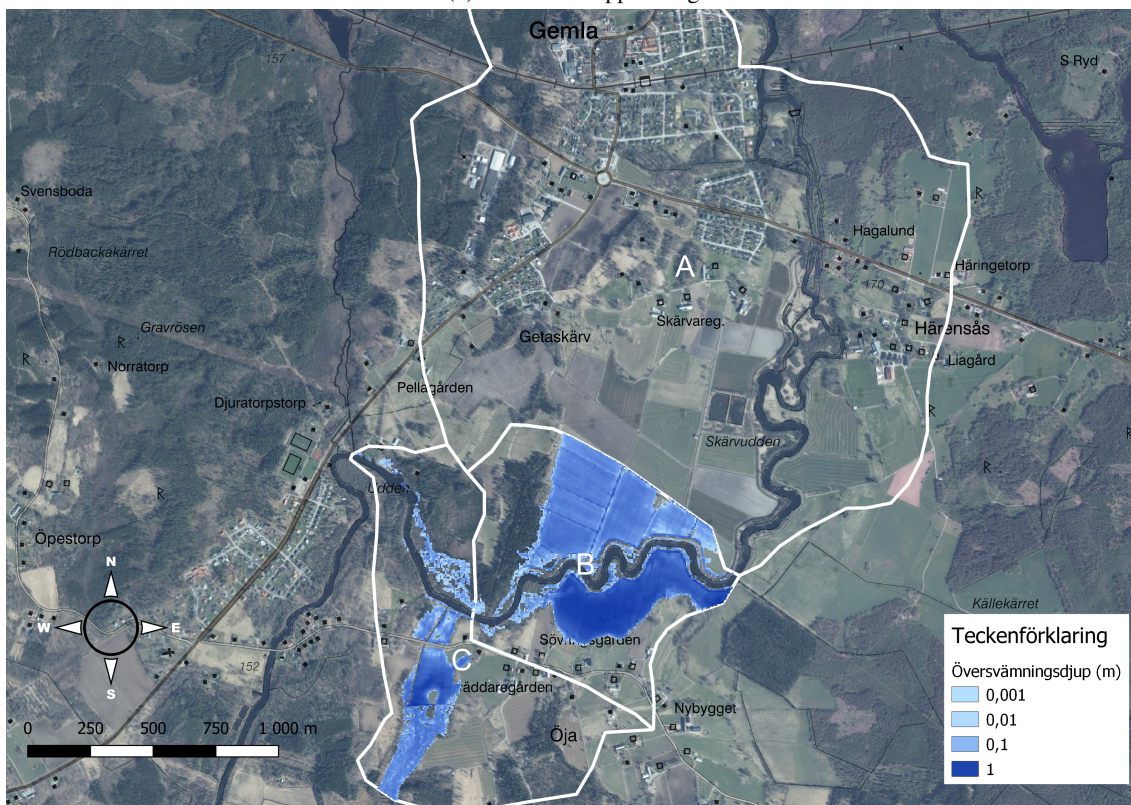
### 5.3.1 Helige å

Översvämningshändelsen i Helige å 2020 kunde återskapas med flöden enligt avsnitt 4.2.1 motsvarande 25 års återkomsttid, med undantag från delavrinningsområde A för vilken simuleringen inte fungerade alls vid fem meters upplösning eftersom felet växte sig för stort under simuleringens gång. Detta innebar att den adaptiva steglängden minskades med simuleringens gång till storleksordningen hundradels sekund och simuleringen kunde inte färdigställas. Delavrinningsområdet simulerades därför endast med två meters upplösning.

Resultatet från Helige å visade att översvämningssytan skilde sig mellan upplösningarna. I delavrinningsområde B breddade den översvämmade ytan ut sig mer för upplösningen på fem meter, främst norr om vattendraget och översvämningssvallen. Även söder om vattendraget var utbredningen större. För delavrinningsområde C noterades att översvämmade ytan var större för tvåmeters upplösning (figur 16).



(a) Två meters upplösning



(b) Fem meters upplösning

**Figur 16:** Översvämningskartor från modellering med höjdmodeller med två m (a) och fem m (b) upplösning för Helige å. Blå yta är modellerad översvämningsyta. Flödet som modellerades var  $45 \text{ m}^3/\text{s}$  för samtliga delavrinningsområden och båda upplösningarna med undantag för delavrinningsområde A som inte kunde simuleras för fem meters upplösning.

## 6 Diskussion och analys

De resultat som behövdes för att kunna besvara frågeställningen kunde inte tas fram i önskad utsträckning på grund av instabilitet i simuleringen. Modellen kan därför inte betraktas som fullt fungerande för 2 meters upplösning. Nedan följer en diskussion av de resultat som kunde erhållas samt de fel, begränsningar och utvecklingsmöjligheter som framkommit i studien.

### 6.1 Del 1: Upplösning, passningsindex och vattendraglutning

För att uppfylla syftet att undersöka huruvida översvämningsmodelleringens precision ökade med högre upplösning, samt om det fanns någon koppling till vattendraglutning, analyseras resultatet i avsnitt 5.2.1 och 5.2.2 om resultaten för passningsindex vid Emån och Västerdalälven, samt avsnitt 5.2.3 om vattendraglutningen.

Samtliga resultat tyder på att högre upplösning ger ett ökat passningsindex, det vill säga att översvämningskarteringens precision förbättras. Generellt höll sig dock passningsindex till låga värden, som högst 23,5 % men i övrigt inget passningsindex över 10 %. Detta visar på en generellt låg precision som bör tas i beaktning. Resultatet visar att höjdmodellen med upplösningen två meter också skulle ge låga passningsindex i samma storleksordningar, inget i närheten av 100 %. Möjligheten att utföra korrekta varningar i dessa avrinningsområden vid de simulerade flödena bör därför ses som begränsade utifrån detta underlag, därmed också nyttan med att byta till höjdmodellen med två meters upplösning. Observera att passningsindex även blev låga för de planerade flödena. Orsaker och begränsningar med dessa resultat diskuteras vidare under avsnittet 6.4. Det är möjligt att om några av dessa felkällor minskades, skulle resultatet visa högre passningsindex.

Utifrån resultatet noteras en skillnad i gynnsamhet vid implementering av höjdmodellen med högre upplösning mellan Emåns och Västerdalälvens avrinningsområde. Förbättringen av passningsindex var generellt mindre för det flackare avrinningsområdet kring Emån, än det brantare avrinningsområdet kring Västerdalälven. I motsats till resultaten enligt Brandt (2009), visade således detta resultat att högre upplösning är viktigare i ett avrinningsområde med brantare lutning. Studien av Brandt (2009) genomfördes dock i modellen HEC-RAS, en endimensionell modell som därför kan uppvisa ett annorlunda beteende gentemot LISFLOOD-FP. Resultaten i denna studie var dock inte entydiga och ingen klar slutsats kan dras. Vid närmare undersökning av delavrinningsområdena i respektive avrinningsområde, visades nämligen att för Emån gavs den minsta procentuella förbättringen för det mest lutande delavrinningsområdet (A). Dessamma visades för Västerdalälven där största förbättringen i passningsindex gavs för det flackaste delavrinningsområdet (B). Dessa båda resultat står alltså i motsats till resultatet för avrinningsområdena som helhet. Denna motsats indikerar alltså att det är mest gynnsamt att tillämpa hög upplösning för de avrinningsområden som i sin helhet har högsta vattendraglutningen. När det istället gäller individuella delavrinningsområden, indikerar resultatet att sambandet skulle kunna vara omvänt. Resultatet är dock för begränsat för att en tydlig slutsats kring det ska kunna dras.

### 6.2 Del 2: Upplösning och översvämningsvallar

För att uppfylla syftet att undersöka tröskeleffekter i översvämningskarteringen vid ökad upplösning, analyseras resultaten i avsnitt 5.3.1.

Undersökningen kring Helige å visade hur modellens upplösning påverkar hur viktiga topografiska objekt framträder i modelleringen, i detta fall översvämningsvallar. I delavrinningsområde A, som endast simulerades med två meters upplösning, observeras att den översvämmade ytan håller sig innanför översvämningsvallen (figur 25, appendix A). Detta tyder på att vallen är synlig för modellen, det vill säga att den inte smetats ut allt för mycket i höjdmodellen. Att vattendraglinjen går jämsides översvämningsvallen utsluter att flödet var såpass litet att översvämningsytan naturligt skulle stanna innanför vallens sträckning. Vidare innebär det också att det simulerade flödet dock var litet nog för att dess översvämmning skulle kunna begränsas av vallen i modellen. Avsaknaden av resultat från modellen på fem meter innebär att det är oklart ifall även den modellen skulle vara tillräcklig för att vallen ska synas och stoppa vattnets utbredning. Faktumet att delavrinningsområdet endast kunde simuleras för två meters upplösning, tyder dock på att en högre upplösning gör det lättare för modellen att hantera dämmande strukturer i form av den dam som finns



placerad i norra delen av området. Detta resultat i sig indikerar att en högre upplösning kan möjliggöra simulering i sådana delavrinningsområden.

Delavrinningsområde B gick däremot att simulera för båda upplösningar och där observeras stora skillnader. Då delavrinningsområdet simulerades med fem meters upplösning, spred vattnet ut sig över åkrarna bortom översvämningsskyddet, där ytan begränsades av delavrinningsområdets gräns i nordostlig riktning. I översvämningsskartan (figur 24, appendix A), är dock översvämningssvallen synlig som en torrlagd remsa längs vattendraget. Detta skulle kunna tyda på att vallen ändå är synlig för modellen, men inte i sin fulla höjd till följd av den interpolerade höjdmodellen vilket gör att vatten kan flöda över vallen vid vissa ställen. Därmed kan inte uteslutas att vallen skulle hindra flöden av mindre storlekar än det flöde som testades i denna underökning. För två meters upplösning var vallen åter synlig för modellen till den grad att den stoppade vattnets flöde över omkringliggande åkermark. Liksom för delavrinningsområde A, stannar vattnet i en relativt jämn linje längs med översvämningssvallen, vilket utesluter att flödet var begränsande för ytans utbredning. För båda dessa delavrinningsområden är dock oklart för vilket högsta flöde som översvämningssvallen ger effekt vid två meters upplösning och ifall det stämmer överens med verkligheten.

För delavrinningsområde C, där översvämningssvall saknas, noteras mindre skillnader mellan de två upplösningarna och inga tydliga tröskeeffekter (figur 23, appendix A). Orsaken till denna skillnad kan därmed inte härledas till några speciella topografiska orsaker inom denna studies omfattning. Två meters upplösning ger större översvämningssyta och därmed ges motsatta resultat mot delavrinningsområdena A och B där översvämningssvallar finns. I studien av Jiang m. fl. (2022) visades att låg upplösning på höjdmodellen gav en överskattning av översvämningssytan. Passningsindex som tillämpades som valideringsmetod i denna studie säger inget om huruvida ytan är över- eller underskattad. I motsats till delavrinningsområde C står delavrinningsområde B vid Helige å, som hade en tydligt större översvämningssyta för upplösningen på fem meter än för den på två meter. Detta skulle kunna vara en konsekvens av att vattnet har lättare att breda ut sig i en höjdmodell som är mer utjämnad, vilket blir fallet för en låg upplösning eftersom varje cell får ett interpolerat höjdvärde. Dock saknas belägg för att fastställa om karteringarna över- eller underskattar utbredningen. Möjligt är dock att femetersmodellen överskattar översvämningssytan, samt att tvåmetersmodellen också gör det, men i mindre utsträckning. Huruvida översvämningen över- eller underskattas kan vara bra att känna till i varningsverksamheten för att utfärda så tjänliga varningar som möjligt. För att klarlägga huruvida översvämningsskarteringarna över- eller underskattar den översvämmande ytan behövs vidare studier. Resultaten från denna studie indikerar dock att det beror av hur delavrinningsområdet ser ut. Klart är dock att i enlighet med resultatet av Yacoub m. fl. (2005), då jämförelsen gjordes mellan översiktlig och detaljerad modellering, förekommer skillnader mellan de två karteringarna med olika detaljeringsgrad. Klart är också att den lägre upplösningen ger en generellt sämre skattning utifrån passningsindex, även om resultatet inte säger huruvida den över- eller underskattar översvämningssytan. Eftersom precision är viktigt för god kvalitet på översvämningssvarningarna i SMHI:s prognos- och varningstjänst, bör höjdmodell väljas utifrån detta kriterium för mest korrekta varningar. Resultatet visar entydigt att en ökad precision erhålls för en högre upplösning på höjdmodellen. Vidare visas att störst effekt vid byte av höjdmodell erhålls när det finns översvämningssvallar.

Resultaten från fallstudieområdet Helige å tyder på att tröskeeffekter förekommer mellan upplösningen på fem och två meter. Eftersom vallens bredd var två meter på krönet och 3,6-6 meter vid basen, har en höjdmodell på fem meters upplösning större rutor än vad vallen är i toppbredd. Följaktligen blir översvämningssvallen utjämnad med dess sidor och omkringliggande yta, beroende på var rutorna hamnar i rutnätet. Faktumet att det finns ett dike precis bredvid vallen kan därför också bidra till att vallen jämnas ut ytterligare i den höjdmodellen. För upplösningen på två meter kan däremot hela toppytan rymmas inom en ruta, men beroende av rutnätets placering, kan vallens höjd som mest bli en interpolation av dess topp och en bit av dess sluttande sidor eftersom basbredden var större än toppbredden. Följaktligen bevaras vallens verkliga höjd i större utsträckning än för fem meters upplösning. Däremot saknas underlag för att fastställa huruvida två meters upplösning verkligen krävs för att en översvämningssvall med dessa dimensioner ska bli synlig eller om tre eller fyra meter skulle ge likvärdiga resultat för översvämningsskarteringen.

### 6.3 Avvägning mellan förbättrade modellresultat och ökad beräkningstid

För att uppfylla syftet att undersöka om det är gynnsamt för SMHI:s prognos- och varningsverksamhet att tillämpa en högre upplösning på höjdmodellen med tanke på den ökade beräkningstiden, analyseras resultaten i avsnitt 5.1 i kombination med övriga resultat.

Studien visade i samtliga fall ett förbättrat passningsindex med högre upplösning när en sådan simulering var möjlig. Förbättringen var dock liten då det planerade flödet kunde simuleras, vilket endast förekom i ett delavrinningsområde. Däremot visade studien att det finns tröskeleffekter mellan fem och två meters upplösning gällande dämmande strukturer, i denna undersökning i form av översvänningsvallar och dammar. Priset för de förbättrade modellresultaten visades vara en över 12 gånger längre beräkningstid. Detta skulle innebära att alla delavrinningsområden i Sverige som modelleras idag i SMHI:s varningssystem, som idag tar två veckor, skulle ta över 24 veckor, alltså runt ett halvårs tid av konstanta beräkningar. Beräkningstiden varierar dock mellan delavrinningsområden beroende på dess storlek och resultatet för beräkningstid i denna studie påverkades starkt av de delavrinningsområden som ingick i studien. Vidare kalibrerades modellerna endast för fem meters upplösning i denna studie. Om de istället skulle kalibreras för två meters upplösning, finns risk att även kalibreringstiden skulle öka. Utöver det tillkommer extra tid för att bygga upp modellområdet inför simulering vilket också tar längre tid för högre upplösning på grund av det ökade antalet rutor i rutnätet. Dessa beräkningstider ingick dock inte i denna studie. Därför bör tiden 24 veckor endast ses som en fingervisning. Eftersom det i dagsläget inte är möjligt att simulera alla delavrinningsområden med upplösningen två meter på grund av stabilitetsproblemet, går inte heller att avgöra huruvida det vore att föredra. Eftersom steglängden är adaptiv i LISFLOOD-FP, beror också simuleringstiden på stabiliteten och det kan därför inte uteslutas att simuleringstiden ändras när stabiliteten förbättras. Klart är dock att belastningen på NSC, Nationellt superdatorcentrum i Linköping skulle öka från SMHI om upplösningen på höjdmodellen ökade, vilket överensstämmer med förväntat resultat.

För att avgöra om det är gynnsamt för SMHI:s prognos- och varningsverksamhet att tillämpa höjdmodellen på två meter, förutsatt att stabilitetsproblemet går att lösa, beror av möjligheten till förbättrad varningsprecision. Som beskrivs i avsnitt 3.6, utfärdas varningar beroende på antal och vilken typ av byggnationer och/eller infrastruktur som riskerar att hamna i vatten vid en översvämning. Störst nytta av översvänningsmodellering i hög upplösning erhålls därför i delavrinningsområden med just bostäder och viktig infrastruktur. Som anges i tabell 4, spelar antalet översvämmade hus roll för varningsklassen och därför kan en ökad precision på karteringen leda till ökad precision i varningarna. Den högre upplösningen bör i första hand implementeras i dessa delavrinningsområden, om en sådan utveckling görs. I delavrinningsområden där ytan främst består av obebyggd mark såsom skog utan viktiga vägar är karteringens precision således mindre viktig. I dessa delavrinningsområden är nyttan med ökad upplösning mindre i förhållande till den ökade beräkningstiden. Genom att selektivt plocka ut de delavrinningsområden där varningarna gynnas som mest av en ökad precision, kan den totala beräkningstiden hållas ned något gentemot om alla delavrinningsområden modellerades med två meters upplösning. Samtidigt optimeras varningsverksamhetens resultat. Eftersom det saknades tydliga indikationer på samband mellan vattendraglutning och förbättrat modellresultat, kan lutningen i dagsläget inte tillämpas som kriterium för att välja ut ett antal delavrinningsområden att simulera med två meters upplösning.

Den förbättrade varningsprecisionen beror också på översvänningskarteringens kvalitet i respektive delavrinningsområde. Det enda resultat som erhöles som förväntat för Emån och Västerdalälven, det vill säga när flödet i avsnitt 4.2.1 kunde simuleras, gavs för Emåns delavrinningsområde A. Utifrån detta resultat visades endast en liten förbättring i passningsindex mellan upplösningarna på 0,9 %. Med tanke på den kraftigt ökade simuleringstiden och problemet med instabilitet, tyder detta resultat på att det inte är gynnsamt att implementera två meters upplösning i översvänningsmodelleringen. Varje delavrinningsområde är dock unikt och underlaget från denna fallstudie är inte tillräckligt för att avgöra gynnsamheten generellt. Vid undersökning av tröskeleffekter vid Helige å visade dock studiens resultat att en upplösning på två meter tar bättre hänsyn till topografiska objekt i terrängen såsom översvänningsvallar, medan upplösningen på fem meter inte gör det. Dessutom möjliggjorde den högre upplösningen simulering där en damm fanns, eftersom ett sådant delavrinningsområde bara gick att simulera för den högre upplösningen. Studiens resultat indikerar således att där sådana finns skulle därför den högre upplösningen vara att föredra för ökad prestanda. Förslagsvis skulle därför de delavrinningsområden med dammar och/eller vallar kunna väljas ut för att simuleras med den högre upplösningen, även detta en metod för att få stor effekt av bytet utan att totala beräkningstiden blir allt för lång. Ett större underlag krävs dock för att kunna fastslå denna rekommendation.

## 6.4 Felkällor och begränsningar

I detta avsnitt diskuteras felkällor och begränsningar med denna studie med avseende på dess indata, metodval samt det instabilitetsproblem som visades under studiens gång.

### 6.4.1 Indata

En stor källa till fel i studien var att de tilltänkta flödena inte gick att köra i modellen. Således var indata till den resulterande översvämningssytan från simuleringen inte detsamma som för data från Copernicus, och en del av diskrepansen mellan dessa kan antas bero på just ingående data för flödet. Jämförelsen gjordes ändå mellan översvämningsskarteringen och översvämningssytan enligt Copernicus i studien på grund av brist på annan referensdata. Passningsindex för både två och fem meters upplösning kan dock väntas högre om det tänkta flödet istället modelleras, eftersom resultatet förbättrades i de fall det tilltänkta flödet modellerades för någon av upplösningarna som det var möjligt för. Flödena som kunde modelleras var i vissa av fallen mindre än motsvarande 10 års återkomsttid, vilket innebär att SMHI inte har någon möjlighet att undersöka översvämningsscenario för höga flöden för två meters upplösning. Modelleringen med två meters upplösning kan därmed ses otjänlig tills att stabiliteten kan ökas för modellen.

Det verkliga översvämningstillfallet ska gärna vara över flera dagar som diskuteras av Rajib m. fl. (2020). Så var fallet för dessa tillfällen enligt hydrograferna som visar på höga flöden under en längre period. Eftersom SMHI tillämpar ett konstant inflöde i LISFLOOD-FP under en period på upp till 140 timmar, tillämpades ett flöde strax under det maximala enligt avsnitt 4.2.1. Det flöde som valdes kunde dock ha haft stor inverkan på resultatet och orsakat diskrepans mellan översvämningsskarteringen och det översvämmade området enligt Copernicus. Eftersom det i Västerdalälven inte var möjligt att simulera det tänkta flödet, gav denna felkälla kopplad till det inflöde som valdes inget utslag där utan en större källa till fel var att det tänkta flödet inte kunde tillämpas. Därtill hör också att flödena i samtliga fall utom för Emån inhämtades från S-HYPE vilket i sig medför en osäkerhet. Data i S-HYPE till modelleringen beräknas som dygnsmedelvärden från klockan 06 på morgonen till samma tid nästföljande dygn, alltså inte exakt samma tid som satellitdatan, utan förskjutet i förhållande till Copernicusdatan som togs ungefär mitt på dagen för båda översvämningstillfällena. Det optimala hade varit att tillämpa en tidsperiod på 140 timmar med konstant flöde som sträcker sig över den tidpunkt då Copernicus bild togs. Ett alternativ för att skapa robustare karteringar skulle vara att simulera för flera flödesstorlekar i närheten av flödestoppen och undersöka skillnader. Båda dessa lösningar skulle dock kräva stabilare modeller för att överhuvudtaget kunna implementeras. För Emån inhämtades istället mätdata från flödet vilket innebär en mätosäkerhet. Dessutom mättes flödet endast vid en tidpunkt under översvämningstillfallet och inte under hela det förlopp som simulerades. För Helige å där flödet i vissa fall kunde simuleras som tänkt, spelade valet av flöde längs hydrografen i avsnitt 4.2.1 ändå inte någon större roll för resultatet eftersom det istället saknades tillgång till valideringsdata i form av exempelvis bilder från Copernicus.

Även om flödet inte kunde simuleras på samma sätt som tänkt under översvämningstillfällena, tillämpades samma flöde för de båda upplösningarna vilket gav möjlighet till kvantitativ jämförelse mellan höjdmodellernas upplösning. Vidare tillämpades samma randvillkor för in- och utflödespunkt samt geografisk utsträckning för de två upplösningarna vilket möjliggjorde jämförelsen. Förutsättningarna för de två upplösningarna skilde sig dock på grund av kalibreringen. Eftersom manningstalet som kalibrerats efter femmetersmodellen också användes till tvåmetersmodellen, kan det ha orsakat större avvikelser i resultatet för modellen med två meters upplösning. Att kalibrera om modellen för den högre upplösningen skulle eventuellt ge ett annat manningstal som är mer korrekt för den modellen. Detta är dock inte möjligt i dagsläget till följd av instabiliteten och den bör i så fall förbättras i första hand.

Den valideringsdata från Copernicus som användes hade olika upplösning för översvämningstillfallet vid Emån och Västerdalälven. Vid Västerdalälven var upplösningen 10 meter, det vill säga lägre än båda upplösningar som simulerades i studien. Detta är en möjlig orsak till de låga passningsindex som erhöles för just Västerdalälven. Precisionen och upplösningen är särskilt viktig för att relativt små översvämningssytor ska kunna överlappa. För Emån var upplösningen i samma storleksordning som de undersökta upplösningarna, vilket är att föredra för att de två ytorna ska vara likvärdigt jämförbara. Vidare hade datan från Copernicus en precision på 85 %, det vill säga att översvämningssytor kunde urskiljas med 85 % säkerhet, vilket innebär att ett passningsindex på 85 % borde erhållas vid perfekt översvämningssimulering. Resultatet visade betydligt mindre passningsindex, vilket kan innebära att valideringsdatan var en stor källa

till fel i resultatet och/eller att modellerna hade lägre kvalitet än väntat. Vid granskning av datan var vissa hårdgjorda ytor såsom parkeringsplatser och ridbanor markerade som översvämmade ytor enligt Copernicus trots att dessa låg långt ifrån det översvämmade vattendraget. Detta skulle kunna indikera att Copernicus även tolkar blöta ytor som icke är översvämmade från ett vattendrag som översvämmad yta. Information om det saknas och en vidare undersökning kring hur Copernicus skattar översvämmad yta skulle behövas för att fastställa säkerheten i använd data. Den felmarginal som angavs för Copernicus var 6,5 meter. För översvämningsmodelleringen med fem meters upplösning innebär det en maximal förskjutning med en ruta i rutnätet och för modelleringen med två meters upplösning en förskjutning på tre rutor. Vidare noterades också att det fanns ett mellanrum mellan vattendragets strandlinje enligt Lantmäteriet och den översvämmade ytan kring vattendraget av Copernicus, något som skulle kunna vara ett resultat av dessa avvikelser. Dessa feluppskattningar för Copernicus satellitdata bör därmed betraktas som en betydande källa till fel och osäkerhet i resultatet för passningsindex i denna studie.

De två översvämningsstillfällena vid Emån och Västerdalälven valdes till studien på grund av tillgången till valideringsdata från Copernicus. För att en mer omfattande studie ska kunna genomföras, krävs en större mängd valideringsdata genom Copernicus eller annan information om tidigare översvämnningar.

Förändringar i topografin sker ständigt på grund av bland annat erosion, vilket kan ge upphov till skillnader mellan höjdmodellen som användes vid simuleringen och det faktiska landskapet då bilderna togs av Copernicus (Nationalencyklopedin, 2022). Höjdmodellen kring Västerdalälvens avrinningsområde scannades 2020-08-05, vilket var åtta år efter det simulerade översvämningsstillfället. Detta innebär att det kan förekomma skillnader mellan höjdmodellen som användes i studien och den faktiska terräng som var vid översvämningsstillfället, till följd av inscanningen. Det omvända gäller dock Emån, vars delavrinningsområden senast scannades 2011, vilket var sju år före översvämningsstillfället. Just vattendrag med meanderbågar ändras ofta mycket över tid och därför är risken för diskrepans mellan inscanningstillfället och den terräng som var vid översvämnningen särskilt stor (Nationalencyklopedin, u. å.[b]). Även vid Helige å scannades höjddatan långt innan det valda översvämningsstillfället som var år 2020, nämligen år 2012 (Lantmäteriet, 2022a). Detsamma gäller översvämningsvallen vid Helige å, som uppfördes 1937 och därmed kan ha ändrats med tidens gång och idag ha andra dimensioner än vad som angivits.

## 6.4.2 Metod

Den metod för modellvalidering och kvantifiering av resultaten som tillämpades i studien förutsätter tillgången på valideringsdata i form av satellitbilder eller annan information om översvämmad yta. Bristen på sådan information begränsade denna studie till endast två områden där passningsindex kunde beräknas utifrån valideringsdata, vilket begränsar fortsatta studier med samma metodval. Om annan satellitdata finns att tillgå, kan översvämningsytan beräknas enligt metodiken av Rajib m. fl. (2020), men för detta krävs att MSB aktiverar Copernicus vid fler översvämningsstillfällen i Sverige. Som diskuteras av författarna finns dock begränsningar i att använda satellitdata för modellvalidering, bland annat att det krävs molnfria bilder samt att översvämnningen helst ska ha haft ett långsamt förlopp (Rajib m. fl., 2020), vilket sätter ramen för det underlag som krävs för att utföra fler studier med samma metod. Således är dessa möjligheter till vidare studier i nuläget strikt begränsade av tillgången på valideringsdata.

Vid beräkning av passningsindex klipptes de ytor bort som inte härstammade från vattendragets huvudfåra utan visade andra översvämningsytor, såsom hårdgjorda ytor och översvämmade biflöden i avrinningsområdet. Detta bidrog till osäkerheten i resultatet eftersom ytorna valdes bort efter en subjektiv bedömning och visuell granskning av översvämningsytorna. Risken är att för stor eller för liten yta klippts bort. Särskilt stor är osäkerheten i de områden där dessa ytor ligger relativt nära översvämningsytan från vattendragets huvudfåra.

På grund av denna begränsning kan metoden ifrågasättas. Utifrån visuell bedömning av resultatet konstateras också att ytorna blev mycket olika varandra, något som indikerar på stora fel i antingen metoden, indata, satellitdata eller modelleringen. Eftersom delavrinningsområdena tidigare haft god modellkvalitet enligt SMHI:s utvärderingar, skulle en faktor kunna vara den nya höjdmodellens interpolation. Vidare undersökningar krävs för att fastställa delavrinningsområdenas modelleringskvalitet för den nya interpolationsmetoden.

Ett alternativ till passningsindex utifrån satellitdata kunde tillämpas för att i större utsträckning kunna undersöka översvämningskarteringen för Sveriges avrinningsområden. Fördelarna med att beräkna ett passningsindex utifrån valideringsdata är att det går relativt enkelt att genomföra, resultatet blir kvantitativt och lättförståeligt samt att resultaten går att jämföra mellan olika delavrinningsområden. För att kringgå behovet av valideringsdata kan istället de olika översvämningskarteringarna jämföras med varandra liksom i studien av Brandt (2009). Detta skulle kunna göras antingen med samma metodik som i denna studie med avseende på Helige å, det vill säga en visuell bedömning av skillnader. Med hjälp av kunskap om terrängen kan en rimlighetsbedömning göras av resultatet och bästa modell väljas. Alternativt görs som i Brandt (2009) där strandlinjens placering samt vattenståndet kvantitativt jämfördes. Ett sätt att jämföra är också att visualisera vattendjup mot sträcka längs med vattendraget i en graf liksom i studien av Yacoub m. fl. (2005).

En annan begränsning i metoden var kvantifieringen av topografin som endast gjordes efter vattendragets lutning. Detta mått säger inget om hur omgivningen och flodbanken ser ut trots att dessa är aspekter som kan ha en avgörande roll för översvämningsutbredningen, vilket diskuteras av Wing m. fl. (2019). Vidare beräknades vattendragets lutning från kanterna av den buffrade domänen, det vill säga en bit utanför respektive delavrinningsområde vilket innebär att risken för överskattning av lutningen ökar.

För undersökningen av översvämningsvallar med avseende på modellens upplösning, finns även andra metoder för att liknande objekt ska framträda i terrängen. Ett exempel diskuteras av Wing m. fl. (2019), där författarnas metod innebar att viktiga objekt sparades för att sedan läggas in i den slutgiltiga höjdmodellen. Denna metod skulle innebära att höjdmodellen i övrigt kunde ha en lägre upplösning och därmed kunde beräkningstiden minskas. Nackdelen med att istället tillämpa denna metod är att man på förhand måste känna till alla dämmande strukturer för att kunna föra in dessa separat i höjdmodellen, något som undgås genom metoden i denna studie.

I studien tillämpades samma manningstal för simuleringen med två och fem meters upplösning som kalibrerats efter modellerna med fem meters upplösning. Detta medförde en möjlighet att tydligare se hur upplösningen i sig påverkar vattnets flöde genom modellen. Eftersom endast höjdmodellen skiljdes åt mellan försöken, kunde dess effekt isoleras på vattnets väg i terrängen. Skulle SMHI implementera upplösningen på två meter, skulle dock kalibreringen behöva göras därefter. Resultatet i denna studie ger därför en fingervisning kring vilken förbättring i precision som skulle kunna uppnås, men denna blir förmodligen ännu större om manningstalet skulle kalibreras om. I vilken utsträckning detta skulle få effekt är dock oklart.

I denna studie togs endast hänsyn till översvämningsens utbredning och inte till vattendjupet. I vidare studier skulle skillnader i vattendjup också kunna undersökas mellan översvämningskartering i olika upplösning för att öka förståelsen för hur vattnet rör sig genom modellerna.

### 6.4.3 Stabilitet

I studien visades det oväntade resultatet att en del av simuleringarna blev instabila, speciellt för höga flöden. I många fall gick simuleringarna istället att genomföra för lägre flöden än tänkt. Detta innebär att för att implementering av en höjdmodell med upplösningen två meter ska kunna genomföras, krävs också att modellens stabilitet förbättras. Eftersom LISFLOOD-FP tillhandahålls av Bristols universitet, är möjligheterna att från SMHI:s håll förbättra stabiliteten begränsade till själva uppsättningen av LISFLOOD-FP. En del av stabiliteten handlar om hur beräkningarna görs i lösaren och denna kan därför undersökas för att eventuellt öka stabiliteten. I LISFLOOD-manualen av Trigg m. fl. (2013) nämner författarna att den adaptiva lösaren, som tillämpas av SMHI, sällan lämpar sig väl för hög upplösning på grund av den långa beräkningstiden, vilket också framkom i denna studie. Däremot anses lösaren stabil eftersom den ser till att ingen ruta helt töms på vatten. Risken med att byta till en annan lösare med syfte att korta ned beräkningstiden, är därför att instabiliteten ökar. Eftersom de flesta av delavrinningsområdena i studien inte kunde simuleras för önskat flöde enligt avsnitt 4.2.1 i två meters upplösning på grund av instabilitet i modellen, bör ett byte av lösare med syfte att korta ned beräkningstiden inte göras till en instabilare lösare.

I studien var LISFLOOD-FP inte instabil för alla delavrinningsområden, något som indikerar att det skulle kunna vara själva höjdmodellen på de specifika platserna som delvis orsakar instabilitet i modellen. Ett exempel är delavrinningsområde A i Helige å som inte gick att simulera för fem meters upplösning. I delavrinningsområdets övre del finns en damm, som skulle kunna orsaka problem på det sätt som beskrivs i teoriavsnittet 3.2.2, nämligen att flödet av vatten har svårt att ta sig förbi dammen. Delavrinningsområdena

modelleras utifrån bestämmande sektioner, men denna bryts av dammen som därmed delar delavrinningsområdet i två bestämmande sektioner. Det är därför möjligt att området bättre kunnat modellerats som två olika delavrinningsområden. Varför delavrinningsområdet bara blev instabilt för fem meters upplösning är oklart, men skulle till exempel kunna grunda sig i att det är lättare för vattnet att rinna på sidorna om dammen i tvåmetersmodellen eftersom den kan framställa sänkor i marken på ett tydligare sätt. Vidare studier behövs för att fastställa orsaken. För alla övriga delavrinningsområden där instabilitet uppstod, inträffade det vid simulering av två meters upplösning. En orsak till detta skulle kunna vara att den höjddatamodellen blir mindre utjämnad, eftersom varje ruta i modellen har ett höjdvärde. I en mindre utjämnad höjddatamodel kan skarpa strukturer i terrängen framstå tydligare och ge det problem som beskrivs i teoriavsnittet.

Först när stabilitetsproblemet är löst kan SMHI överväga att implementera en höjddatamodel på två meters upplösning eftersom även höga flöden behöver kunna modelleras. Alternativt krävs en undersökning av varje delavrinningsområde där upplösningen två meter önskas för att säkerställa att sådana simuleringar är möjliga att genomföra på det området. Vidare studier kring stabiliteten i LISFLOOD-FP behövs för att undersöka möjliga lösningar på problemet.

## 6.5 Vidare studier

Denna studie gav en introduktion till att undersöka för- och nackdelar med att implementera en höjddatamodel med högre upplösning i SMHI:s översvämningskartering. För att kunna dra fler slutsatser kring ämnet krävs dock vidare studier. Förslag på utvecklingsområden anges i detta avsnitt.

För att kunna fastställa lämplig upplösning på höjddatan i SMHI:s översvämningsmodellering krävs ytterligare studier på andra modellområden. I studien visades tydligt förbättrade resultat mellan upplösningarna, och genom att undersöka upplösningen tre och fyra meter kan klargöras huruvida denna modellförbättring är tillräcklig. En upplösning på tre eller fyra meter vore även lämpliga att undersöka för att eventuellt pricka in tröskeleffekter som fås innan två meters upplösning. För att ytterligare förbättra modellresultatet om så önskas, bör vidare undersökning med en meters upplösning genomföras. Detta kräver dock större ändringar i koden till följd av diskretiseringen av rutnätet som baseras på heltal i programkoden. För att kunna undersöka förbättringsmöjligheter med höjddatamodeln med upplösningen 1 meter krävs således först en undersökning kring hur denna skulle kunna implementeras i koden. Därtill kan vidare studier kring andra metoder att förbättra översvämningsmodelleringen ge alternativa lösningar. Ett exempel skulle kunna vara att testa metoden som beskrivs av Wing m. fl. (2019), där översvämningsvallar bevarades i modellen genom att simuleras med högre upplösning än omgivningen. Intressant vore också att undersöka om höjddatan kunde förändras på något annat sätt för att få tröskeleffekter utan att hög upplösning behöver tillämpas. Andra alternativa sätt att öka modelleringens prestanda kan också ses över i vidare studier. För att fastställa säkerheten i framtida studier kan även en fel- och känslighetsanalys genomföras, något som inte rymdes inom detta projekts tidsramar.

Genom att undersöka fler modellområden kan också tydligare slutsatser dras kring huruvida det finns en koppling mellan vattendragslutning och förbättrat modellresultat vid ökad upplösning. Underlaget från studien var otillräckligt för att undersöka ett statistiskt bevisat samband mellan förbättrat passningsindex med högre upplösning och vattendragslutning. För att vidare undersöka om vattendragslutning är ett lämpligt kriterium för att avgöra om högre upplösning på höjddatamodeln lämpar sig eller är gynnsamt, behövs ett större underlag där fler vattendrag undersöks enligt samma metod. Om sådant samband visar sig saknas, kan vidare studier rikta in sig mot att hitta andra variabler som korrelerar med ökad upplösning. Sådana variabler skulle kunna vara omkringliggande terrängtyp eller bebyggelse eller andra faktorer. Syftet med detta skulle vara att kunna välja ut delavrinningsområden som gynnas mest av högre upplösning för implementering och på så sätt spara in på beräkningstiden. Detta är alltså förutsatt att SMHI:s prognos- och varningstjänst bedömer den totala beräkningstiden på runt ett halvår som för lång för implementering av höjddata med upplösningen två meter för alla delavrinningsområden.

Vidare studier behövs också för att öka stabiliteten för modeller med högre upplösning. Detta skulle exempelvis kunna göras genom att låta inflödet strömma in genom flera rutor i modellen istället för endast en. Detta eftersom en vattenpelare med samma volym blir betydligt mycket högre om rutstorleken är mindre, vilket skulle kunna vara en orsak till instabilitet. Vidare kan undersökas om det finns någon interpolationsmetod eller annan behandling av höjddata som förbättrar stabiliteten vid högre upplösningar.

## 7 Slutsatser

Fallstudien visade på resultat som leder till följande slutsatser om översvämningsmodelleringen i SMHI:s prognos- och varningstjänst:

- Utifrån studiens resultat kan inte fastslås huruvida en högre upplösning lämpar sig bäst för vattendrag med stor eller liten vattendraglutning, samt ifall det överhuvudtaget finns något samband däremellan. En mer omfattande studie krävs för att undersöka ämnet vidare.
- Tröskeeffekter visade sig mellan fem och två meters upplösning som gjorde att översvämningsvallar påverkade vattenflödet i modellen, vilket tyder på att sådana områden lämpar sig för högre upplösning.
- I samtliga fall erhöles ett förbättrat modellresultat för den högre upplösningen på två meter.
- Om SMHI tillämpar höjdmodeller med upplösningen två meter istället för nuvarande upplösningen på fem meter, förlängs beräkningstiden avsevärt, ca. 12 gånger den nuvarande tiden på 2 veckor för körningen av LISFLOOD-FP och därtill tillkommer tid för bland annat modelluppställning.
- Modellerna uppvisade instabilitet vid två meters upplösning och detta problem behöver lösas för att höjdmodellen ska kunna implementeras på ett tjänligt sätt.
- Med underlag av dessa resultat är det upp till SMHI:s prognos- och varningstjänst att bedöma huruvida implementering av en högre upplöst höjdmodell i översvämningskarteringen ses som gynnsamt och i så fall undersöka hur stabiliteten kan ökas i modellerna för att möjliggöra den utvecklingen.

## Referenser

- Acrement, G. & Schneider, V. (1984). *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and flood plains*. Tekn. rapport. Washington.
- Alfredsson, C. (2012). Översvämningar i Sverige 1901-2010. *MSB*, vol. 1.
- Alm, L. (2020). *Översvämningen i Gemla våren 2020*. Tillgänglig från: <https://www.youtube.com/watch?v=lzomYrfW15c>.
- Alpford-Wylde, R. & Girons-Lopez, M. (2022). FO översvänningsmodellering teknisk metodbeskrivning. Internt dokument från SMHI.
- Brandt, S. A. (2009). *Betydelse av höjdmodellers kvalitet vid endimensionell översvänningsmodellering*. ISSN 1403-8749 35. Högskolan i Gävle, FoU-rapport.
- Chow, V. (1959). *Open channel hydraulics*. Tekn. rapport. Mc-Graw Hill, New York.
- Copernicus (2022). *Copernicus*. Tillgänglig från: <https://www.copernicus.eu/sv/om-copernicus/copernicus-i-korthet>.
- De Roo, A. & Bates, P. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of hydrology*, (236 (2000) 54-77).
- European Environment Agency (2017). *Copernicus Land Service - Pan-European Component: CORINE Land Cover*.
- European Union (2012). [EMSR009] *Mariannelund: Delineation Map (Detail 3)*. Tillgänglig från: [https://emergency.copernicus.eu/mapping/ems-product-component/EMSR009\\_01MARIANNELUND\\_DELINEATION\\_DETAIL03/2](https://emergency.copernicus.eu/mapping/ems-product-component/EMSR009_01MARIANNELUND_DELINEATION_DETAIL03/2).
- European Union (2018). [EMSR280] *Vansbro: Delineation Map, Monitoring 5*. Tillgänglig från: [https://emergency.copernicus.eu/mapping/ems-product-component/EMSR280\\_02VANSBRO\\_01DELINEATION\\_MONIT05/1](https://emergency.copernicus.eu/mapping/ems-product-component/EMSR280_02VANSBRO_01DELINEATION_MONIT05/1).
- European Union (2022). *Online Manual for Risk and Recovery Mapping, P04: Flood delineation*. Tillgänglig från: <https://emergency.copernicus.eu/mapping/ems/p04-flood-delineation>.
- FLO-2D software inc. (2021). *FLO-2D Overview*. Tillgänglig från: <https://flo-2d.com/flo-2d-pro/>.
- Gasiorowski, D. & Szymkiewicz, R. (2007). Mass and momentum conservation in the simplified flood routing models. *Journal of Hydrology*, vol. 346 (1-2).
- Hunter, N. M., Horritt, M. S., Bates, P., Wilson, M. D. & Werner, M. G. (2005). An adaptive time step solution for raster-based storage cell modelling of floodplain inundation. *Advances in Water Resources*, vol. 28 (9), s. 975-991. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.03.007>. Tillgänglig från: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0309170805000850>.
- Jiang, W., Yu, J., Wang, Q. & Yue, Q. (2022). Understanding the effects of digital elevation model resolution and building treatment for urban flood modelling. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 42, s. 101122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101122>. Tillgänglig från: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581822001355>.
- Lantmäteriet (2021). *Hydrografi Nedladdning*. Tillgänglig från: <https://www.lantmateriet.se/sv/geodata/vara-produkter/produktlista/hydrografi-nedladdning>.
- Lantmäteriet (2022a). Höjdmödel 1m. ©Lantmäteriet. Tillgänglig från: <https://www.lantmateriet.se/sv/geodata/vara-produkter/produktlista/markhojdmodell-visning/#qry=h%C3%B6jdmödel%visning>.
- Lantmäteriet (2022b). *Kvalitetsbeskrivning Nationell markhöjdmödel*. Tekn. rapport. Version 1.6. Tillgänglig från: [https://www.lantmateriet.se/globalassets/geodata/geodataprodukter/hojddata/kvalitetsbeskrivning\\_mhm.pdf](https://www.lantmateriet.se/globalassets/geodata/geodataprodukter/hojddata/kvalitetsbeskrivning_mhm.pdf).
- Lantmäteriet (2022c). *PRODUKTBEKRIVNING Markhöjdmödel Nedladdning*. Tillgänglig från: <https://www.lantmateriet.se/sv/geodata/vara-produkter/produktlista/markhojdmodell-nedladdning/>.
- Leopold, L. B. & Maddock, T. J. (1953). *The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications*. Tekn. rapport. Washington. DOI: <https://doi.org/10.3133/pp252>.
- Martelleur, M. (mars 2020). "Lika mycket vatten på åkrarna som i ån". *ATL*. Tillgänglig från: <https://www.atl.nu/manga-oversvammade-gardar-i-gemla>.
- MSB (2014). *Vägledning för översvänningskartering av vattendrag fakta, inspirerande exempel och tips för en bra beställning*. Swedish. ISBN: 978-91-7383-402-5. Karlstad: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap.
- MSB (u. å.). *Sveriges aktiveringar av Copernicus EMS*. Tillgänglig från: <https://gisapp.msb.se/apps/kartportal/CopernicusEMS/3infoSE.html>.
- Nationalencyklopedin (2022). Erosion. Tillgänglig från: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/1%C3%A5ng/erosion>.

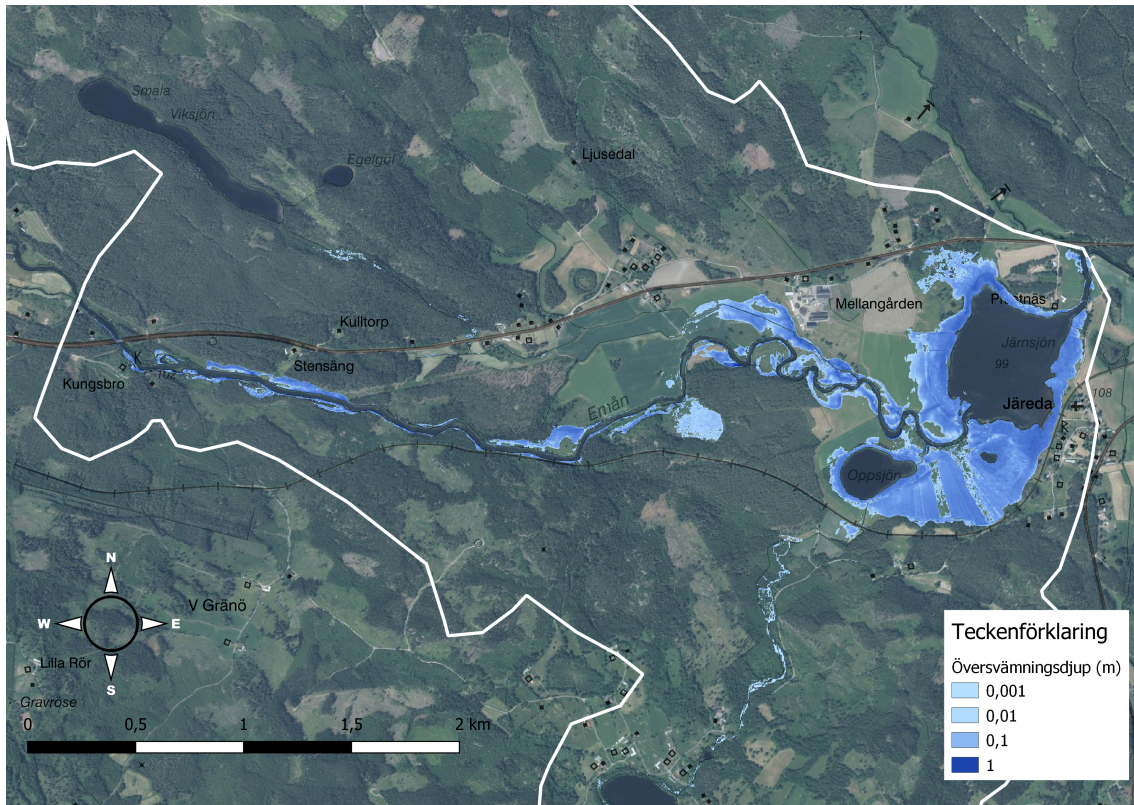


- Nationalencyklopedin (u. å.[a]). *Mannings formel*. Tillgänglig från: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/mannings-formel>.
- Nationalencyklopedin (u. å.[b]). *Meandrande flod*. Tillgänglig från: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/meandrande-flod>.
- Neal, J., Schumann, G. & Bates, P. (2012). A subgrid channel model for simulating river hydraulics and floodplain inundation over large and data sparse areas. *Water Resources Research*, vol. 48 (11).
- Rajib, A., Liu, Z., Merwade, V., Tavakoly, A. A. & Follum, M. L. (2020). Towards a large-scale locally relevant flood inundation modeling framework using SWAT and LISFLOOD-FP. *Journal of Hydrology*, vol. 581, s. 124406. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124406>. Tillgänglig från: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169419311412>.
- SMHI (u. å.). *Vattenwebb*. Tillgänglig från: <https://www.smhi.se/data/hydrologi/vattenwebb>.
- SMHI Kunskapsbanken (2021). *SMHIs vädervarningar*. Tillgänglig från: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/varningar-och-meddelanden/smhis-vadervarningar-1.167835>.
- SMHI Kunskapsbanken (2022). *Modeller för att beräkna vattenföring*. Tillgänglig från: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/vattenforing/modeller-for-att-berakna-vattenforing-1.182759>.
- Sporrong, A. (2012). *Rapport angående översvämningarna i Hultsfred med omnejd sommaren 2012*. Tekn. rapport Dnr: 2012-188. MSB. Tillgänglig från: <https://rib.msb.se/Filer/pdf/27028.pdf>.
- Statens Lantbruksingenjör (1937). *Gämla-Getaskärv-Harekullens invallningsföretag år 1932. Förslag till ändring av fastställd plan, upprättad år 1937*. Tekn. rapport. Stockholm. Tillgänglig från: <https://www.lantmateriet.se/sv/kartor/vara-karttjanster/Historiska-kartor/>.
- Svensk försäkring (2021). *Naturskador i Sverige 2021. Antal och kostnader per kommun, (2021:2)*. Tillgänglig från: <https://www.svenskforsakring.se/contentassets/ac2df9c287ac4254be72dc9ae9933aac/naturskador-i-sverige-2021-antal-och-kostnader-per-kommun-med-bilaga-1.pdf>.
- Trafikverket (2020). *Information och kartmaterial - funktionellt prioriterat vägnät*. Tillgänglig från: <https://bransch.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/vag/funktionellt-prioriterat-vagnat/Remiss/>.
- Trigg, M., Bates, P., Neal, J. & Dabrowa, A. (2013). LISFLOOD-FP. *User manual*. School of Geographical Sciences, University of Bristol. Bristol, UK.
- University of Bristol, School of Geographical Sciences (u. å.). *Model structure*. Tillgänglig från: <http://www.bristol.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood/structure/>.
- USACE Hydrologic Engineering Center (2022). *HEC-RAS Documentation*. Tillgänglig från: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs>.
- Willis, T., Wright, N. & Sleight, A. (2019). Systematic analysis of uncertainty in 2D flood inundation models. *Environmental Modelling Software*, vol. 122, s. 104520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104520>. Tillgänglig från: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815218307825>.
- Wing, O. E., Bates, P., Neal, J., Sampson, C. C., Smith, A. M., Quinn, N., Shustikova, I., Domeneghetti, A., Gilles, D. W., Goska, R. m. fl. (2019). A new automated method for improved flood defense representation in large-scale hydraulic models. *Water resources research*, vol. 55 (12), s. 11007–11034.
- Yacoub, T., Westman, Y., Sanner, H. & Samuelsson, B. (2005). *Detaljerad översvämningsskarta för Eskilstunaån. Ett projekt inom KRIS-GIS*.

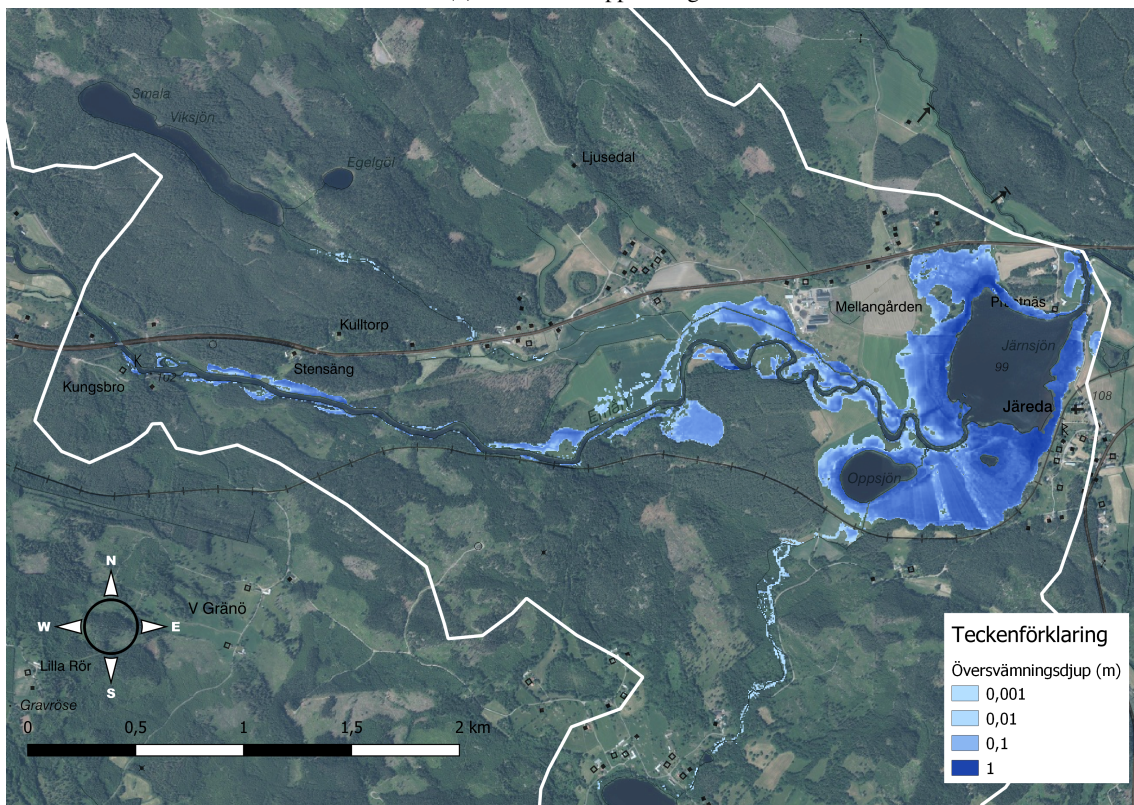


## A Appendix

### A.1 Detaljerade översvänningskartor Emån

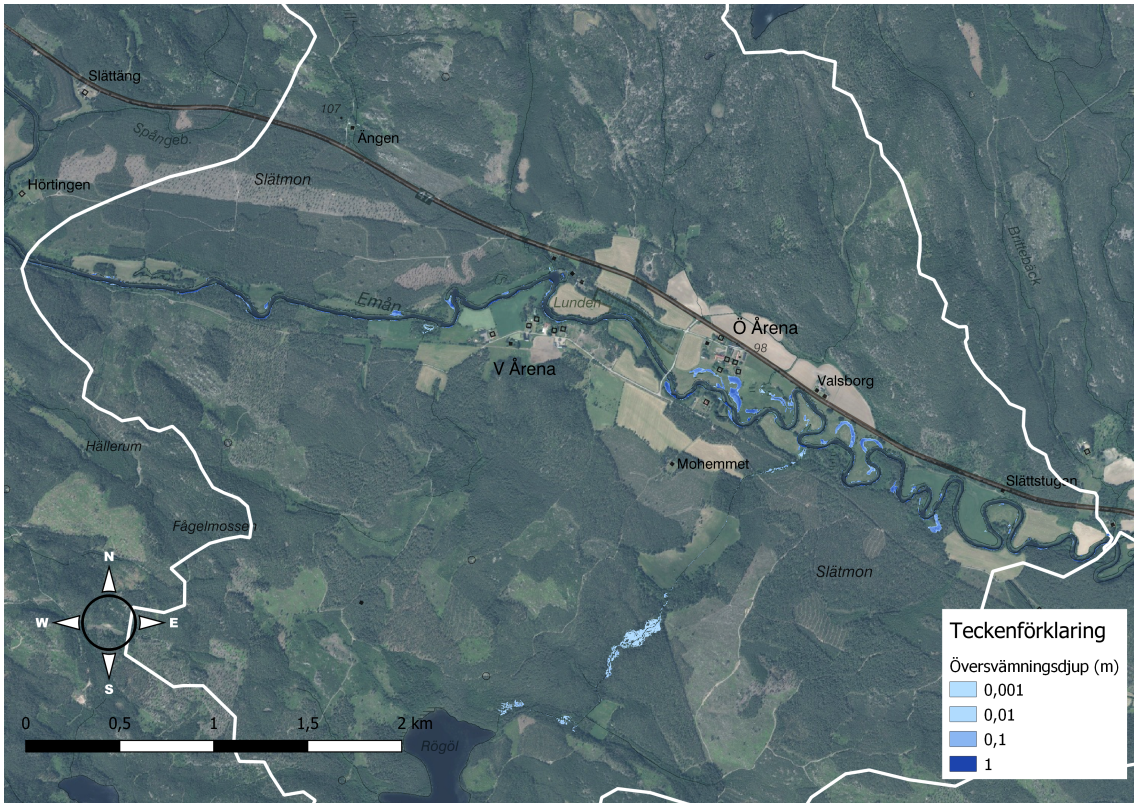


(a) Två meters upplösning

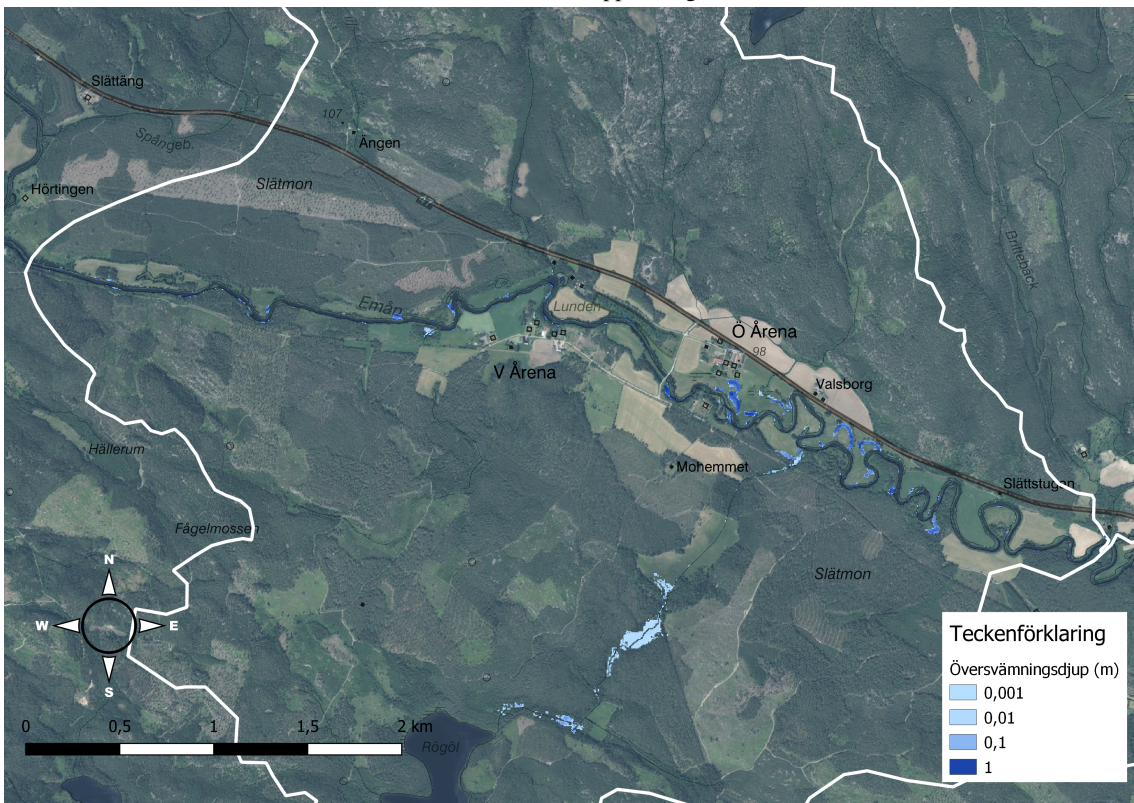


(b) Fem meters upplösning

**Figur 17:** Översvänningskartor för delavrinningsområde A vid Emån, med upplösning på två (a) och fem (b) meter. Simuleringen gjordes med ett flöde på  $75 \text{ m}^3/\text{s}$ .



(a) Två meters upplösning



(b) Fem meters upplösning

**Figur 18:** Översvämningskartor för delavrinningsområde B vid Emån, med upplösning på två (a) och fem (b) meter. Simuleringen gjordes med ett flöde på  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ .



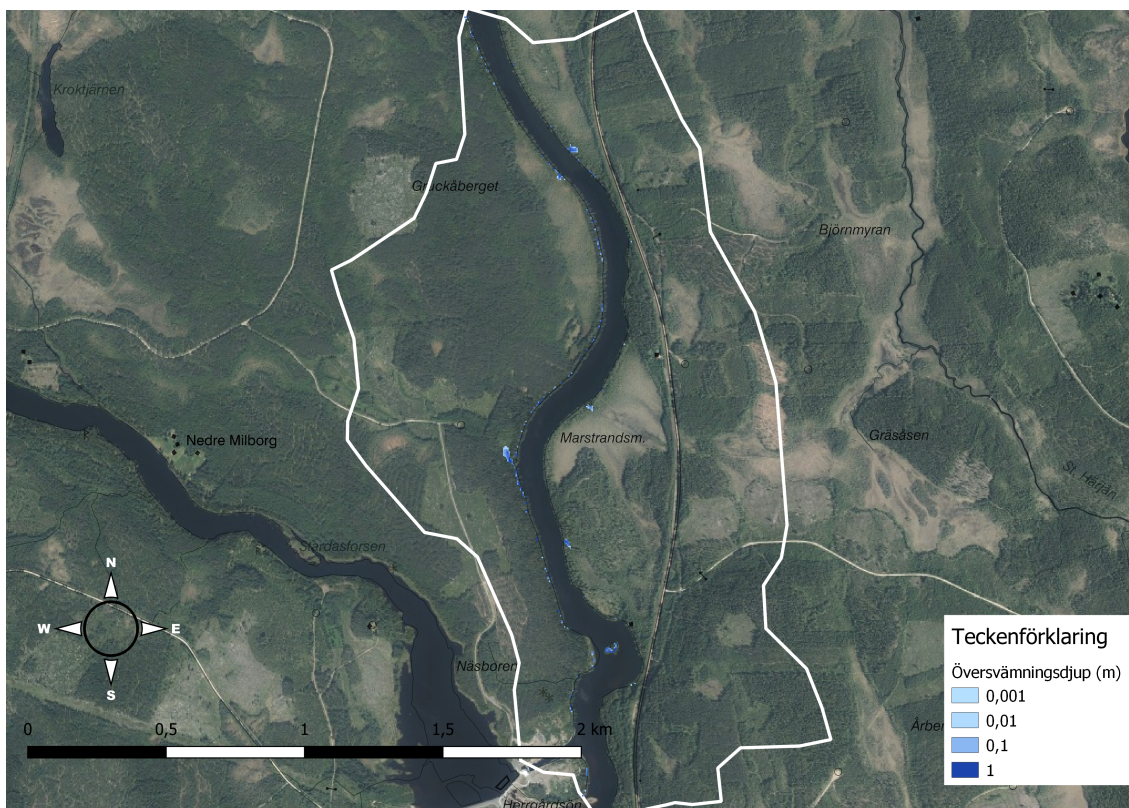
(a) Två meters upplösning



(b) Fem meters upplösning

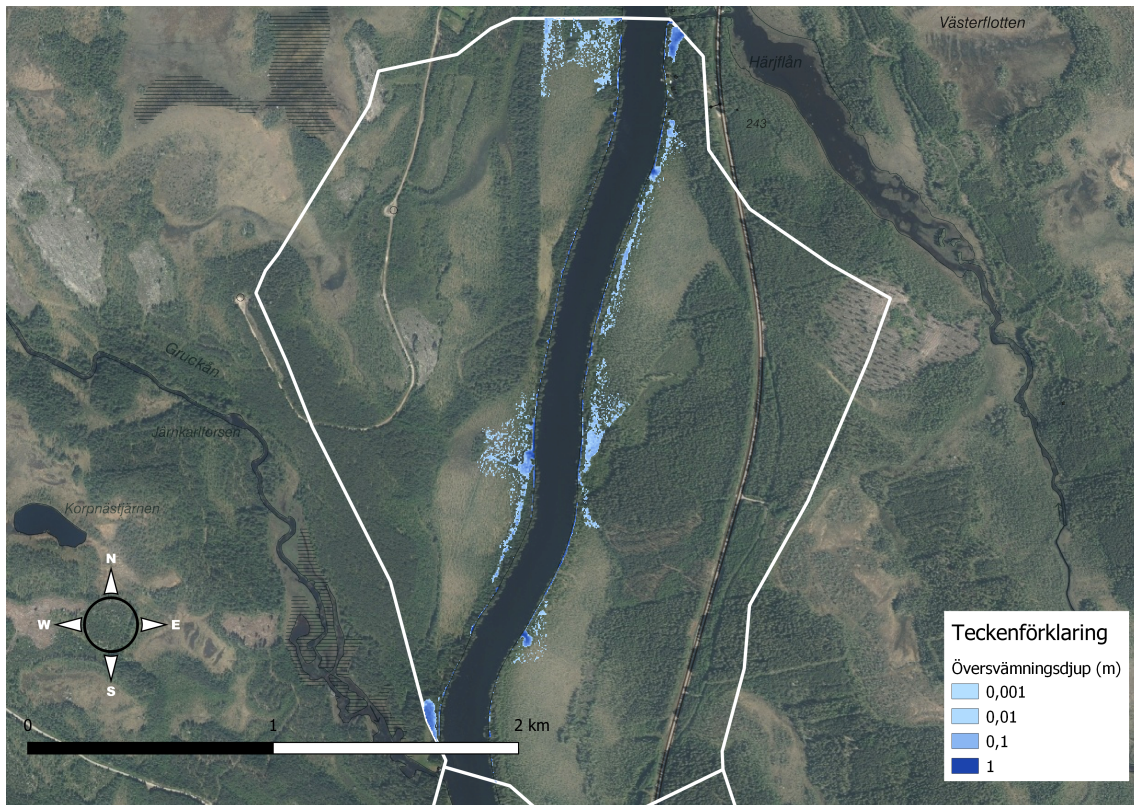
**Figur 19:** Översvämningskartor för delavrinningsområde C vid Emån, med upplösning på två (a) och fem (b) meter. Simuleringen gjordes med ett flöde på  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## A.2 Detaljerade översvämningsskartor Västerdalälven

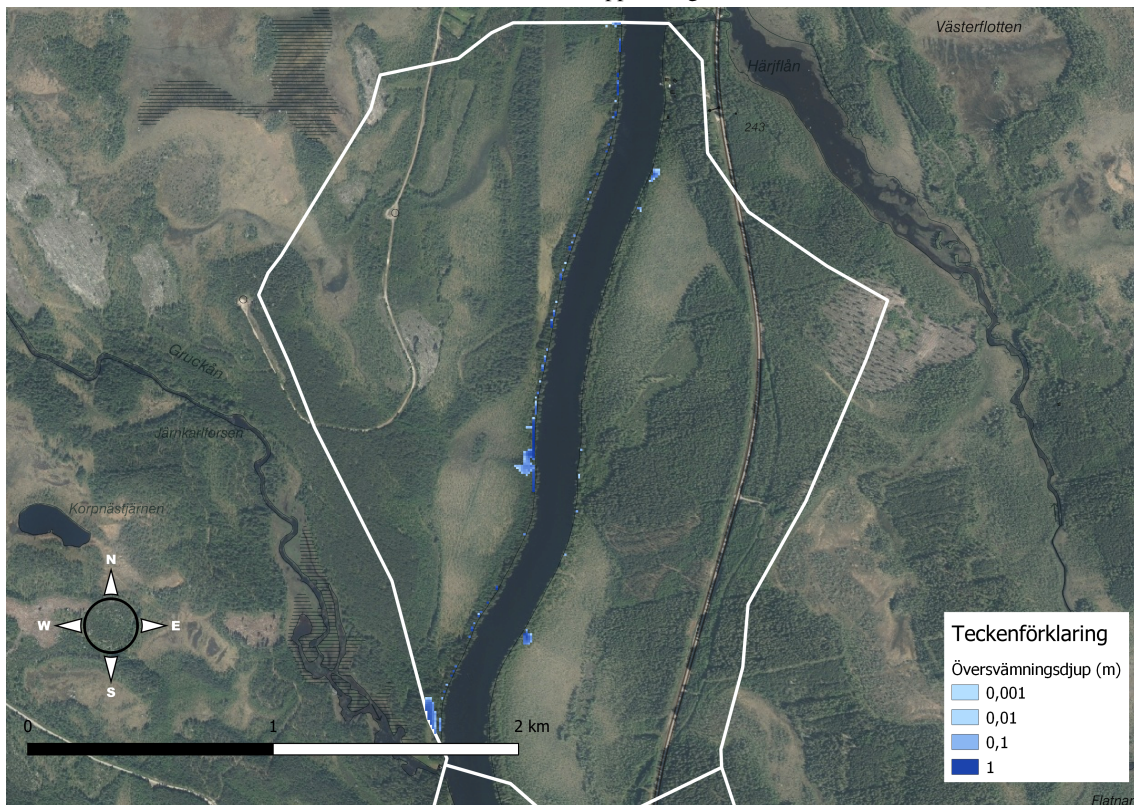


(a) Fem meters upplösning

**Figur 20:** Översvämningsskartor för delavrinningsområde A vid Västerdalälven, med upplösning på fem meter. Simuleringen gjordes med ett flöde på  $450 \text{ m}^3/\text{s}$ .



(a) Två meters upplösning



(b) Fem meters upplösning

**Figur 21:** Översvämningskartor för delavrinningsområde B vid Västerdalälven, med upplösning på två (a) och fem (b) meter. Simuleringen gjordes med ett flöde på  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ .



(a) Två meters upplösning

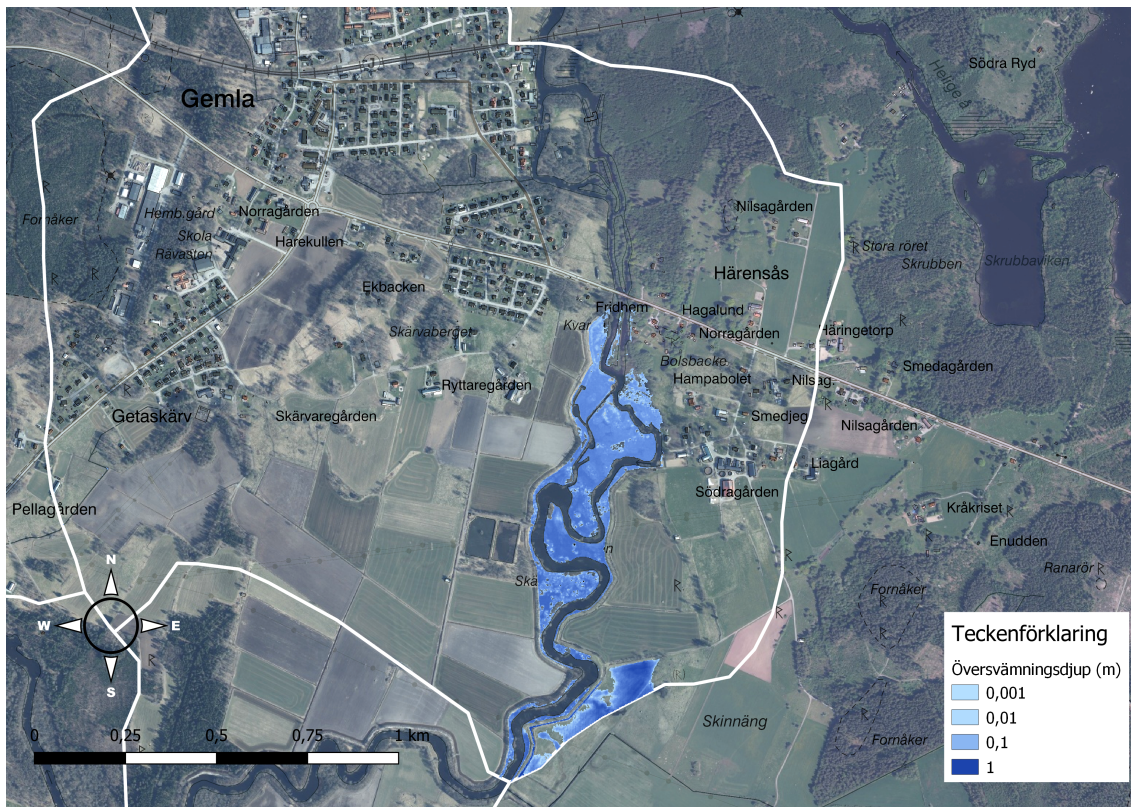


(b) Fem meters upplösning

**Figur 22:** Översvämningskartor för delavrinningsområde C vid Västerdalälven, med upplösning på två (a) och fem (b) meter. Simuleringen gjordes med ett flöde på 300 m<sup>3</sup>/s.

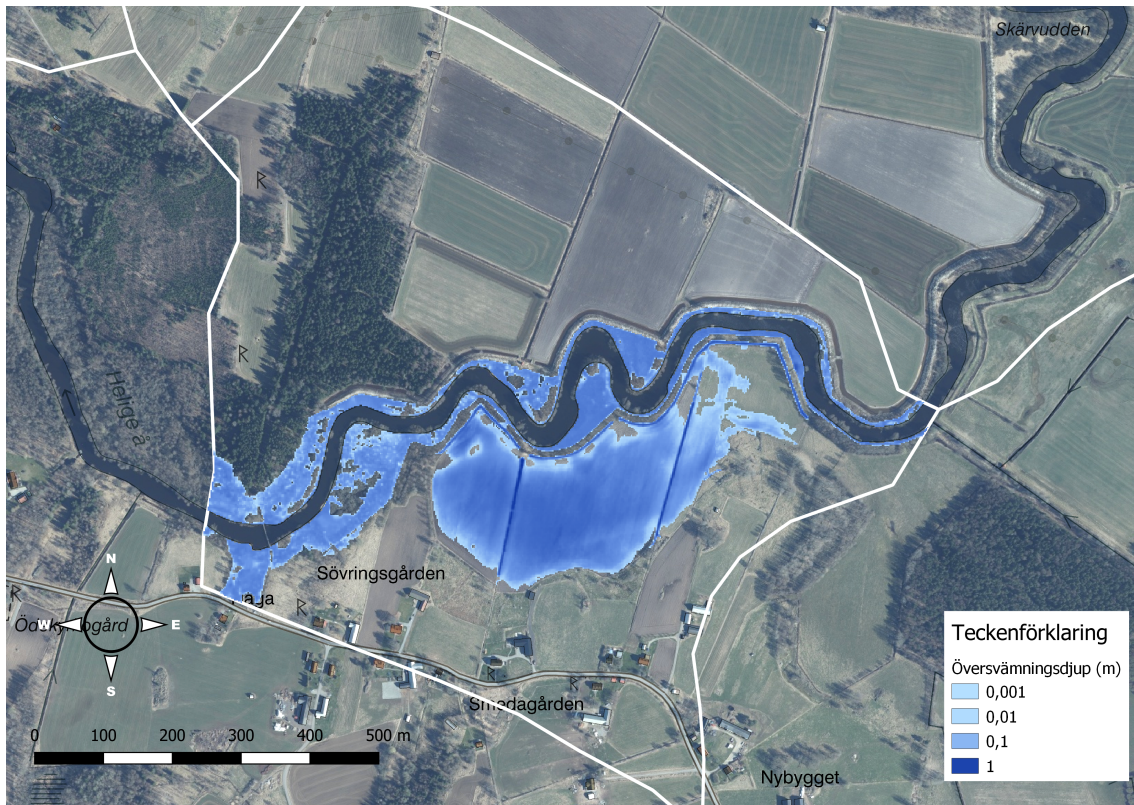


### A.3 Detaljerade översvämningsskartor Helige å

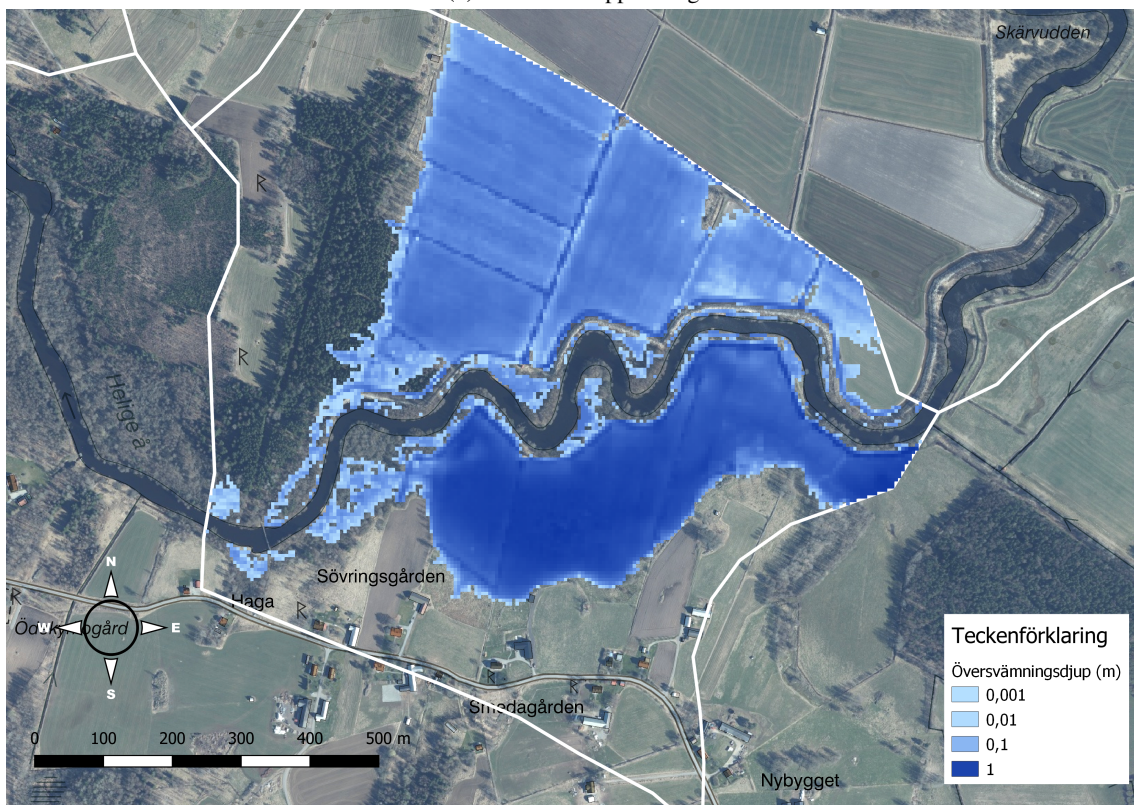


(a) Två meters upplösning

**Figur 23:** Översvämningsskartor för delavrinningsområde A vid Helige Å, med upplösning på två meter. Simuleringen kördes med ett flöde på  $45 \text{ m}^3/\text{s}$ .

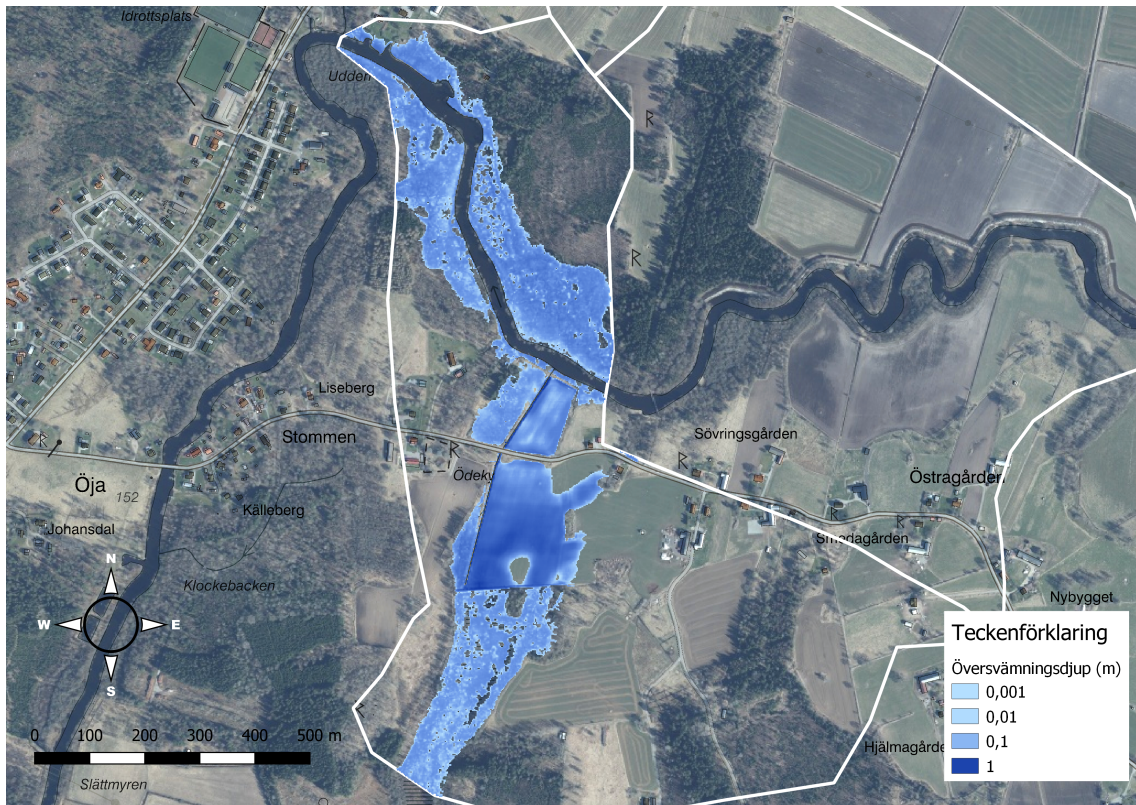


(a) Två meters upplösning

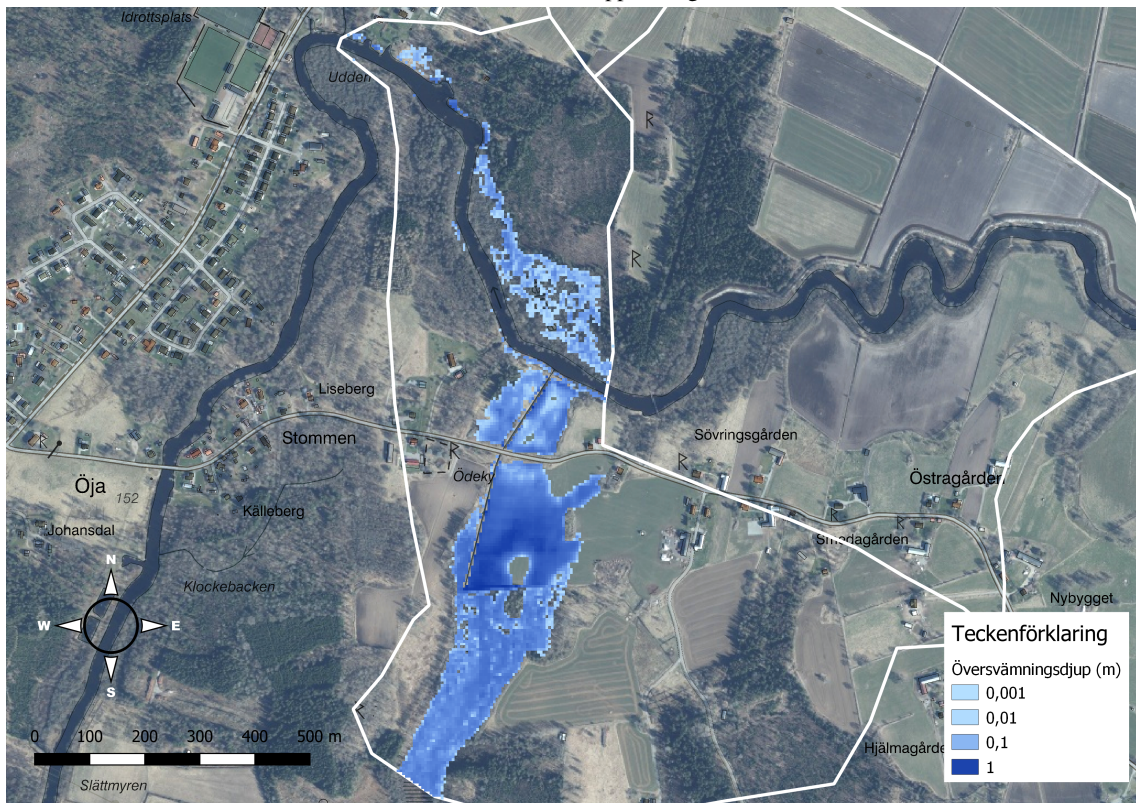


(b) Fem meters upplösning

**Figur 24:** Översvämningskartor för delavrinningsområde B vid Helige Å, med upplösning på två (a) och fem (b) meter. Simuleringen kördes med ett flöde på  $45 \text{ m}^3/\text{s}$ .



(a) Två meters upplösning



(b) Fem meters upplösning

**Figur 25:** Översvämningsskartor för delavrinningsområde C vid Helige Å, med upplösning på två (a) och fem (b) meter. Simuleringen kördes med ett flöde på  $45 \text{ m}^3/\text{s}$ .