

Slutrapport Projekt hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell och flödeslinjer

Sammanfattning

Pågående klimatförändringar innebär ökade nederbörds mängder i Sverige, därav finns ett ökat behov för aktörer i samhället att modellera vattenflöden så korrekt som möjligt. Detta samverkansprojekt har därför beviljats medel från Myndighetsnätverket för klimatanpassning (MNKA) för att utreda förutsättningarna för en myndighetsgemensam hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell och följdprodukten flödeslinjer.

Projektet är uppdelat i tre olika deluppdrag och är en fortsättning på det projekt som genomfördes 2022 inom Myndighetsnätverket för klimatanpassning - Förstudie flödeslinjer som myndighetsgemensamt underlag. I projektet ingår; Lantmäteriet, Skogsstyrelsen, SLU, SMHI, Trafikverket, Naturvårdsverket, Jordbruksverket, SGU, SGI och MSB.

De tre deluppdragen handlar om 1) att dela befintliga data och samla in användarbehov, 2) att utreda metod och indata för framtagande av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell samt hur produkten skulle kunna produceras och ajourhållas och 3) att undersöka hur flödeslinjerna skulle kunna integreras och/eller förbättra befintliga hydrografiprodukter på Lantmäteriet.

Testdata från SLU och Skogsstyrelsen tillgängliggjordes i samband med ett välbesökt webinarium där produkterna och deras användning presenterades. Användarbehov samlades därefter in via intervjuer och webbenkät. Totalt har 16 svar inkommit från 14 olika myndigheter och aktörer inom hydrografiområdet, exempelvis MSB, SMHI och Vattenmyndigheterna.

Användningsområdena är många och spridda, allt ifrån skyfallskartering och nationell kartläggning av vattenförekomster, till planeringsunderlag för återskapande av våtmarker. Detta gör att det kan vara svårt att tillgodose alla behov i en produkt.

Vid intervjuerna framkom att det finns behov av två olika upplösningar av hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell: 1 m x 1 m och 10 m x 10 m. Den grövre upplösningen används av vattenförvaltningen.

Den viktigaste produkten enligt undersökningen är Markhöjdmodell hydrologisk och inte dess följdprodukter som flödesackumulation i raster- och vektorformat (flödeslinjer).

En klar majoritet ser en nytta av ett myndighetsgemensamt koncept och samfinansiering av detta koncept.

Med utgångspunkten att Lantmäteriet skall stå för ett tillhandahållande av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell har vi tagit fram ett framställningskoncept som bygger på befintlig infrastruktur och befintliga data (punktmoln från flygburen laserskanning och bildmatchning) för framställning av den nationella markhöjdmodellen. Konceptet går ut på att införa geometriska representationer (brytgeometrier) för företeelser aktuella för hydrologiska korrigeringar i en markytrepresentation i form av en triangelnätstruktur. Triangelnätstrukturen används sedan för att ta fram en rasterrepresentation av den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen. Vi har testat konceptet i upplösningen 1 m x 1 m men behöver utvärdera möjligheterna att ta fram brytgeometrier anpassade för en upplösning på 10 m x 10 m.

För ett delavrinningsområde i Gävleborgs län har vi, baserat på data om vägtrummor från en omfattande inventering samt AI-identifierade vägtrummelokaliseringar, tagit fram olika underlag med brytgeometrier för vägtrummor i området. Dessa underlag har vi använt för att utvärdera indata för hydrologisk korrigering samt framställning av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell (1 m x 1 m) med tillhörande flödesackumulation och flödeslinjer.

När det gäller indata så belyser vår utvärdering att lägesnoggrannhet och fullständighet är en förutsättning för en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell av hög kvalitet. Att bygga upp en databas med företeelser för hydrologisk korrigering är därför av stor vikt. AI-baserade indata och andra datakällor kan dock utgöra ett komplement under förutsättning att data kan valideras.

Förutsatt att vi kan ta fram brytgeometrier för hydrologisk korrigering är vårt koncept för att ta fram en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell ej beroende av utgångspunkter hos användare. När det gäller flödesriktningar, flödesackumulation och flödeslinjer är dock användares utgångspunkter samt metodval betydelsefulla för resultaten. För en utgångspunkt, att vatten alltid skall flöda vidare, visar vår utvärdering att god metodkännedom är viktig vid hantering av gropar, sänkor och platta ytor och att tillhörande flödesstyrning behöver valideras då det finns potential att den leder till att signifikanta flöden leds fel väg. För att tillhandahålla en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell som uppfyller ett krav om flöden alltid skall ledas vidare är det därför nödvändigt att utreda lämpligt metodval och hur tillhörande flödesstyrning skall valideras.

Arbetsgruppen har diskuterat fram tre scenarier för hur flödeslinjerna skulle kunna integreras och/eller förbättra befintliga hydrografiprodukter på Lantmäteriet”:

- En helt integrerad produkt, där flödeslinjerna ingår i Hydrografi i nätverk (HiN).
- En kombiprodukt med två olika teman, HiN och Flödeslinjer, där flödeslinjerna har begränsad attributuppsättning och går att koppla ihop med HiN.
- Två helt separata produkter, som inte går att koppla ihop.

Arbetsgruppen testade att byta ut geometrierna på Lantmäteriets vattendrag mot flödeslinjerna framtagna från den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen och samtidigt behålla Hydrografi i nätverks attribut, med positivt resultat. Dock är metoden inte 100 % automatisk utan innehåller en del manuella steg, vilket gör att utbytet skulle ta tid. Vi ser också att flödeslinjerna inte alltid stämmer med hur vattendragen går i verkligheten och i många fall handlar det om de genombrytningar som gjorts i markhöjdmodellen. Även om vi justerar vattendragen efter flödeslinjerna så kommer de inte bli helt korrekta, även om de största avvikelserna kan justeras.

Den helt integrerade produkten blir väldigt stor och utrymmeskrävande, speciellt för användare som bara vill använda HiN. Kombiprodukten ser arbetsgruppen som mest praktisk och flexibel då användarna kan välja HiN och/eller flödeslinjer. Det finns dock flera svårigheter som behöver lösas innan den kan realiseras. Detta gör att vi ser två separata produkter som det rimligaste alternativet och det alternativ vi förordar om vi skulle ha ett tillhandahållande av flödeslinjer idag, tills dess att HiN:s vattendrag är så pass lägeskorrekta att de kan användas som indata vid framtagandet av flödeslinjer.

Utifrån de tre deluppdragen i projektet har vi sett att användare prioriterar en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell före följdprodukter och att metodvalet för hantering av gropar, sänkor och platta ytor så att vatten kan flöda vidare kan medföra att flöden leds fel väg. Sammantaget förordar därför Lantmäteriets arbetsgrupp att till en början fokusera på framställning och tillhandahållande av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell som inte hanterar gropar, sänkor och platta ytor och att tills vidare avvakta med följdprodukterna flödesriktningar, flödesackumulation och flödeslinjer, då dessa är beroende av metodval och utgångspunkter för analys och modellering.

Rekommendationer för fortsatt arbete i samverkan:

- Fokusera på framställning och tillhandahållande av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell (ej följdprodukter som flödeslinjer)

- Metod för att tillhandahålla och lagra två upplösningar, 1 m x 1 m och 10 m x 10 m
- Fortsatta utredningar kring indata och metod:
 - Bygga upp gemensam databas för väg- och järnvägstrummor med de data som behövs för att motsvarande hydrologiska korrigeringar skall ge flöden i korrekt riktning genom trummorna.
 - Utredda föreslagna indata från användarna.
 - Utredda och komma fram till gemensamma utgångspunkter och metodval för eventuell framtida framtagning av flödesackumulation och flödeslinjer.

Rekommendationer för fortsatt arbete på Lantmäteriet:

- Minska lägesosäkerheten i HiN
- Utredda förvaltande organisation och samfinansiering mellan myndigheter
- Grov kostnadsuppskattning för framställning, tillhandahållande och förvaltning av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell.

Innehåll

Sammanfattning	2
Ordlista	7
Introduktion	8
Projektet	8
1 Deluppdrag 1 Tillgängliggöra testdata och samla in användarnas behov och förväntningar	10
1.1 Metod	10
1.2 Resultat.....	11
1.2.1 Övergripande frågeställningar.....	11
1.2.2 Markhöjdmodell hydrologisk	12
1.2.3 Flödesackumulation	16
1.2.4 Flödeslinjer	17
1.2.5 Flödeslinjer – Hydrografi i nätverk	18
2 Deluppdrag 2 Framställning och tillhandahållande av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell och tillhörande flödeslinjer	21
2.1 Introduktion och avgränsningar	21
2.2 Indata till en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell	24
2.2.1 Grunddata nationell markhöjdmodell.....	24
2.2.2 Generella kvalitetsaspekter vid hydrologisk korrigering.....	26
2.3 Framställning, tillhandahållande och ajourhållning av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell och tillhörande produkter.....	27
2.3.1. Framställning och tillhandahållande av hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell	27
2.3.2 Prototypframställning av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell.....	29
2.3.3 Framställning och tillhandahållande av flödesriktningar, flödesackumulation och flödeslinjer för hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell.....	31
2.3.4 Ajourhållning av hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell och produkterna flödesriktningar, flödesackumulation samt flödeslinjer.....	32
2.4. Hantering av sjöar, sänkor och gropar i relation till olika utgångspunkter för modellering och analys.....	33
2.4.1. Fyllning	33
2.4.2. Genombrytning	33
2.5 Utvärdering av indata och metod för hydrologisk korrigering med fokus på vägtrummor och flödesstyrning vid gropar och sänkor	36
2.5.1. Utvärderingsunderlag markhöjdmodeller.....	36
2.5.2. Analys av översiktliga flödesmönster i anslutning till vägar.....	38
2.5.3. Analys av flödesackumulation vid flödeslinjepassage genom vägtrummor och över vägar.....	43
2.6 Diskussion arbetspaket Indata	58

2.6.1 Koncept för tillhandahållande och framställning av hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell	58
2.6.2 Kvalitetsaspekter relaterade till indata för hydrologisk korrigerig med avseende på vägtrummor.....	59
2.6.3 Flödesstyrning i relation till gropar och sänkor	62
3 Deluppdrag 3 Flödeslinjer i relation till Hydrografi i nätverk	64
3.1 Scenarier.....	64
3.1.1 Helt integrerad produkt.....	64
3.1.2 Kombiprodukt.....	64
3.1.3 Två helt separata produkter	65
3.2 Tillrättaläggning av HiN med hjälp av flödeslinjerna enligt kombiprodukten.....	66
3.2.1 Anpassa flödeslinjerna med HiN enligt kombiprodukten.	67
3.2.2 Generalisera vattendragen.....	68
3.2.3 Resultat av tillrättaläggning av HiN med hjälp av flödeslinjerna	68
3.3 Diskussion.....	72
4 Slutsats och rekommendationer för fortsatt arbete	73
5 Referenser	76

Ordlista

Brytgeometrier

Höjdsatta polygoner och syntetiska punkter för att säkerställa en god representation av särskilda företeelser i en TIN-representation av en markhöjdmodell. I ordinarie markhöjdmodell kan det handla om stödpunkter i anslutning till broar eller vattenytor som detekterats i nationell laserskanning. I en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell (enligt det koncept vi föreslår i detta projekt) implementerar brytgeometrier hydrologiska korrigeringar för relevanta företeelser, exempelvis vägtrummor.

Flödesackumulation

Den totala area som, för varje punkt i en rasterrepresentation av en digital markhöjdmodell, bidrar med det ytvattenflöde som ansamlas till respektive punkt.

Flödeslinjer

Linjer i vektorformat vilka representerar de vägar som ytvatten tar vid ett flöde genom en digital markhöjdmodell.

Hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell

Punktmoln och brytgeometrier från ordinarie markhöjdmodell samt ytterligare brytgeometrier för hydrologisk korrigering. Tillsammans så definierar dessa data en TIN-representation av hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell.

Markhöjdmodell hydrologisk

En produkt som SLU och Skogsstyrelsen har framställt och tillgängliggjort, en variant av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell.

Ordinarie markhöjdmodell

Befintlig nationell markhöjdmodell tillhandahållen från Lantmäteriet. Den nationella markhöjdmodellen består av punktmoln ifrån nationell laserskanning / flygbildsmatchning samt brytgeometrier vilka representerar de vattenytor som detekterats vid bearbetning av data från nationell laserskanning. Tillsammans definierar dessa data en representation av markhöjdmodellen i form av en TIN-modell. TIN-modellen ligger i sin tur till grund för Lantmäteriets markhöjdmodellsprodukter i rasterformat.

TIN-modell (Triangular Irregular Network)

En TIN-modell utgör en representation av markytan genom en triangelstruktur där höjdsatta punkter bildar triangelytorna som utgör en markhöjdmodell. I en TIN-modell kan brytgeometrier användas för att säkerställa att topografin vid skarpa förändringar i landskapet representeras korrekt, exempelvis vid strand- och dikeskanter m.m.

Topografi 10

Lantmäteriets mest detaljerade karta. Den innehåller bland annat byggnader, markslag och vägar. Uppdateringen av informationen sker dels periodiskt i Lantmäteriets egen regi, dels mer kontinuerligt i samverkan. Insamlingen i egen regi genomförs genom tolkning i flygbilder i stereo och ortofoto. Samverkan över hela landet sker för byggnader, vägar, kraftledningar, NSL-objekt (Nationell strandlinje), naturvårdsområden och militära områden.

Introduktion

Pågående klimatförändringar innebär ökade nederbörds mängder i Sverige och därav finns ett ökat behov för aktörer i samhället att modellera vattenflöden så korrekt som möjligt. Nuvarande hydrologisk information som redovisas i Lantmäteriets produkt Topografi 10 och Hydrografi i nätverk (HIN) innehåller inte alla permanenta vattendrag och de mindre vattendragen kan dessutom ha ett osäkert läge. Modellering av vattenflöden utifrån Lantmäteriets befintliga markhöjdmodell är också begränsad av det finns företeelser (exempelvis väg- och järnvägstrummor) som påverkar hur vatten flödar men som inte omfattas av modellen.

Många användare av hydrologisk information har därför ett intresse av att gemensamt utreda möjligheterna för framtagandet av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell samt följdprodukter som flödeslinjer.

Samverkansprojektet Hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell och flödeslinjer har därför beviljats medel från Myndighetsnätverket för klimatanpassning (MNKA) för att utreda förutsättningarna för en myndighetsgemensam informationsmängd.

Projektet är en fortsättning på det projekt som genomfördes 2022 inom Myndighetsnätverket för klimatanpassning - *Förstudie flödeslinjer som myndighetsgemensamt underlag*.

Att genomföra utredningarna i samverkan borgar för att myndigheter i framtiden inte skapar egna hydrologiskt korrigerade markhöjdmodeller. Att arbeta med en gemensam modell ger ett enhetligt beslutsunderlag och är kostnadseffektivt för samhället.

Projektet

Projektets uppdrag är att öka förståelsen för vilka möjligheter en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell och flödeslinjer ger, samt få en fördjupad bild av samhällets behov och skapa en samsyn mellan intressenter.

Projektet genomförs i tre steg:

1. Dela befintliga data och kunskap med externa intressenter för att öka förståelsen för vilka möjligheter informationsmängden ger, få en fördjupad bild av samhällets behov och skapa en samsyn mellan intressenter.
2. Utreda metod och indata för framtagande av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell samt hur produkten skulle kunna produceras och ajourhållas.
3. Utreda kopplingar till Hydrografi i nätverk och ta fram ett förslag på hur flödeslinjerna skulle kunna bidra till förbättringar.

I samverkansprojektet ingår:

Namn	Organisation	Roll i projektet
Linnéa Söderblom	Lantmäteriet	Projektledare
Esbjörn Andersson	Lantmäteriet	Arbetsgrupp
Erik Sisell	Lantmäteriet	Arbetsgrupp
Pia Karlsson	Lantmäteriet	Arbetsgrupp
Mattias Lindman	Lantmäteriet	Arbetsgrupp
Anika Henriksson	Lantmäteriet	Arbetsgrupp
Maria Andersson	Lantmäteriet	Arbetsgrupp
William Lidberg	Sveriges lantbruksuniversitet (SLU)	Arbetsgrupp
Liselott Nilsson	Skogsstyrelsen	Arbetsgrupp
Daniel Björkert	Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI)	Arbetsgrupp
Klas Hansson	Trafikverket	Arbetsgrupp
Agne Gunnarsson	Trafikverket	Arbetsgrupp
Matti Ermold	Naturvårdsverket	Referensgrupp
Carin Hayer	Jordbruksverket	Referensgrupp
Maja Coghlan	Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB)	Referensgrupp
Erik Bern	Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB)	Referensgrupp
Sebastian Bokhari Irminger	Statens geotekniska institut (SIG)	Referensgrupp
Cecilia Karlsson	Sveriges geologiska undersökning (SGU)	Referensgrupp

1 Deluppdrag 1 Tillgängliggöra testdata och samla in användarnas behov och förväntningar

Den första aktiviteten fokuserar på att dela befintliga data och bredda bilden av samhällets behov och användning av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell samt flödeslinjer. Detta görs tillsammans med externa intressenter.

1.1 Metod

Forskare på SLU har i samverkan med Skogsstyrelsen tagit fram en metod för hydrologisk korrigering av en höjdmodell samt skapat en produkt som kallas Markhöjdmodell hydrologisk och producerat flödeslinjer/flödesackumulation i raster- och vektorformat. Produkterna skall användas inom regeringsuppdraget Återvätning, inom EU-projektet Grip on Life och inom egen tillsynsverksamhet.

Det framtagna produktpaketet tillgängliggjordes under hösten 2024 i samband med ett webinarium med ca 100 deltagare. Där presenterades produkterna och hur Skogsstyrelsen använder dessa, detta för att öka intressenternas förståelse kring möjligheterna med datamängden. Detta projekt presenterade behovet av att samla in användarbehov för att få feedback på kvalitet och brister, samt förståelse för vilken ytterligare utveckling som krävs för att svara mot samhällets behov.

Inför webinariet och tillgängliggörandet av data lyftes frågeställningar med syfte att...

1. ...samla information från användare om vilka behov som behöver uppfyllas för att kunna ta fram myndighetsgemensamma produkter relaterade till en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell.
2. ...få kunskap om vilka som har dessa behov. Detta för att i ett senare skede kunna utreda om en myndighetsgemensam produkt skulle kunna samfinansieras av flera myndigheter.
3. ...ta reda på relationen mellan flödeslinjer och Hydrografi i nätverk utifrån ett användarperspektiv.

Utifrån frågeställningarna skapades en webbenkät samt ett frågebatteri för intervjuer.

1.2 Resultat

I resultatdelen ingår en sammanfattning av resultatet från intervjuerna och enkätsvaren. En total sammanställning av intervjuernas och enkätens frågor och svar finns i bilaga 1.

Totalt finns 16 svar. Flera personer från samma organisation kan ligga bakom ett svar, men i vissa fall har två olika personer svarat från samma organisation. Inga av frågorna förutom kontaktuppgifter var obligatoriska och därmed finns det inte 16 svar på varje fråga.

Intervjuer är gjorda med: SMHI, Trafikverket, Vattenmyndigheterna, MSB och Scalgo.

Enkätsvar från: Jordbruksverket, SIG, Naturvårdsverket, Länsstyrelsen Norrbotten, Länsstyrelsen Västra Götaland, Skogsstyrelsen, SLU och HaV.

Enkäten och intervjuerna är uppdelade i fem delar och i dessa fem delar presenteras svaren:

1. Övergripande frågeställningar
2. Markhöjdmodell hydrologisk
3. Flödesackumulation
4. Flödeslinjer
5. Flödeslinjer - Hydrografi i nätverk

1.2.1 Övergripande frågeställningar

Vid den första frågan fick de svarande prioritera produkterna. Tio svarar att Markhöjdmodell hydrologisk är av störst vikt och en svarande placerar den på andra plats. I denna fråga finns totalt 15 svar.

Nio av de svarandena anger att de skapar eller delvis skapar liknande produkter själva.

Endast tre svarar på vad det kostar för dem att skapa en Markhöjdmodell hydrologisk: upp till en miljon, ca 1 miljon samt två persondagar per kommun i arbetstid.

12/16 svaranden ser en nytta av att samfinansiera framtagandet av dessa produkter myndighetsgemensamt.

Vid frågan om svarandena tror att deras organisation kan bidra till samfinansiering så svarar fem ja och de flesta vet ej. Detta känns förväntat då de flesta som svarar inte har ekonomiskt ansvar.

Vi har identifierat två olika behov av upplösning av produkterna – den mest detaljerade 1 m x 1 m (ursprungsprodukterna från SLU och Skogsstyrelsen) samt en grövre på 10 m x 10 m (förutom flödeslinjerna där behovet endast finns utifrån den mer detaljerade nivån).

Den grövre nivån används av vattenförvaltningen (HaV, LST, VM, SMHI osv) i arbetet med vattenförekomster och beräkningar på avrinningsområden. Positivt med den är att den harmoniserar med Nationellt marktäckedata (NMD).

Några av de övriga kommentarerna:

"Ta fram ett sammanhållet paket med hydrologiskt rasterdata som förvaltas nationellt."

"Att produkterna är kompatibla med varandra är viktig. dvs att man kan överföra data från flödeslinjer till hin eller till haro och daro till Topografi 10 och tillbaka."

"Väldigt bra arbete ni gör."

"Fantastiskt underlag med stor potential!"

1.2.2 Markhöjdmodell hydrologisk

Markhöjdmodell hydrologisk är en korrigerad höjdmodell där vatten kan rinna från varje pixel i landskapet ut till älvar och havet. Smala passager har introducerats över vägar för att minska felen i topografiska och hydrologiska modeller.

Användningsområden för Markhöjdmodell hydrologisk:

- Översvämningskartering
- Utredda påverkansområden vid skapandet av våtmarken
- Beräkna potentiell koldioxidinlagring i mark
- Bättre övergödningsberäkningar
- Bättre erosionsriskberäkningar
- Bättre planering för återskapande av våtmarker
- Bedöma vad som är diken eller bäckar
- Snabbare hydrologisk analys vid återvätning av dikad torvmark
- Riskbedöma negativ påverkan på vattenmiljöer nedströms skogsbruksåtgärder
- Korrekta hydrologiska analyser vid restaurering
- Identifiera vattendrag, mäta lutning längs vattendraget och rita avrinningsområden
- Ingångsdata till den nya restaurerings-förordningen, underlag för modeller och analyser inför restaureringsinsatser
- Vegetationstyp likt marktäckedatabas
- Generera avrinningsområden som i sin tur används till hydrologiska och oceanografiska modeller samt hydrologisk prognos och varningsverksamhet
- Identifiera vilka vattendrag och kustvatten som ska representera de vattenförekomster som Sverige ska rapportera till EU enligt vattendirektivet
- Utveckla beräkningsmetoder för skyddsområden enligt dricksvattendirektivet
- Klimat- och sårbarhetsanalyser
- Se vattenansamlingar på jordbruksskiften

Tabell 1. Indata till produkten Markhöjdmodell hydrologisk som SLU och Skogsstyrelsen har tagit fram

Indata till Markhöjdmodell hydrologisk	Källa	Beskrivning / kommentar
Markhöjdmodell Nedladdning, grid 1+	Lantmäteriet	Baseras på Lantmäteriets nationella höjdmodell. Framställd och uppdaterad genom laserskanning och flygbildsmatchning.
Dikesnätverk	Skogsstyrelsen / SLU	AI-generat dikesnätverk, rikstäckande. Djupet på inbränningen beror på sannolikheten av att diket existerar.
Statliga vägtrummor	Trafikverket	
Kompletterande vägtrummor	Skogsstyrelsen / SLU	AI-genererade, rikstäckande.
Kompletterande vägtrummor	SLU/Lantmäteriet	Identifierade genom skärningspunkter mellan vattendrag och vägar från Lantmäteriets Topografi 10.
Avrinningsområden	SLU	

Tabell 2. Möjliga indata till Markhöjdmodell hydrologisk enligt enkät- och intervjustavaren samt arbetsgruppen. Observera att dessa är möjliga indata som behöver utredas.

Möjliga indata till Markhöjdmodell hydrologisk	Källa	Beskrivning / kommentar
Vägtrummor	Länsstyrelsen	Finns i biotopsdatabaser
Avrinningsområden	SMHI	
Vandringshinder i VISS		
Grundvillkorsdiken	Jordbruksverket	
Dikesrepresentation	Trafikverket	Ur skanningen på statliga vägar
Järnvägstrummor	Trafikverket	
Stomlinjer	Lantmäteriet	
Flygfoto	Lantmäteriet/ annan part	

Indata framtagen genom AI:

Det finns flera synpunkter på AI-framtaget indata, mertalet menar att det inte bör vara med som indata om det inte är verifierat, medan några tycker att det ger mer riktighet med AI-vägtrumorna.

Exempel på kommentarer:

"Får gärna vara upp över 90% sannolikt att det stämmer innan AI-genererade diken och trummor hamnar i produkten."

"Man vill verifiera att de verkligen finns och ligger korrekt innan inbränning."

"AI genererade data är sannolikhetsdata och vi tycker inte att dessa bör ingå som indata, om den inte är kontrollerad och dokumenterad."

"Det blir ändå bättre med någon mer trumma än för lite trummor, tänker jag."

Dokumentation och kvalitet

Det finns ett stort behov av att indata, metodval och felkällor är väl dokumenterade i en produktbeskrivning och gärna ett skikt som anger vart inbränningarna har skett.

För vissa tillämpningar är det väldigt viktigt att det som bränns in ligger korrekt men i andra tillämpningar är det mindre viktigt. Exempelvis så minskar känsligheten något då upplösningen är 10 m x 10 m.

Flera pekar även på att de fel som hittas måste kunna hanteras av förvaltande organisation och rättas upp i indata.

Kommentarer:

"Tror att generellt så kan man säga att det är viktigt att det som hamnar i produkten är korrekt mer än att den blir allomfattande. Dvs man kan lita på att det som syns där faktiskt finns. Exempel att vattnet faktiskt rinner genom kulverten som är insprängd och att diket faktiskt existerar och iallafall vid skyfall är vattenfyllda osv. Less is more."

"Kvalitén som produkterna håller nu räcker för oss."

"Viktigt att en förvaltningsorganisation skapas som kan ta hand om upptäckta fel och korrigera underlagen. Man kommer hitta mycket fel vid tillämpning och de behöver hanteras."

"Det är viktigt att kvalité och metodval, felkällor är dokumenterat och tydligt framgår i en produktbeskrivning."

Övrigt om Markhöjdmodell hydrologisk

Vi har vid intervjuerna identifierat två typer av hydrologiskt korrigerade markhöjdmodeller – en typ för skyfallskartering där det är intressant att se var vattnet samlas, samt en där utgångspunkten är att vattnet måste rinna vidare. Mer om dessa typer finns i introduktionen av deluppdrag 2.

Övriga kommentarer om Markhöjdmodell Hydrologisk

"Det finns ett stort behov av denna typ av data och det är viktigt, speciellt i myndighetsvärlden, att inte uppfinna hjulet om och om igen. Det är också bra när data bygger på samma underlag, eftersom det ökar förutsättningen att olika resultat harmoniserar och går att kombinera med varandra."

1.2.3 Flödesackumulation

Flödesackumulation visar storleken på avrinningsområdet till varje pixel i Markhöjdmodell hydrologisk och kan användas tillsammans med flödesriktningar för att modellera vattendrag som flödeslinjer.

Användningsområden:

- Identifiera vattendragsförekomster
- Beräkning av riskområden för dricksvattenintag
- Information om tillrinning i olika punkter i landskapet
- Skapa flödeslinjer
- Miljöåterställningssammanhang för att optimera var åtgärder genomförs
- Samma som höjdmodell
- Beräkna potentiell näringsretention för en våtmark
- Att så korrekt som möjligt kunna avgränsa det område som berörs uppströms/nedströms vid diverse olika utredningar
- Uppskatta vattenföring i punkter och då kan flödesackumulering i kombination med avrinning nyttjas
- Identifiera vattendragsvattenförekomster
- Beräkning av riskområden för dricksvattenintag

Indata över Norge och Finland

Indata över Norge och Finland behöver tillföras för att flödesackumuleringsrastret ska bli så korrekt som möjligt, då det finns inflöden från Norge och Finland till Sverige.

Övriga kommentarer om flödesackumulering:

"Det är viktigt att inte tappa bort flödesriktningsgriden i sammanhanget, eftersom det är de som används vid beräkningen av avrinningsområden som är en viktig del av denna typen av data. flödesriktningar är kanske dessutom den svåraste datamängden att sampla om, tex från 1x1m till 10x10m"

"Vi behöver veta den exakta storleken på avrinningsområdet för att kunna areakorrigera flödet."

1.2.4 Flödeslinjer

Flödeslinjer är ett vektorbaserat nätverk framtaget från Markhöjdmodell hydrologisk och bildar ett sammanhängande nätverk från mycket små vattendrag och diken ut till större åar och älvar.

Flödeslinjerna korrelerar därför bättre mot Markhöjdmodell hydrologisk än vad Hydrografi i nätverk gör.

Ingen svarande har ett behov av att flödeslinjerna ska följa svensk vattenstandard men tre svaranden tycker att de bör följa Inspire.

4 svaranden ser ett stort behov av historik/versionshantering på flödeslinjerna.

Önskvärda attribut på Flödeslinjer:

- Län, Haro, Vattenförekomst-ID, strahlerordning, huvudfåra/sidofåra, sjö/vattendrag
- Typ av flödeslinje: ett sel, ström, fors eller fall
- Om det är ett dike, vattendrag eller annan vattensamling/typ
- Vilket HiN-segment de rinner ut i. Gärna även vilket VARO det ligger i
- Modellerad bredd
- Avrinningsområde, klassning av flödestorlek förslagsvis tre klasser
- En koppling till HiN så att det går att göra nätverksanalyser på HiN och flödeslinjerna
- Höjdprofil längs flödeslinje
- Längd, bredd och datum

Övriga kommentarer om flödeslinjer

"Mycket viktig produkt"

1.2.5 Flödeslinjer – Hydrografi i nätverk

Hydrografi i nätverk (HiN) innehåller hydrografisk information strukturerad enligt Inspires dataspecifikation respektive svensk vattenstandard SS637008:2015; sjöar och vattendrag samt tillhörande information med anknytning till dessa, till exempel fors, damm och vattenfall. I produkten ingår även ett geometriskt nätverk enligt Inspire och ett logiskt nätverk enligt svensk vattenstandard.

Flödeslinjer är ett vektorbaserat nätverk framtaget från Markhöjdmodell hydrologisk och bildar ett sammanhängande nätverk från mycket små vattendrag och diken ut till större åar och älvar.



Figur 1.2.5.1 De tjockare linjerna representerar Hydrografi i nätverk och de tunnare Flödeslinjerna

Vid frågan om man bör se Flödeslinjer och HiN som två separata produkter svarar fem ja och fem nej.

Därefter presenterades två olika alternativ på integrering av produkterna, dessa presenteras mer ingående i deluppdrag 3:

Alt 1: En kombinerad produkt där man har möjlighet att koppla på flödeslinjerna till HiN, men flödeslinjerna har mindre/annan attributuppsättning än HiN. Detta alternativ tycker två svaranden är det bästa alternativet.

Kommentarer:

"Finns bättre data ska HiN uppdateras men måste fortsatt bli hanterbart."

"Jag tror att detta är det bästa eftersom användningsområdena i många fall skiljer sig åt. Exempelvis har både SMHI och Skogsstyrelsen behov av denna typ av data men SMHI arbetar mer på makronivå och där är HiN för detaljerat medan HiN för Skogsstyrelsen är för grovt och för dem är flödeslinjer en bättre skala."

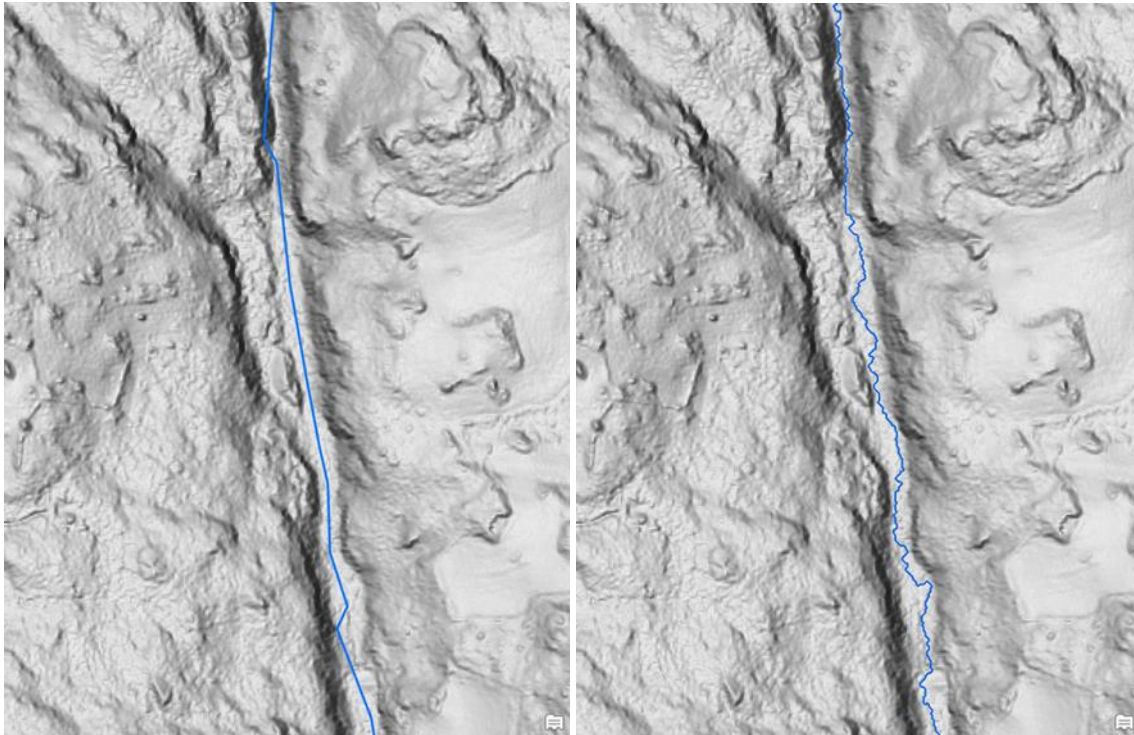
"För HiN som används vid EU-rapportering osv är det kanske ett större behov av att vara enligt standarden än vad det är för flödeslinjer i alla fall från vår horisont."

Alt 2: En produkt där flödeslinjerna ingår i nätverket i HiN, följer svensk vattenstandard respektive Inspire och har motsvarande attributuppsättning som HiN. Detta alternativ föredrar tre svaranden. Kommentarer:

"Detta skulle innebära att en redan stor produkt blir ännu större och otympligare att arbeta med."

"Ser inget värde i att hålla produkterna separat så länge det finns en smart attributsättning som gör att du tex via en definitor query kan välja vad du ska se. Dubbla underlag kommer bara komplicera det hela och göra att olika personer arbetar med olika underlag."

"Det skulle vara praktiskt att kunna göra nätverksanalyser på även de mindre vattendragen."



Figur 1.2.5.2 Den vänstra bilden visar HiN och den högra flödeslinjer.

De beräknade flödeslinjerna har ett "pixligt" (p.g.a. att flödeslinjevektorerna är framtagna från rasterdata och har därför ett kantigt utseende) utseende jämfört med HiN:s manuellt karterade vattendrag. Vid frågan om användarna ser det som problematiskt om HiN skulle få ett mer pixligt utseende utifrån flödeslinjerna så svarar fyra att de inte ser något problem med det medan sju svarar att de föredrar ett mindre pixligt utseende.

Kommentarer:

"Pixligheten innebär betydligt mer noder vilket ger större filer vilket gör data otympligt och svårarbetat. Eftersom vattnet inte rinner i zick zack utan rakaste vägen inom flodfåran ökar pixligheten längden på linjerna som därför sämre representerar verkligheten."

"En uträtning bör göras med försiktighet så att linjerepresentationen fortfarande håller sig i bäckfåran."

"Ju högre precision, desto bättre. HiN's mer raka linjer gör att längdberäkningar inte stämmer överens med verkligheten."

"Vi skulle rekommendera att använda en smooth-funktion för att minska antalet brytpunkter. Blir en mer hanterbar och användarvänlig produkt."

"Lägesnoggrannhet viktigt, men inte till kostnad av pixlighet."

"Pixligt – realistiskt lång tid vid dynamiska analyser. Medelvärdesbildning kan snygga till."

"Spontant spelar det ingen roll. Att den är pixlig kan ju också innebära att den är mer korrekt än den manuellt ritade linjen."

Vid en prioritering av vad som är den viktigaste kvalitetshöjningen i HiN svarade flest, tre svaranden, att det är viktigast att minska lägesosäkerheten. Två tyckte att det är viktigast att HiN förtätas och en tyckte att det var viktigast att man kan koppla ihop HiN med flödeslinjerna.

Övriga önskemål för HiN:

"Koppla Hin till linjetyp, (stomlinjer, mm) Var bättre i Svar. Minska antalet uppdateringar, gå mot stabilt system"

"Extrahera uppskattning av vattendragsbredd på vattendrag <6m och även generera vattenyta för motsvarande vattendrag < 6m."

Övriga kommentarer om flödeslinjernas koppling till HIN:

"Vi tycker att det är viktigt att tydligt hålla isär AI genererade och klassiskt framtagna data/produkter."

"Viktigt med en koppling till HIN så att det går att göra nätverksanalyser på HIN och Flödeslinjerna"

"HiN är det underlag jag arbetar främst med. Allt mitt arbete baseras på HiN, om det så är att analysera konnektivitet, skatta rensningsgrad baserat på flottning mm. HiN i nuläget är ganska svårarbetat som det är då det saknar attribut, inte fångar upp kapillärbäckarna etc. Ett HiN som går utifrån flödeslinjer med vettiga attribut som gör att du kan arbeta smart med det är min högsta önskan för mitt arbete."

"HiN är redan ett väldigt omfattande nätverk av vektorer. Jag tror att de flesta användningarna inte behöver ett ihopslaget HiN & flödeslinjer. Men att ha ett flödeslinjenät som enkelt kan slås ihop med HiN skulle vara användbart för mig."

"Vi föredrar att HiN lämnas orört och att det kan tas fram kompletterande produkter."

2 Deluppsdrag 2 Framställning och tillhandahållande av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell och tillhörande flödeslinjer

Ett av syftena med detta projekt är att utreda förutsättningarna för en rikstäckande hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell med tillhörande flödesriktningar, flödesackumulation och flödeslinjer som myndighetsgemensamma produkter/informationsmängder. Ifrån deluppsdrag 1 har vi sett att det finns många olika användningsområden för en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell hos de myndigheter vi har intervjuat. Dessa olika användningsområden innebär rimligtvis olika former av modellering och analyser med den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen eller tillhörande produkter som grund.

Med vattenflödesmodellering som exempel går vi nedan (avsnitt 2.1) in på hur vi avgränsat vårt arbete i deluppsdrag 2 om framställning och tillhandahållande av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell med tillhörande härledda informationsmängder som myndighetsgemensamma produkter. Därefter kommer vi ta upp grundläggande indata till en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell (avsnitt 2.2), framställning, tillhandahållande och ajourhållning av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell (avsnitt 2.3), hantering av sänkor och gropar (avsnitt 2.4) i relation till olika utgångspunkter för modellering och analys, utvärdering av indata och metod för hydrologisk korrigering med fokus på vägtrummor och genombrytning (avsnitt 2.5) samt sammanfatta med reflektioner och rekommendationer (avsnitt 2.6).

2.1 Introduktion och avgränsningar

Vid modellering och analys av vattenflöden i landskapet är det, liksom vid all annan modellering av verkliga processer, några faktorer som är viktiga för resultaten:

- Förenklingarna av verkligheten i använda modeller (förenklingar är nödvändiga eftersom verkligheten är komplex).
- Underlag och indata till modellering och analys.
- Antaganden och utgångspunkter för modellering och analys.

Vattenflöden i ett landskap påverkas av faktorer såsom topografi, jord- och bergarters egenskaper och hur markens förmåga till infiltration av vatten varierar från plats till plats. En vanlig förenkling vid modellering av vattenflöden med hjälp av digitala höjdmodeller är att ingen infiltration sker, d.v.s. att allt vatten är ytvatten. Denna förenkling innebär att det vid modellering enbart är topografin som styr vilka vägar som vatten tar genom ett landskap och var vattenflöden koncentreras.

Eftersom syftet med modellering är att studera och analysera verkliga processer är det av vikt att utvärdera modelleringens kvalitet utifrån resultatens överensstämmelse med verkligheten. Förenklingen att allt vatten anses vara ytvatten vid modellering av vattenflöden innebär dock att direkta jämförelser mellan modellering och verklighet för mängden vatten i en viss punkt i landskapet (exempelvis i utloppet av ett vattendrag i en sjö) kan vara svåra att använda för att definiera kvaliteten i en modellering. Om vi dock kan se att det övergripande mönstret i hur modell och verklighet koncentrerar och styr vattenflöden i landskapet stämmer överens så innebär det rimligtvis en modellering av hög kvalitet.

Att en digital markhöjdmodell skall styra vattenflöden på ett sätt som väl överensstämmer med hur vatten flödar i ett landskap innebär att alla företeelser som på ett väsentligt sätt påverkar faktiska vattenflöden bör representeras i den digitala markhöjdmodellen. Detta är en utmaning eftersom det kan förekomma att sådana företeelser representeras delvis eller inte alls i det underlag som ligger till grund för en digital markhöjdmodell. Exempelvis så kan diken, på grund av vegetation, få en

ofullständig representation i ett dataunderlag där vegetationen försvårar möjligheten att representera markytan i diket. Trummor genom väg- och järnvägsbankar är ett annat exempel där dessa inte kan representeras på ett sätt som styr vattenflöden i en vanlig markhöjdmodell eftersom dessa ligger dolda under markytan (väg- eller järnvägsbank) och tillhörande flödesvägar inte detekteras vid exempelvis flygburen laserskanning.

För att uppnå en hög kvalitet i modellering av vattenflöden med digitala markhöjdmodeller är det en nödvändighet att dessa inkorporerar hydrologiska korrigeringar som är relevanta för att modellerade vattenflöden väl skall representera hur vattenflöden styrs och koncentreras i ett landskap. En sådan markhöjdmodell kan benämnas en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell (HK-DEM). För att en sådan markhöjdmodell skall hålla hög kvalitet är två förutsättningar att de hydrologiska korrigeringarna dels styr flöden på rätt väg och dels att lokaliseringen av korrigeringarna har hög kvalitet. Detta innebär i sin tur är att underlag och indata för att ta fram hydrologiska korrigeringar behöver vara tillförlitliga och ha hög lägesnoggrannhet.

Projektet avgränsar sig till en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell för ytvattenflöden i ett landskap och beaktar inte infrastruktur såsom ledningsnät för dagvatten i stadsmiljö. Underjordiska vattenledningar är inte lämpliga att inkludera som hydrologiska korrigeringar i en modell för ytvattenflöden då sådana korrigeringar (öppna kanaler som representerar vattenledningarna) skulle kunna påverka ytvattenflöden och ge vilseledande resultat. Om en underjordisk vattenledning införs som en öppen kanal i en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell kan ytvatten styras till denna kanal längs hela dess sträckning i stället för att bara styras till dess startpunkt (inloppet till den underjordiska vattenledningen). Modellering av vattenflöden i stadsmiljö som både beaktar ytvattenflöden och flöden i underjordiska ledningsnät kräver därför andra angreppssätt än renodlad modellering av ytvattenflöden med hjälp av en digital markhöjdmodell. Modeller som inkorporerar även underjordiska ledningsnät är dock utanför ramen för detta projekt.

Antaganden och utgångspunkter vid modellering har också stor betydelse. Vid framtagning och analys av avrinningsområden på nationell nivå, såsom i exempelvis SMHI:s verksamhet, är en utgångspunkt att inget vatten får stanna upp någonstans. SMHI:s avrinningsområden får inte innehålla hål vilket skulle bli fallet om vatten stannar upp i underliggande höjdmodell. Detta innebär att sänkor, gropar eller platta områden i använd höjdmodell behöver hanteras för att vatten skall kunna rinna vidare. Värt att notera här är att det finns olika metoder och verktyg för sådan hantering, och det kommer vi tillbaka till i avsnitt 2.4.

Vid skyfallskartering med hjälp av en digital markhöjdmodell är det intressant att studera var vatten samlas eftersom detta indikerar områden som är känsliga för översvämningar vid kraftig nederbörd. En hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell för sådan modellering bygger alltså på utgångspunkten att vatten tillåts stanna upp och ansamlas, vilket alltså är motsatsen till utgångspunkten för att ta fram avrinningsområden på nationell nivå.

Ytterligare en aspekt att beakta vid hydrologisk modellering och analys är hur bestämningar av flödesriktningar skall gå till eftersom detta påverkar flödesackumulation och relaterade flödeslinjer. Två metoder för bestämning av flödesriktningar och fördelning av flöden i en rasterrepresentation av en digital höjdmodell är D8 samt MFD (multiple flow direction). Medan D8-metoden bygger på att vidareflöde från en cell i ett höjdmodellsraster enbart kan ske till en av de åtta omgivande cellerna så kan vidareflödet fördelas till flera av de omgivande cellerna i MFD-metoden.

Under arbetet med deluppdrag 1 har det framkommit behov av en upplösning på både 1 m x 1 m och 10 m x 10 m för en rikstäckande hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell i rasterformat. För relaterade produkter som flödesriktningar, flödesackumulation och flödeslinjer skulle detta i sin tur

medföra att dessa också behöver tas fram och tillhandahållas i två uppsättningar, en för varje upplösning.

I det arbete vi utfört i detta projekt när det gäller framställning av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell och relaterade produkter har vi haft som utgångspunkt att Lantmäteriet skall stå för tillhandahållande och ajourhållning. Vi har vidare avgränsat det arbetet till att enbart omfatta en prototyp för framställning i upplösningen 1 m x 1 m. När det gäller indata för hydrologisk korrigering har vi avgränsat oss till att enbart titta på vägtrummor utifrån ett underlag med inventerade trummor i Gävleborgs län. Slutligen har vi, metodmässigt, också begränsat oss till att använda D8-metoden för flödesriktningar och flödesfördelning samt att utvärdera genombrytning (se avsnitt 2.4) som metod för hantering av sänkor, gropar och platta ytor.

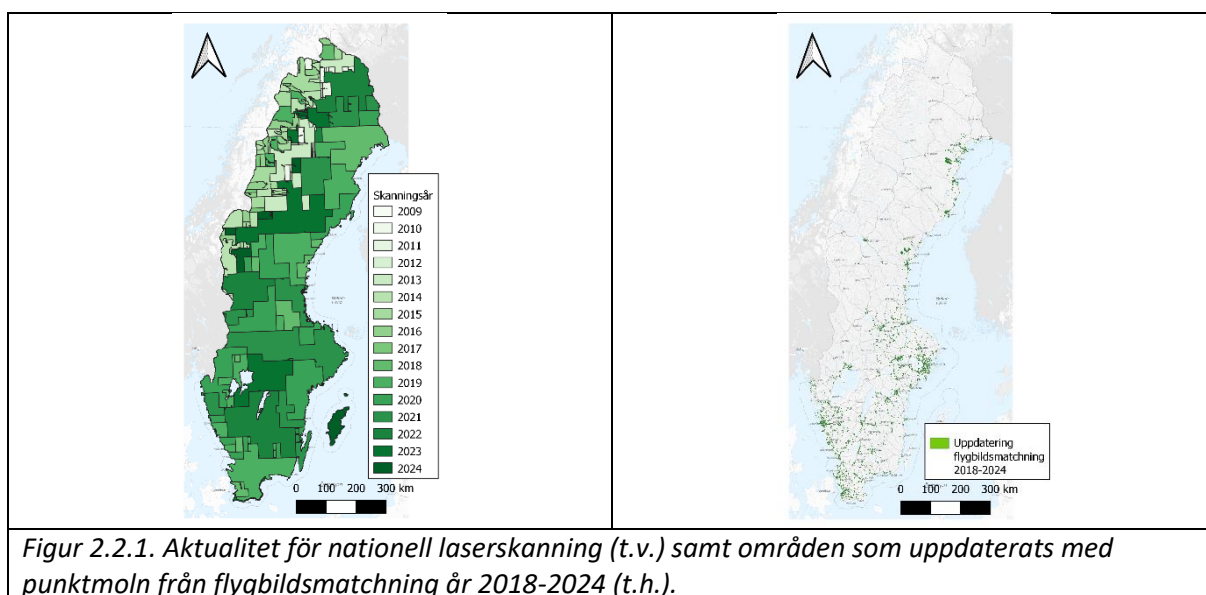
2.2 Indata till en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell

De data som ligger till grund för den nationella markhöjdmodellen utgör även grundläggande data för en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell. I avsnitt 2.2.1 beskriver vi därför dessa data och tar samtidigt upp kvalitetsaspekter relaterade till framställningen av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell. När det gäller indata för hydrologiska korrigeringar så ger tabell 1 (se avsnitt 1.2.2) en sammanställning av de indata som använts för detta i tillhandahållna exempelprodukter från Skogsstyrelsen/SLU. I tabell 2 (avsnitt 1.2.2) ser vi även en sammanställning av (under arbetet med deluppdrag 1) föreslagna indata för hydrologiska korrigeringar. Vi kommer inte diskutera olika indata för hydrologiska korrigeringar ytterligare i detta avsnitt. I stället tar vi, i avsnitt 2.2.2, upp några generella kvalitetsaspekter att beakta när det gäller indata för hydrologiska korrigeringar.

2.2.1 Grunddata nationell markhöjdmodell

Sveriges nationella markhöjdmodell bygger huvudsakligen på punktmolnsdata insamlade genom flygburen laserskanning men i viss mån även på punktmoln från matchning av flygbilder från det nationella bildförsörjningsprogrammet. Laserskanning under åren 2009-2019 resulterade i den första täckningen av Sverige med en punkttäthet om minst ½ punkt per kvadratmeter. Projektet Skoglig laserskanning har därefter tagit vid och under åren 2018-2024 uppdaterat i princip alla områden utom fjälltrakterna med nya punktmoln där punkttätheten är minst 1 punkt per kvadratmeter. I och med att detta projekt fortsätter innebär det att större delen av Sverige kommer laserskannas en tredje gång från slutet av 2024 och framåt. Punkttätheten kommer fortsatt vara minst 1 punkt per kvadratmeter.

I takt med att upprepad laserskanning över ett område ersätter tidigare insamlade data så uppdateras den nationella markhöjdmodellen genom att nyinsamlade data ersätter tidigare data. Om det dock är lång tid kvar till dess att ett område kommer skannas igen i den skogliga laserskanningen så kan den nationella markhöjdmodellen även uppdateras med hjälp av flygbilder, om området har flygfotograferats i det nationella bildförsörjningsprogrammet under en insamlingssäsong. Uppdatering av den nationella markhöjdmodellen sker då om punktmoln från bildmatchning visar på förändringar jämfört med den befintliga modellen. I sådana fall så uppdateras enbart det område som uppvisar förändringar. Figur 2.2.1 visar aktuell aktualitet för nationell laserskanning i Sverige samt områden som uppdaterats med flygbildsmatchning under åren 2018-2024.



Den bearbetning som görs av insamlade data i nationell och skoglig laserskanning innebär i korthet att klassificeringen av punktmolnen ses över och att säkerställa att bropunkter klassas som klass 17, att punkter på kraftverksdammar klassas som markpunkter (klass 2) och att punkter som representerar vatten klassas som vattenpunkter (klass 9). Utöver det skapas vid behov syntetiska punkter (klass 13) för att säkerställa en korrekt triangelbildning under till exempel broar vid en TIN-representation av markhöjdmodellen.

Tabell 3 ger en översikt över de data som utgör Sveriges nationella markhöjdmodell. I laserskannade data handlar det om mark- och vattenklassade punkter (klass 2 och 9) samt syntetiska punkter (klass 13). Bropunkter ingår alltså inte och broar skapar därmed inte barriärer vid modellering av vattenflöden.

Förutom de punktmoln som ovan nämnda punktklasser utgör ingår även höjdsatta brytlinjepolygoner som representerar sjöar och vattendrag i markhöjdmodellen. Utifrån mark- och vattenklassade punkter tar en algoritm fram en höjdmodell i rasterformat för vattenytor. Vektorisering av denna modell ger i sin tur vattenytepolygoner för sjöar och vattendrag. Under vissa omständigheter kan dock de framtagna vattenytepolygonerna breda ut sig mer än de verkliga vattenytorna. För att hantera detta används vattenytor från Topografi 10 för att begränsa vattenytepolygonerna. Då vatten inte ger upphov till laserreturer i samma grad som mark är de framtagna vattenytorna från punktmolnen inte alltid heltäckande vid jämförelse med vattenytor från Topo 10. Oavsett täckningsgrad är det ändå de klippta vattenytepolygonerna (som ytterst härstammar ifrån insamlade laserpunktmoln) som används till brytlinjepolygonerna i markhöjdmodellen eftersom dessa bygger på aktuella observerade data.

Höjdsättningen av brytlinjepolygonerna för vattenytor går till så att sjöar tilldelas en konstant höjd medan vattendrag delas in i sektioner som var och en ges en viss lutning. De höjder som tilldelas i höjdsättningsprocessen bestäms utifrån ovan framtagna höjdmodell för vattenytor och interpolering i denna. Höjdsatta brytlinjepolygoner för sjöar och vattendrag tas fram varje gång laserdata uppdateras med resultat från ny laserskanning.

Tabell 3. Översikt över de data som utgör Sveriges nationella markhöjdmodell.

Dataslag	Klass	Beskrivning	Kvalitetsaspekter
Punktmoln från flygburen laserskanning och flygbilds-matchning	2	Punkter på mark	Högre punkttäthet skulle göra att företeelser som påverkar vattenflöden (diken m.m.) representeras mer fullständigt i insamlade punktmoln. Punkttätheten för vattenklassade punkter är lägre än för de markklassade p.g.a. lägre antal returer från vattenytor vid laserskanning.
	9	Vattenklassade punkter	
	13	Syntetiska punkter för att underlätta en god triangelbildning där broar ger en skuggeffekt, d.v.s. laserpunkter saknas.	
Höjdsatta brytgeometrier i form av polygoner	-	Representerar vattenytor i form av sjöar och vattendrag.	Brytgeometrier för vattendrag varierar i fullständighet mellan olika vattendrag. Beroende på höjd för vattenklassade punkter behöver sektionsvis höjdsatta brytlinjer för vattendrag inte alltid ha en konsekvent lutning nedströms.

2.2.2 Generella kvalitetsaspekter vid hydrologisk korrigering

I detta projekt har vi, när det gäller indata, fokuserat på vägtrummor. För hydrologisk korrigering generellt anser vi dock att följande aspekter är viktiga för en hög kvalitet på resulterande hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell:

- Att korrigeringarna sker på rätt plats, d.v.s. att lokaliseringen för en viss företeelse, exempelvis en vägtrumma, stämmer väl överens med trummans faktiska läge. En god lägesmässig kvalitet är alltså viktig.
- Att en viss företeelse som skall korrigeras för hydrologiskt faktiskt finns på den plats som den är lokaliserad till. Det gäller alltså att undvika korrigeringar för företeelser som inte existerar i verkligheten.
- Att ha information som belyser hur korrigeringen skall göras. För exempelvis en trumma genom en väg- eller järnvägsbank är läge för inlopp och utlopp i plan och höjd relevant information medan sträckning och djup är relevant information för ett dike.
- Fullständighet, d.v.s. att så väl som möjligt ha information om alla företeelser som medför behov av hydrologisk korrigering.

2.3 Framställning, tillhandahållande och ajourhållning av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell och tillhörande produkter

Om framställning, tillhandahållande och ajourhållning av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell kommer ligga hos Lantmäteriet är utgångspunkten att bygga på redan existerande infrastruktur för att tillhandahålla den nationella markhöjdmodellen. I avsnitt 2.3.1 ger vi en övergripande översikt över vi tänker oss detta och i avsnitt 2.3.2 presenterar vi den prototypframställning för en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell som vi arbetat med i projektet. Därefter diskuterar vi i avsnitt 2.3.3 framställning och tillhandahållande av associerade produkter som flödesriktningar, flödesackumulation och avslutningsvis tar vi upp ajourhållning i avsnitt 2.3.4.

2.3.1. Framställning och tillhandahållande av hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell

Sveriges nationella markhöjdmodell består, såsom avsnitt 2.2.1 beskriver, av punktmoln och brytgeometrier. Utifrån dessa data tar Lantmäteriet fram två produkter som representerar markhöjdmodellen i rasterformat:

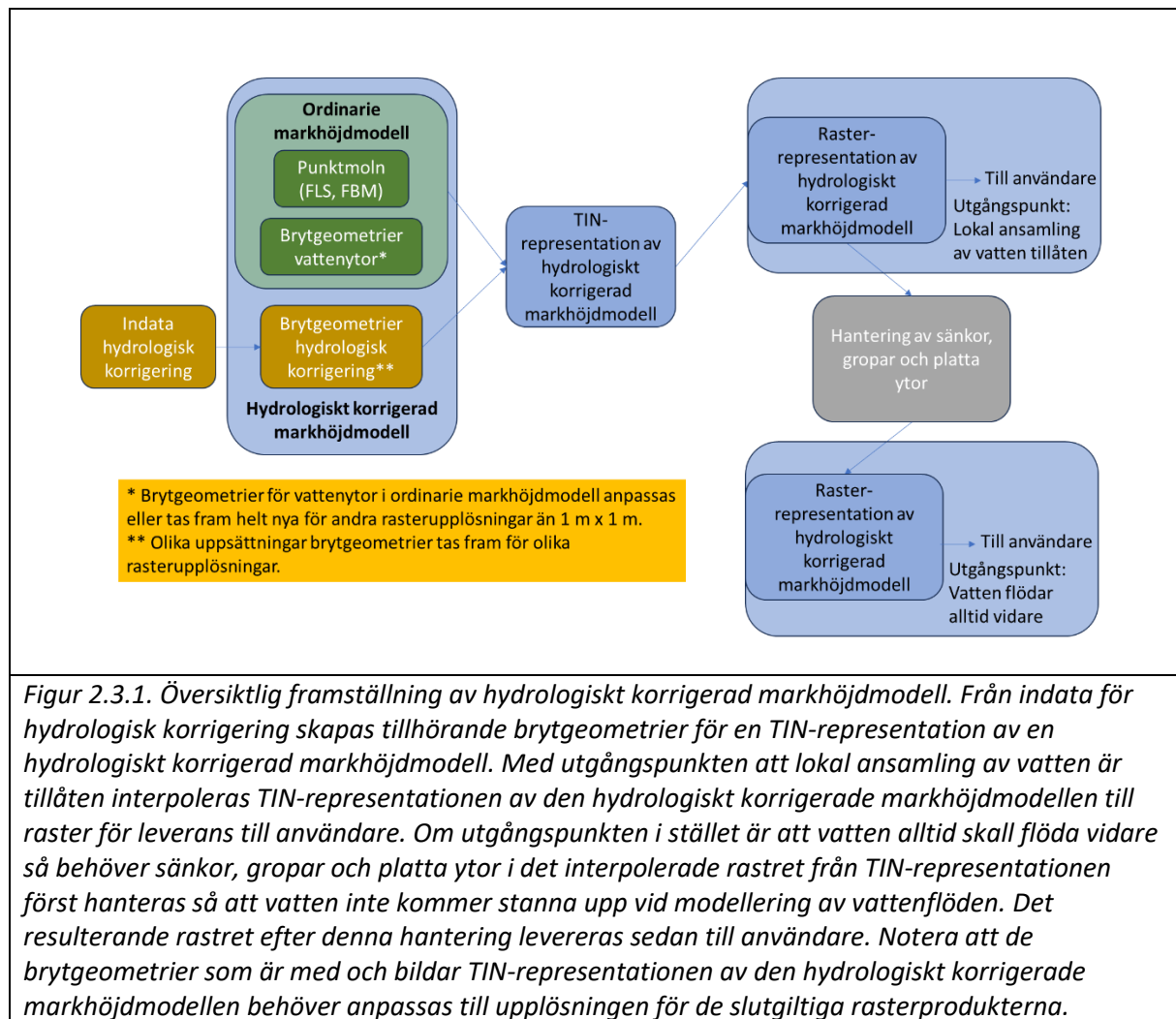
Markhöjdmodell Nedladdning, grid 1+; upplösning 1 x 1 m

Markhöjdmodell Nedladdning, grid 50+ NH; upplösning 50 x 50 m.

där den senare (grid 50+ NH) bygger på stegvis interpolering av den första (grid 1+).

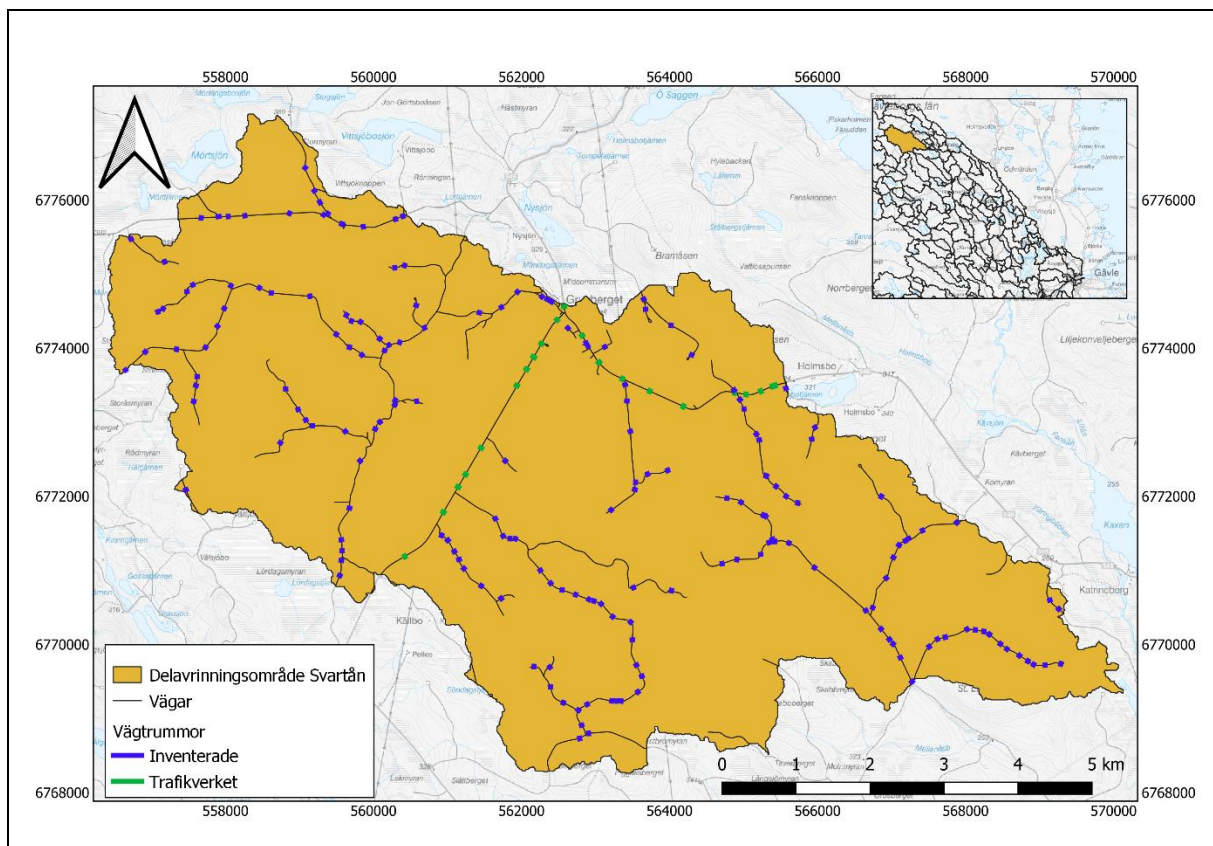
En TIN-representation av grunddata för den nationella markhöjdmodellen (punktmoln och brytgeometrier, se tabell 3 i avsnitt 2.2.1) används för att interpolera fram den raster-representation med 1 x 1 m upplösning som bildar Markhöjdmodell Nedladdning, grid 1+. Genom att komplettera denna process med brytgeometrier för hydrologisk korrigering samt avslutande hantering av sänkor, gropar och platta ytor är det möjligt att utnyttja Lantmäteriets befintliga infrastruktur för ordinarie markhöjdmodell till att framställa den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen. Figur 2.3.1 (nästa sida) illustrerar hur framställningen av den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen då skulle gå till.

I avsnitt 2.1 har vi diskuterat de olika utgångspunkterna om vidareflöde eller att vatten tillåts stanna upp. Ett tillhandahållande av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell som tillfredsställer båda dessa utgångspunkter behöver därför, såsom figur 2.3.1 visar, bestå av två rasterprodukter, en där gropar, sänkor och platta ytor har hanterats och en där de inte har det. På samma sätt som för Markhöjdmodell Nedladdning, grid 1+, planeras tillhandahållandet därefter ske i form av indexrutor (2,5 km x 2,5 km) enligt Lantmäteriets indelning av Sverige eller i önskade utsnitt.



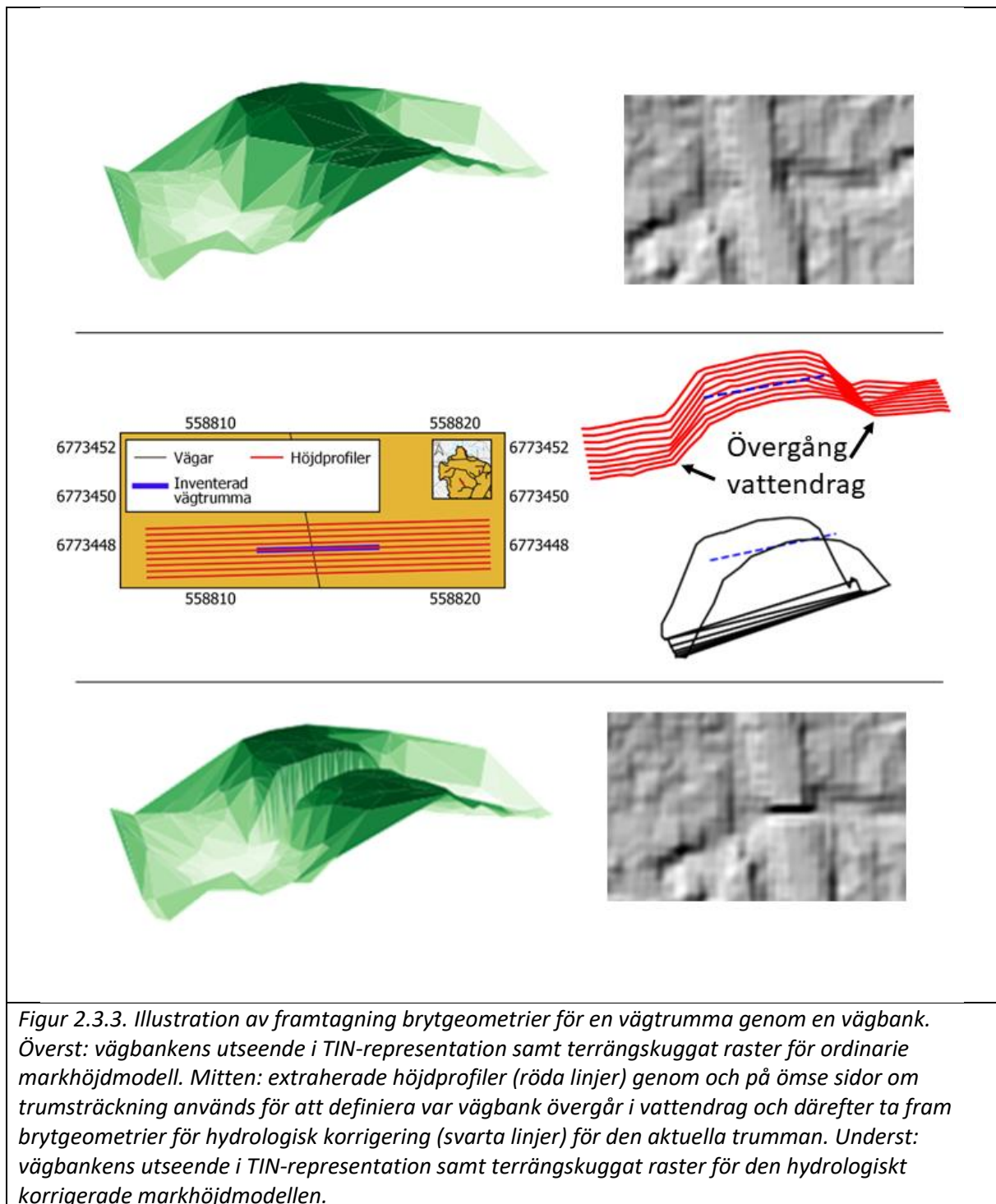
2.3.2 Prototypframställning av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell

I projektet har vi arbetat med prototypfunktionalitet enligt konceptet i figur 2.3.1 för att ta fram en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell med en upplösning på 1 m x 1 m. Som testfall för utvecklingen och senare utvärdering av indata och metod för hydrologisk korrigering har vi utgått ifrån delavrinningsområdet Svartån i Gävleborg. I utvecklings- och utvärderingsskedet ville vi arbeta med ett mindre avrinningsområde för att minimera tungrodd databearbetning och vi började helt enkelt arbetet med Svartån. Att vi har valt ett delavrinningsområde i just Gävleborg hänger ihop med att vi, genom en omfattande inventering och inmätning utförd av Skogsstyrelsen (Lidberg, 2025), har tillgång till data och lokalisering för ca 27 000 vägtrummor i Gävleborgs län. Tillsammans med data från Trafikverket har vi därför tillgång till referensdata om vägtrummor för både hydrologisk korrigering och för utvärdering i vårt utvalda delavrinningsområde. Figur 2.3.2 ger en översikt över lokaliseringen för de totalt 207 vägtrummor vi har referensdata om i Svartåns delavrinningsområde.



Figur 2.3.2. Översikt över kända vägtrummars lokalisering i delavrinningsområde Svartån. Av totalt 207 trummor är 186 st inventerade av Skogsstyrelsen medan 21 st är hämtade ifrån Trafikverkets data om statliga vägtrummor. Rutan uppe till höger visar var delavrinningsområde Svartån är beläget.

Att utifrån indata för hydrologisk korrigering ta fram tillhörande brytgeometrier för en TIN-representation av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell är ett väsentligt steg i det koncept vi arbetat med (figur 2.3.1). Den översta delen av figur 2.3.3 illustrerar, vid en vägtrumma, hur ordinarie markhöjdmodell ser ut i TIN-representation samt terrängskuggning.



I den mellersta delen av figur 2.3.3 ser vi trumsträckning samt höjdprofiler över vägbanken på ömse sidor om trummans sträckning. För att definiera höjdprofilernas planläge utgår vi från trumsträckningen men förlänger denna samt förskjuter profilerna i steg om 0.25 m på ömse sidor om trummans sträckning upp till ett avstånd på 1 m. Avståndet +/- 1m kommer ge 2 m bredd för den hydrologiska korrigeringen för vägtrumman. Med önskad upplösning på 1 m x 1 m säkerställer bredden på 2 m att den hydrologiska korrigeringen fångas upp när rasterrepresentationen av den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen tas fram genom interpolering i TIN-strukturen.

Vi använder sedan ordinarie markhöjdmodell för att höjdsätta profilerna (överst t.h. i den mittersta delen av figur 2.3.3) och därefter bestämma var vägbanken övergår i vattendrag. För detta identifierar vi brytpunkter i profilerna på ömse sidor om vägbanken. De identifierade brytpunkterna och deras höjder använder vi därefter med de yttersta profilerna på ömse sidor om trumsträckningen (± 1 m) för att definiera brytgeometrier för den hydrologiska korrigeringen genom att tillämpa en standardmodell för hur dessa skall se ut. Resultatet för den aktuella trumman visar vi nederst t.h. i den mittersta delen av figur 2.3.3. För en enhetlig flödesriktning genom den hydrologiska korrigeringen för trumman säkerställer vi att profilvisa höjdskillnader mellan identifierade brytpunkter på ömse sidor om vägbanken får konsekvent tecken (stigning/höjdminskning) enligt det som majoriteten av profilerna utvisar.

Framtagna brytgeometrier använder vi sedan som indata när vi tar fram den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen. Den understa delen av figur 2.3.3 illustrerar, för både TIN-representation och för terrängskuggat raster, den kanal genom vägbanken som den hydrologiska korrigeringen för den aktuella vägtrumman bildar.

I vår prototyp för framställning av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell har vi separerat framtagningen av brytgeometrier från höjdmodellsframställningen. Det är därför enkelt att komplettera med brytgeometrimodeller för nya företeelser för hydrologisk korrigering eller att revidera och utöka befintliga. För vägtrummor skulle det exempelvis vara möjligt att simulera högre kapacitet genom att förskjuta profilerna vid framtagningen av brytgeometrier mer än ± 1 m från trumman.

2.3.3 Framställning och tillhandahållande av flödesriktningar, flödesackumulation och flödeslinjer för hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell

Flödesriktningar, flödesackumulation och flödeslinjer utgör produkter som tas fram för respektive rasterrepresentation (de olika utgångspunkterna) av den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen, där samtliga planeras att tillhandahållas i antingen indexrutor (2,5 km x 2,5 km) eller önskade utsnitt.

Medan flödesriktningar och flödesackumulation är produkter i rasterformat så är flödeslinjer en produkt i vektorformat. Flödesriktningar planeras tas fram med hjälp av D8-metoden där vatten från varje rastercell enbart kan flöda till en av de åtta omgivande cellerna. Flödesriktningen i en cell anger då riktningen till den av de omgivande cellerna vars höjd är lägst samt är lägre än höjden för den aktuella cellen. Finns det ingen omgivande cell som har lägre höjd så är flödesriktningen odefinierad och cellen kan då vara en enkelcellsgrop, en del av en sänka eller ingå i en platt yta. Om utgångspunkten är att vatten alltid skall flöda vidare behöver sådana celler hanteras (se avsnitt 2.4).

Flödesackumulation bygger på framtagna flödesriktningar så att varje cell tilldelas det antal celler som, enligt flödesriktningarna, ger ett flöde som leder till den aktuella cellen. Av detta följer att antalet uppströmsceller (flödesackumulationen) beror på var vattendelarna i den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen befinner sig. För att exempelvis bestämma flödesackumulationen för en given indexruta eller ett givet område behöver alltså området där flödesackumulationen bestäms utökas så att samtliga celler som bidrar med flödesackumulation till indexrutan/det givna området inkluderas. Att tillhandahålla flödesackumulation som en produkt innebär alltså att det är nödvändigt att ta fram funktionalitet för nödvändig utökning av områden så att produkten verkligen återspeglar totalt ackumulerat flöde i varje cell. I gränstrakterna Sverige/Norge och Sverige/Finland kommer det också vara nödvändigt att inkorporera höjddata från Norge respektive Finland för att detta skall vara möjligt.

Genom att multiplicera flödesackumulation i form av cellantal med cellarea fås arean av bidragande uppströmsceller, och den arean omvandlas vanligtvis till hektar (ha). Produkten flödeslinjer tas sedan fram genom att tillämpa ett tröskelvärde för flödesackumulationen så att samtliga sammanhängande celler (enligt flödesriktningarna) med en flödesackumulation större än tröskelvärdet bildar ett flödesnät i vektorformat. Om samma tröskelvärde skall användas för hela Sverige eller om tröskelvärdet skall kunna variera får utredas inför en eventuell realisering av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell.

2.3.4 Ajourhållning av hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell och produkterna flödesriktningar, flödesackumulation samt flödeslinjer

En hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell kommer, vid ett tillhandahållande av Lantmäteriet, bestå av data för ordinarie markhöjdmodell (punktmoln och brytgeometrier för vattendrag) samt brytgeometrier för hydrologisk korrigering (se figur 2.2). Liksom för ordinarie markhöjdmodell blir ajourhållning och uppdatering av den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen aktuell när nya laserdata samlats in och bearbetats i projektet Skoglig laserskanning. Utöver detta finns även ett behov av ajourhållning av den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen vid förändringar i indata för hydrologisk korrigering. Det kan till exempel handla om nya vägtrummor som tillkommit eller förbättringar i lägesbestämningen av befintliga vägtrummor vilket får till följd att brytgeometrier för hydrologisk korrigering behöver kompletteras eller korrigeras.

Ordinarie markhöjdmodell uppdateras direkt när det finns nya laserdata att tillgå. Direkt uppdatering vid nya laserdata och/eller förändringar i indata för hydrologisk korrigering är även möjlig för den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen samt produkten flödesriktning då enbart de indexrutor som berörs av förändringarna behöver uppdateras. För produkterna flödesackumulation och flödeslinjer är dock ajourhållning och uppdatering inte lika rakt på sak. Även om förändringar i den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen håller sig inom en indexruta så kommer effekterna av dessa förändringar på flödesackumulation och flödeslinjer sannolikt inte begränsa sig till samma indexruta. Då det inte heller är givet hur stort omgivande område som påverkas vid förändringar behöver detta bestämmas för en korrekt ajourhållning av flödesackumulation och flödesriktningar.

Att revidera produkterna flödesackumulation och flödeslinjer kan vara en tidskrävande process och det är möjligtvis orimligt att uppdatera dessa produkter varje gång en förändring sker i indata, laserdata eller data för hydrologisk korrigering. Om ett tillhandahållande av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell kommer bli verklighet är detta något som behöver redas ut.

Om direkta uppdateringar av samtliga produkter i den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellspaketet är möjliga varje gång det sker en förändring så kan produkterna alltid vara i fas och korrelera med varandra. Om så dock inte skulle vara fallet uppstår frågan om den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen samt flödesriktningar skall uppdateras direkt vid förändringar medan uppdatering av flödesackumulation och flödeslinjer samlas ihop till att ske en gång per år. Innebörden av en sådan ajourhållningsmodell är en ökande divergens mellan flödesriktningar och hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell å ena sidan och flödesackumulation och flödeslinjer å andra sidan fram till tillfället för den årliga uppdateringen av flödesackumulation och flödeslinjer. Om en sådan divergens inte är önskvärd och direkt uppdatering av samtliga produkter inte är möjlig så kommer det bli nödvändigt med enbart årsvisa uppdateringar som rimligtvis då äger rum efter avslutad bearbetning av laserdata från årets insamlingssäsong.

2.4. Hantering av sjöar, sänkor och gropar i relation till olika utgångspunkter för modellering och analys

I naturlig terräng kommer det finnas lågpunkter, sänkor och gropar i olika skalor där vatten ansamlas och inte rinner vidare som ett ytvattenflöde. En digital terrängmodell kommer återspegla dessa företeelser men kan även innehålla artefakter i form av lågpunkter och gropar på grund av att markytan inte representeras kontinuerligt utan bara i form av stickprov med en viss punkttäthet. Utöver det har vi även sjöar som i Sveriges nationella markhöjdmodell representeras som platta ytor, d.v.s. ytor med konstant höjd.

Vid framtagning och analys av avrinningsområden och vattenförekomster på nationell nivå är en viktig utgångspunkt, såsom vi tar upp i avsnitt 2.1, att ytvatten inte tillåts stanna upp någonstans utan i slutändan rinner ut i havet. Ett vanligt angreppssätt vid modellering med digitala höjdmodeller i rasterformat är att hantera detta genom att eliminera områden utan vidareflöde genom att modifiera tillhörande rastercellers höjd på så sätt att vidareflöde sker. Sådan eliminering i en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell enligt konceptet i figur 2.3.1 kan alltså bara ske efter framställd rasterrepresentation utifrån modellens TIN-representation.

Fyllning och genombrytning är två huvudsakliga angreppssätt för att eliminera områden utan vidareflöde i en höjdmodell i raster-format. I denna rapport kommer vi diskutera bägge angreppssätten men ägna mer utrymme åt genombrytning eftersom det är det angreppssätt som använts vid framtagningen av det exempeldata som tillhandahållits via Skogsstyrelsen i detta projekt.

Detta avsnitt är inte avsett att vara fulltäckande när det gäller olika algoritmer och tillvägagångssätt för hantering av sänkor, gropar och platta ytor då en sådan genomlysning inte ingår i ramen för projektet. I sammanhanget vill vi dock nämna ett angreppssätt som hanterar vidareflöden från områden eller celler där ansamling sker genom att modifiera flödesriktningar i stället för höjder för berörda rasterceller. Detta angreppssätt skiljer sig alltså från fyllning och genombrytning genom att vara oförstörande i den bemärkelse att underliggande höjdmodell inte förändras.

2.4.1. Fyllning

Fyllning innebär att identifiera utloppspunkten/utloppspunkterna med lägst höjd som omger gropan/sänkan/den platta ytan. Dessa punkter utgörs av celler i rastret där minst en av de omgivande cellerna har en lägre höjd. Vatten kan då alltså flöda från identifierad cell till omgivande cell med lägre höjd. De celler som uppfyller detta villkor och har lägst höjd är de celler som kommer nås först vid en höjning av vattennivån i sänkan och därmed de celler som kommer leda vatten vidare. Alla celler i sänkan/gropan/den platta ytan som har lägre höjd än utloppscellen/cellerna kan sedan ges samma höjd som utloppscellerna. Detta bildar då en platt yta som i sin tur kan delas upp och tilldelas gradienter så att de olika delarna lutar mot respektive utloppspunkt. På så sätt säkerställs att vatten kan flöda ifrån sänkan. Det är även möjligt att tilldela gradienterna till de platta ytorna som bildas på ett sådant sätt att det flödesmönster som bildas återspeglar topografin före fyllningen.

2.4.2. Genombrytning

Till skillnad från att fylla upp gropar, sänkor och platta områden till dess att möjliga utlopp hittas bygger genombrytning på att bryta upp kanaler från/genom dessa så att vatten kan flöda till lägre belägna punkter utanför dessa. I vår utvärdering av metod och indata för hydrologisk korrigering har vi, på samma sätt som för de exempeldata i projektet som Skogsstyrelsen tillhandahåller, tillämpat genombrytning såsom implementerad i verktyget BreachDepressions i programpaketet

WhiteboxTools¹. I detta avsnitt beskriver vi genombrytningsalgoritmen i verktyget och i avsnitt 2.6 går vi in på hur genombrytning påverkar flödeslinjer och flödesackumulation med respektive utan hydrologisk korrigerig i den utvärdering som vi har gjort.

Det första som sker i verktyget BreachDepressions är att det identifierar enskilda celler som utgör gropar eller sänkor samt celler som ingår i platta områden. För att minimera djupet på genombrytningskanalerna sätts sedan nivån på de identifierade cellerna så att höjden nästan uppgår till höjden för den omgivande cell vars höjd är lägst. För sjöarna i den nationella markhöjdmodellen (platta ytor) blir följden av detta att gropar introduceras i sjöarna vilka dock kommer hanteras i den fortsatta processen. Steget att identifiera enskilda celler som utgör gropar, celler eller platta ytor är ett valfritt steg i verktyget men har använts i framtagningen av de exempeldata som tillhandahålls via Skogsstyrelsen. Vi har därmed även använt detta steg i vår utvärdering. Eftersom sjöar representeras som platta ytor i den nationella markhöjdmodellen kan det vara så att detta steg är nödvändigt. Vi har dock inte utvärderat om verktyget skulle kunna användas utan den modifiering av de platta ytorna (sjöarna) som detta valfria steg innebär.

Genombrytningsprocessen går därefter i princip till så att den digitala markhöjdmodellen successivt översvämmas från kanterna enligt principen att det alltid är de celler med lägst höjd av de hittills ej översvämmade cellerna som översvämmas först. När översvämningen når fram till en cell i en grop, sänka eller platt yta bildas en genombrytningskanal från den aktuella cellen genom att stega tillbaka i översvämningsvägen fram till denna. Höjden på cellerna i genombrytningskanalen utgår från höjden för cellen i den grop, sänka eller platt yta som översvämningen nått fram till och sänks med ett fast värde (sätts av användaren eller beräknas av algoritmen) för varje steg tillbaka längs översvämningsvägen. Genombrytningen upphör i den första cell i tillbakastegningen där ursprunglig höjd är lägre än höjden som bildas i genombrytningskanalen genom den stegvisa sänkningen av ursprungshöjden i den cell i gropen, sänkan eller platta ytan där genombrytningen startade.

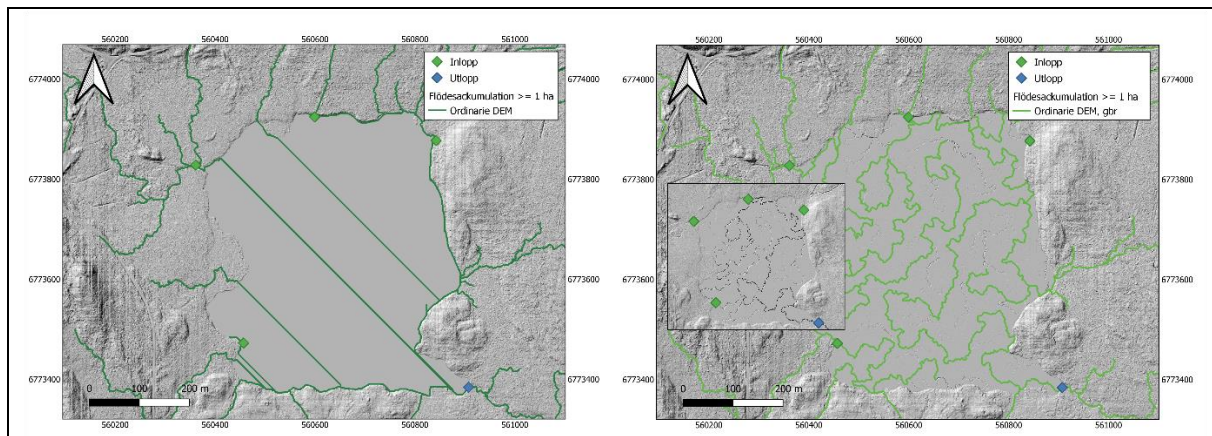
I vår utvärdering av hur genombrytning påverkar flödeslinjer och flödesackumulation har vi använt oss av verktyget r.watershed i progampaketet GRASS GIS². Då detta verktyg kan hantera höjdmodeller både med och utan gropar, sänkor och platta områden är det fördelaktigt för vår utvärdering eftersom vi med det kan ta fram flödeslinjer och flödesackumulation på ett enhetligt sätt. Verktyget arbetar på ett oförstörande sätt genom att fram flödesriktningar utifrån vald flödesstyrningsmetod (D8 eller fördelning av flöde till samtliga omgivande celler) och att tillämpa en minstakostnadsalgoritm som letar sig fram genom höjdmodellen på ett sätt som liknar hur verktyget BreachDepressions översvämmar höjdmodellen från kanterna. När sedan verktygets minstakostnadsalgoritm når gropar, sänkor eller platta ytor så tar den sig ut ur dessa genom att följa den brantaste vägen och fortsätter därefter att leta sig fram genom höjdmodellen (Metz, Mitsova & Harmon, 2011).

Figur 2.4.1 visar skillnader i sträckning över en sjö (platt yta) för de flödeslinjer som verktyget r.watershed ger då den platta ytan är ohanterad (till vänster) och då den platta ytan är hanterad med genombrytning (till höger). För höjdmodellen med ej hanterad platt yta ger r.watershed flödeslinjer som antingen följer den platta ytans kant (d.v.s. strandkanten i detta fall) eller tar kortaste vägen över den platta ytan (d.v.s. sjön). När höjdmodellen hanterats med genombrytning enligt verktyget BreachDepressions i Whitebox Tools finns inga gropar, sänkor eller platta ytor kvar i modellen och

¹https://www.whiteboxgeo.com/manual/wbt_book/available_tools/hydrological_analysis.html#BreachDepressions

² <https://grass.osgeo.org/grass84/manuals/r.watershed.html>

flödeslinjerna från r.watersheds följer då de bildade genombrytningskanalerna över sjön, vilka också illustreras i figur 2.4.1.



Figur 2.4.1. Skillnader i flödeslinjer med flödesackumulation ≥ 1 ha från verktyget r.watershed mellan ordinarie markhöjdmodell utan genombrytning (till vänster) och ordinarie markhöjdmodell med genombrytning (till höger). Inlopp (gröna rutersymboler) och utlopp (blå rutersymbol) från Topografi 10 är utmärkta men har inte använts i bestämningen av flödeslinjerna. Den mindre rutan i bilden till höger illustrerar de genombrytningskanaler som verktyget BreachDepressions i Whitebox Tools bildar i höjdmodellen.

Eftersom olika algoritmer och metoder för hantering av gropar, sänkor och platta ytor påverkar flöden i en höjdmodell är det viktigt med insikter i de faktorer hos en använd algoritm som påverkar algoritmens resultat. För genombrytning, såsom implementerad i verktyget BreachDepressions, vill vi dock lyfta några punkter som kan vara relevanta att beakta och undersöka vidare för en potentiell användare:

- Översvämning från kanterna innebär att kanternas höjd i relation till varandra samt vilket utsnitt ur markhöjdmodellen som används påverkar hur översvämningsvägarna blir och därmed även genombrytningskanalerna.
- Den stegvisa sänkningen med ett fast värde vid genombrytningen skulle kunna leda till onödigt långa genombrytningsvägar. Genombrytningen kan upphöra vid den första cellen i översvämningsvägen till en grop/sänka/platt yta som har en lägre höjd än utgångscellen för genombrytningen i den ordinarie markhöjdmodellen. När denna cell hittats kan den nödvändiga stegvisa höjdsänkningen i genombrytningskanalen bestämmas för att genombrytningen skall nå fram till höjden för denna cell. Att anpassa den stegvisa höjdsänkningen för varje genombrytningskanal bör kunna ge kortare genombrytningsvägar.
- Genombrytningar i sjöar slingrar sig fram och tillbaka och blir väldigt långa såsom figur 2.4.1. illustrerar. För analyser av flödesackumulation kan alltså det slingrande flödet genom en sjö efter genombrytning, i synnerhet för en väldigt stor sjö, resultera i att sjön bidrar med en kanske icke försumbar andel flödesackumulation i relation till de vattendrag som matar sjön.

2.5 Utvärdering av indata och metod för hydrologisk korrigering med fokus på vägtrummor och flödesstyrning vid gropar och sänkor

För en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell av hög kvalitet är det av stor vikt med fullständighet i de hydrologiska korrigeringarna samt att lägesnoggrannheten är bättre än upplösningen för rasterrepresentationen av modellen. I detta avsnitt vill vi, utan att göra anspråk på en uttömmande undersökning, utvärdera hur indata om vägtrummor och flödesstyrning för att hantera gropar, sänkor och platta ytor får effekter när det gäller flödesmönster och flödesackumulation som tas fram med en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell. Genom denna utvärdering vill huvudsakligen belysa fullständighet som kvalitetsaspekt och vikten av god metodkännedom. Till viss del kommer vi dock även beröra lägesnoggrannhet.

Som utgångspunkt för analysen har vi använt samma delavrinningsområde, Svartån i Gävleborgs län, som vi har använt för vår prototypframställning av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell avseende vägtrummor (se avsnitt 2.3.2). För detta område har vi kännedom om totalt 207 vägtrummor varav 21 st (10 %) är trummor i det statliga vägnätet och 186 st (90 %) är inventerade (se figur 2.3.2). Tittar vi på hela Gävleborg har vi kännedom om ca 36200 vägtrummor varav ca 9600 st (27 %) är statliga och 26600 st (73 %) är inventerade. Skillnaden i antal trummor (statliga/inventerade) indikerar att fullständighet när det gäller data om vägtrummor är en utmaning för en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell som skall vara rikstäckande. Även om det kan vara möjligt att samla ihop data om vägtrummor från olika källor är det sannolikt långt ifrån alla trummor som det finns information om. En hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell kommer därför lida av att hydrologiska korrigeringar för samtliga existerande trummor inte kan inkorporeras i modellen, och att fullständigheten sannolikt varierar mellan olika delar av landet.

Ett möjligt sätt att hantera ofullständiga indata när det gäller vägtrummor är att tillämpa en genombrytningsalgoritm på en markhöjdmodell. Tanken är då att algoritmen identifierar sänkor som bildas bakom vägbankar och bryter igenom vägbankarna för att vatten skall kunna flöda vidare från sänkan. Om vägtrummor är placerade i lågpunkter i de sänkor som vägbankar bildar skulle en genombrytningsprocess då kunna bryta igenom en vägbank på samma plats som en vägtrumma.

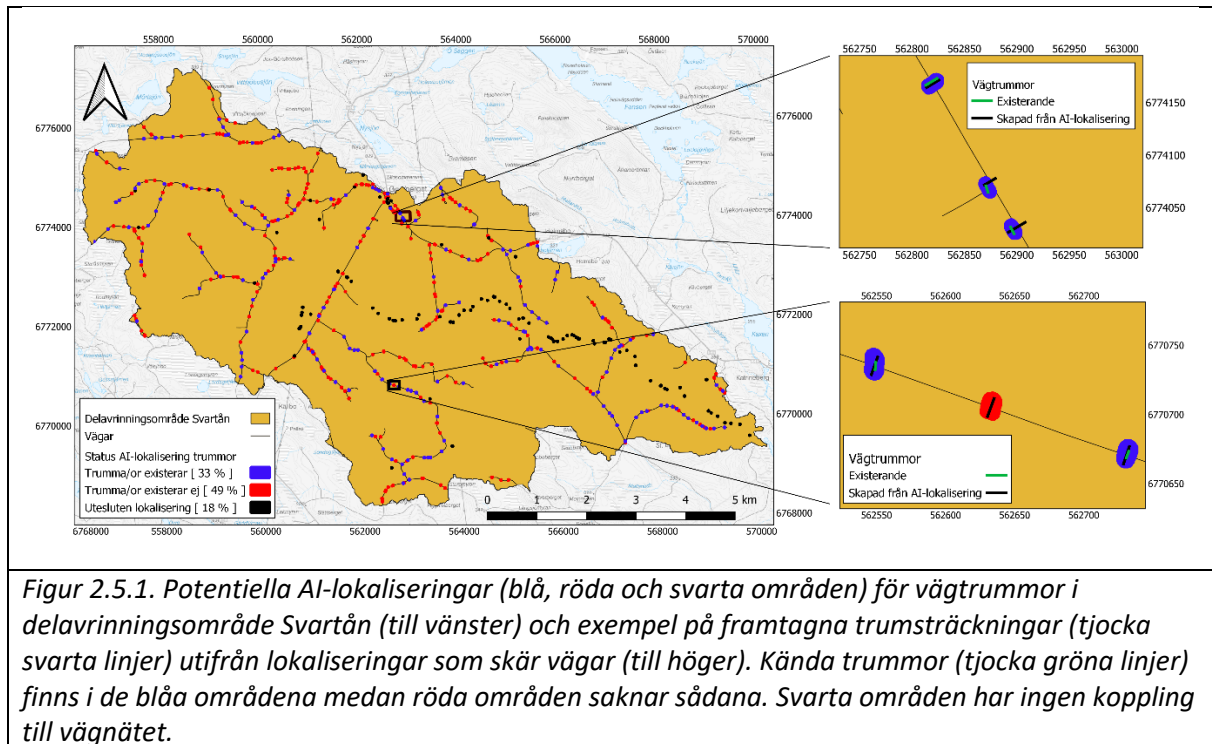
Lokalisering av vägtrummor med hjälp av AI-metoder kan också bidra till att komplettera data när det gäller vägtrummor. I ett arbete utfört av William Lidberg vid Sveriges Lantbruksuniversitet har ortofoton från flygbilder, en digital höjdmodell framställd från nationellt insamlade laserpunktmoln samt inventerade vägtrummor använts för att ta fram en AI-modell som indikerar områden där det med hög sannolikhet finns vägtrummor (Lidberg, 2025).

Genom underlaget med statliga och inventerade och vägtrummor i Gävleborg kan vi, för det delavrinningsområde (Svartån) som vi studerar, få en bild av hur väl flödesmönster och flödesackumulation ifrån hydrologiskt korrigerade markhöjdmodeller med olika underlag samt med respektive utan avslutande genombrytning överensstämmer med de flödesmönster som kända existerande trummor ger. Avsnitt 2.5.1 beskriver de olika markhöjdmodeller som utgör underlag för vår utvärdering medan analyserna i avsnitt 2.5.2 behandlar översiktliga flödesmönster och avsnitt 2.5.3 flödesackumulation.

2.5.1. Utvärderingsunderlag markhöjdmodeller

För att genomföra vår utvärdering har vi utgått från ordinarie markhöjdmodell för delavrinningsområde Svartån samt motsvarande markhöjdmodeller för tre olika underlag av vägtrummor för hydrologisk korrigering. Det första underlaget vägtrummor består av en sammanställning av statliga vägtrummor (Trafikverket) och inventerade vägtrummor i Gävleborg (se figur 2.3.2).

Det andra och tredje underlaget vägtrummor bygger på AI-identifierade områden för potentiella trummor (Lidberg, 2025). I figur 2.5.1 ser vi att ca 18 % av de AI-identifierade områdena i delavrinningsområde Svartån inte har koppling till vägnätet (de kan därför uteslutas), att ca 33% har koppling till vägnätet och kända trummor samt att ca 49% har koppling till vägnätet men inte till kända trummor.



Figur 2.5.1. Potentiella AI-lokaliseringar (blå, röda och svarta områden) för vägtrummor i delavrinningsområde Svartån (till vänster) och exempel på framtagna trumsträckningar (tjocka svarta linjer) utifrån lokaliseringar som skär vägar (till höger). Kända trummor (tjocka gröna linjer) finns i de blåa områdena medan röda områden saknar sådana. Svarta områden har ingen koppling till vägnätet.

Genom att bara räkna AI-identifierade områden som har koppling till vägnätet och anta att varje sådant område skall innehålla en trumma kan vi uppskatta sant och falskt positiva identifieringar utifrån kända trummor. För avrinningsområde Svartån får vi då att andelen sant positiva identifieringar är 83 % (174 av 207 trummor överensstämmer med AI-identifierade områden) medan andelen falskt positiva identifieringar är 61 % (267 av 441 identifierade områden med koppling till vägnätet saknar kända trummor).

Då de AI-identifierade områdena inte indikerar potentiella trummors läge och sträckning använder vi en enkel metod för att ta fram möjliga start och slutpunkter för trummor i områdena. Till varje identifierat område bildar vi en rektangulär begränsningsram som vi sedan använder för att klippa ut ett väglinjesegment av den väglinje som skär området. Väglinjesegmentet (som alltså begränsas i sin utsträckning av det identifierade områdets begränsningsram) roterar vi därefter så att det orienteras vinkelrätt mot väglinjen genom området. Detta roterade segment låter vi representera en AI-identifierade trumma för det aktuella området.

I figur 2.5.1 (till höger) ser vi några exempel på AI-identifierade trummor med ovanstående metod. Metoden är enkel och ger, för det data vi har arbetat med, trumsträckningar som till läge och orientering överlag stämmer ganska bra överens med kända trummor. Det kan dock förekomma, exempelvis i vägkorsningar som figur 2.5.1 också visar, att läge och orientering inte stämmer överens. Vi har dock inte gått in och korrigerat dessa trummor eftersom vi vill hålla metoden enkel. I en skarp implementering som bygger på AI-identifierade områden är det dock sannolikt bäst att söka igenom befintlig markhöjdmodell för dessa områden för att hitta typiska kännetecken i terrängen för

trummers inlopp och utlopp och på så sätt identifiera start och slutpunkter. En sådan genomsökning är dock utanför ramen för detta projekt och vi håller oss till den enkla metoden.

Efter att ha tagit fram de AI-identifierade trummorna enligt ovan låter vi samtliga (441 st) av dessa utgöra ett av underlagen till hydrologisk korrigering. Detta är tänkt att belysa vad effekten kan bli om det inte är möjligt att begränsa mängden falskt positiva identifieringar. Ytterligare ett underlag bildar vi sedan genom att enbart ta med trummor i områden med sant positiva identifieringar (174 st). Om det är möjligt att eliminera samtliga av de falskt positiva identifieringarna så kan detta underlag då belysa effekten av ofullständig identifiering av existerande trummor.

Vi har alltså ordinarie markhöjdmodell samt tre underlag till hydrologisk korrigering för delavrinningsområde Svartån. Underlagen för hydrologisk korrigering använder vi för att ta fram brytgeometrier för de ingående trummorna. Därefter framställer vi markhöjdmodeller för respektive brytgeometriunderlag både med och utan avslutande genombrytning med verktyget BreachDepressions (se avsnitt 2.4). Vi framställer också ordinarie markhöjdmodell (d.v.s. ingen hydrologisk korrigering) med och utan genombrytning. Totalt har vi alltså åtta olika markhöjdmodeller att använda för vidare analys enligt tabell 4. Av dessa utgör markhöjdmodellen benämnd HK-INV/TRV referens då den enbart innehåller korrigeringar för kända vägtrummor och inte heller är påverkad av genombrytning.

Tabell 4. Framställda markhöjdmodeller för delavrinningsområde Svartån.

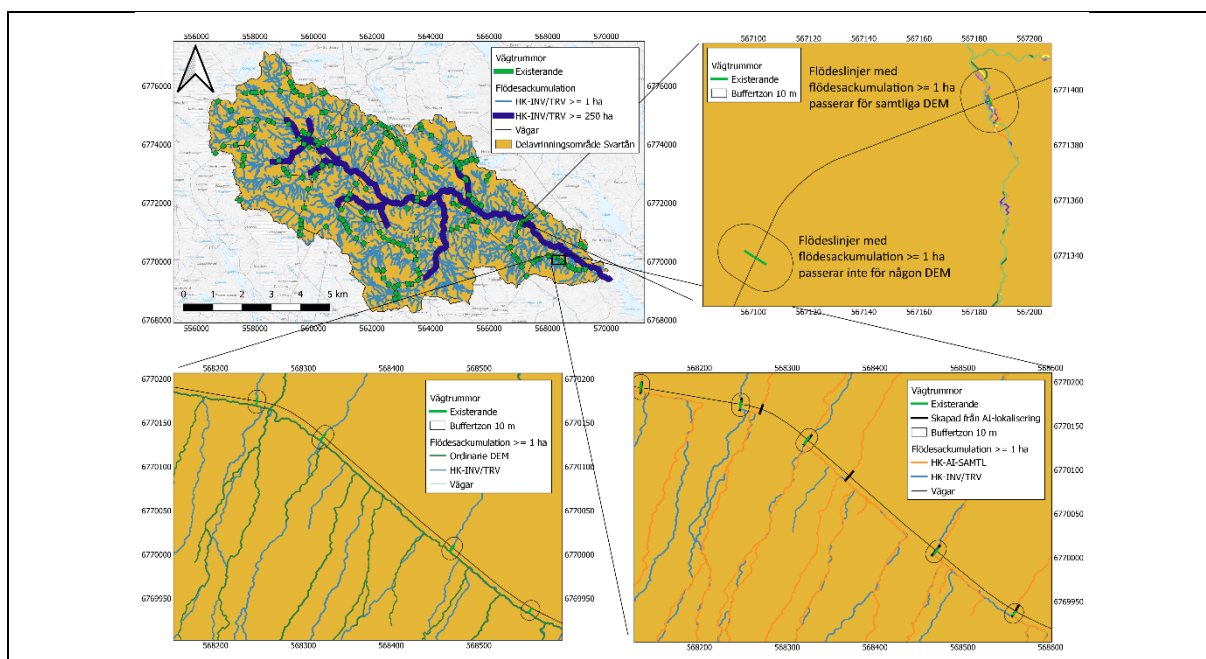
Hydrologisk korrigering	Antal trummor för hydrologisk korrigering	Benämning markhöjdmodell i kortform	
		Utan genombrytning	Med genombrytning
Ordinarie markhöjdmodell	Inga	Ord.	Ord., genombr.
Statliga (TRV) och inventerade (INV) vägtrummor	207 st	HK-INV/TRV (referensmodell)	HK-INV/TRV m. genombr.
AI-identifierade trummor, samtliga	441 st	HK-AI-SAMTL	HK-AI-SAMTL m. genombr.
AI-identifierade trummor, sant positiva	174 st	HK-AI-SP	HK-AI-SP m. genombr.

2.5.2. Analys av översiktliga flödesmönster i anslutning till vägar

För denna analys använder vi GRASS-GIS och verktyget r.watershed med D8-algoritmen för flödesstyrning för att ta fram flödesackumulation (raster) och flödeslinjer (vektor) för varje markhöjdmodell. Målet är att utvärdera hur översiktliga flödesmönster i relation till vägar stämmer överens mellan referensmodellen HK-INV/TRV och de övriga modellerna i tabell 4. En del av utvärderingen bygger på metodik i Lidberg et al. (2017) men modifierad så att vi, för varje markhöjdmodell i tabell 4, bestämmer antalet kända vägtrummor (INV + TRV) som är associerade med flödeslinjer med 1 ha flödesackumulation eller mer genom att flödeslinje och väg korsar varandra inom en 10 m buffertzoon kring varje känd vägtrumma. Utöver detta bestämmer vi även antalet korsningar mellan flödeslinjer (≥ 1 ha) och vägar som sker utanför de 10 m buffertzoner kring de kända vägtrumorna.

Som indata för denna analys har vi flödeslinjenät och flödesackumulation från verktyget r.watershed, där vi satt lägsta flödesackumulation för att bilda flödeslinjer till 1 ha. Vi tilldelar sedan inlopps- och utloppsnod för varje flödeslinjesegment den flödesackumulation dessa punkter har i respektive flödesackumulationsraster. I detta omvandlar vi negativ flödesackumulation från r.watershed (indikerar att områden utanför markhöjdmodellens gränser sannolikt bidrar till flödesackumulationen i en punkt) till positiv.

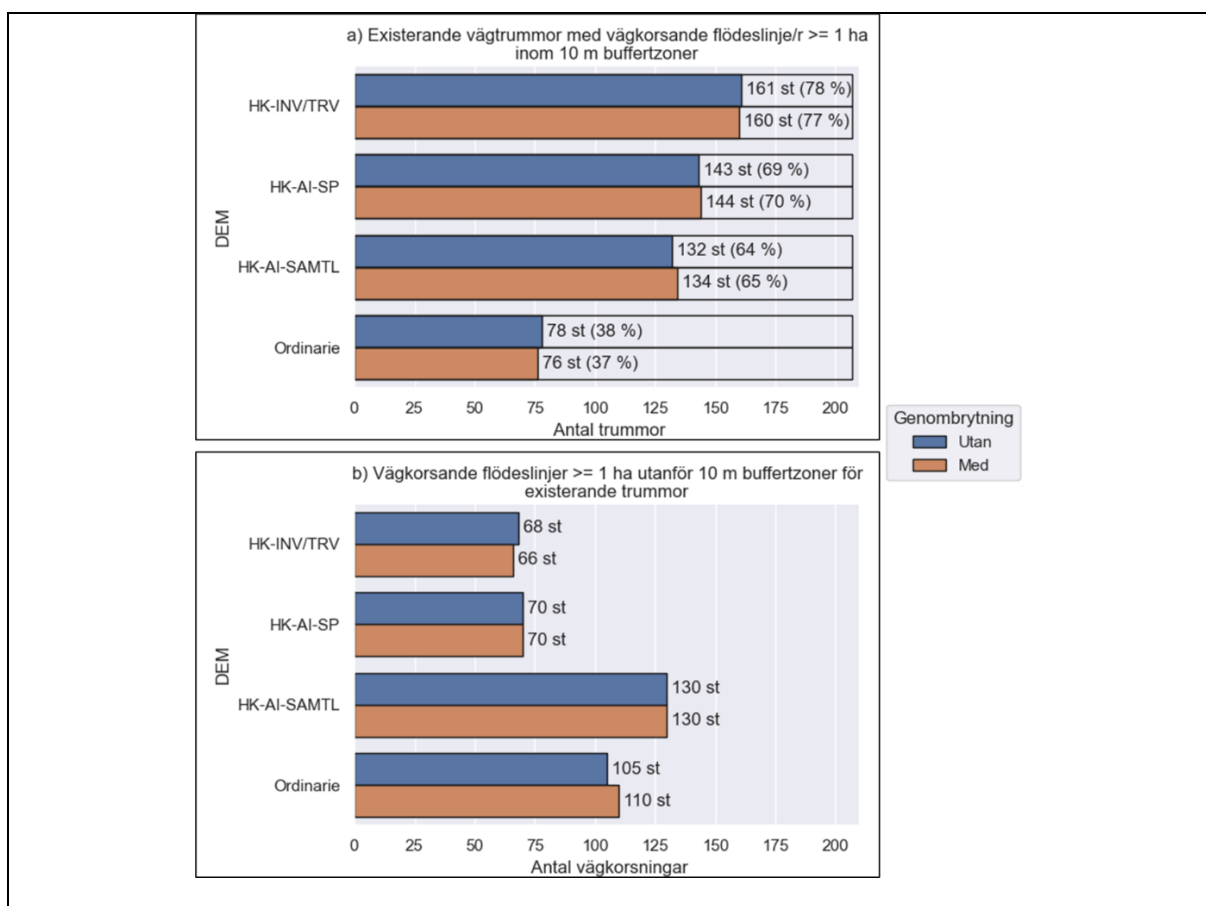
För nästa steg i analysen skapar vi en 10 m buffertzon kring varje existerande trumma i avrinningsområde Svartån och bestämmer, för flödeslinjer från varje markhöjdmodell, antalet existerande trummor som är förknippade med flödeslinjer med en flödesackumulation ≥ 1 ha som korsar en väg inom buffertzonen. Figur 2.5.2 ger exempel på hur situationen kan se ut både när man skall räkna med en trumma och när man inte skall det i bestämningen av detta antal. I figuren ser vi även exempel på flödeslinjer som korsar vägar utanför buffertzonen kring kända trummor, och vi bestämmer även antalet sådana vägkorsningar för respektive markhöjdmodell.



Figur 2.5.2. Analys av antal kända vägtrummor som inom en 10 m buffertzon har vägkorsande flödeslinjer med flödesackumulation om 1 ha eller högre samt antal korsningar av väg där flödeslinjer inte ansluter till kända vägtrummor i delavrinningsområde Svartån. Överst t.v.: Flödeslinjer ≥ 1 ha respektive 250 ha för HK-INV/TRV utan genombrytning (referensmodell) kända vägtrummor). Överst t.h.: Situation där flödeslinjer ≥ 1 ha från samtliga modeller passerar en väg i anslutning till en av de kända trummorna samt en situation där ingen flödeslinje passerar för en annan känd trumma. Trumman där samtliga flödeslinjer ≥ 1 ha passerar en väg inom buffertzonen skall alltså räknas med i antalsbestämningen medan trumman där ingen flödeslinje ≥ 1 ha passerar vägen inte skall räknas med. Nederst t.v. och t.h.: Hur flödeslinjer ≥ 1 ha ifrån referensmodellen HK-INV/TRV (t.v. och t.h), ordinarie markhöjdmodell utan genombrytning (t.v) samt ifrån HK-AI-SAMTL (t.h) passerar vägar i relation till befintliga trummor (t.v. och t.h) och inlagda AI-identifierade trummor (t.h). För ordinarie markhöjdmodell kan vi (t.v.) se att den enda vägkorsande flödeslinjen i utsnittet inte korsar vägen i anslutning till en känd trumma. Flödeslinjerna ifrån HK-AI-SAMTL (t.h) korsar dock vägen både i och utan anslutning till kända trummor. Korsande av väg utan anslutning till kända trummor sker för denna markhöjdmodell där AI-lokaliserade vägtrummor tagits fram och lagts in i modellen.

Figur 2.5.3 visar resultatet för analysen av de översiktliga flödesmönstren i relation till vägar inom delavrinningsområde Svartån. I figur 2.5.3 a) kan vi se att antalet trummor korrelerade med vägkorsande flödeslinjer ≥ 1 ha är högst för markhöjdmodell HK-INV/TRV (vår referensmodell med hydrologisk korrigering utifrån kända trummor), näst högst för markhöjdmodell HK-AI-SP, näst lägst för markhöjdmodell HK-AI-SAMTL och lägst för ordinarie markhöjdmodell. Detta mönster gäller både med och utan genombrytning och vi kan också se att det, för respektive vägtrummeunderlag till markhöjdmodellerna, inte är någon nämnvärd skillnad i antalet flödeslinjekorrelerade vägtrummor utan respektive med tillämpad genombrytning.

När det gäller flödeslinjer som korsar vägar utan koppling till kända vägtrummor ser vi i figur 2.5.3. b) att antalet sådana flödeslinjer som lägst är omkring 70 st (referensmodell HK-INV/TRV och modell HK-AI-SP) och som högst 130 st (modell HK-AI-SAMTL). För ordinarie markhöjdmodell utan genombrytning uppgår antalet sådana flödeslinjer till 105 st. Liksom statistiken i figur 2.5.3. a) skiljer sig antalet flödeslinjer som korsar vägar utan anslutning till kända vägtrummor inte nämnvärt åt mellan markhöjdmodeller utan respektive med tillämpad genombrytning.



Figur 2.5.3. Statistik för delavrinningsområde Svartån och de olika markhöjdmodellerna i analysen, med respektive utan genombrytning, när det gäller kända vägtrummor med vägkorsande flödeslinjer i anslutning till dessa (a) samt vägkorsande flödeslinjer utan koppling till existerande trummor (b). Den övre figuren (a) visar antalet existerande vägtrummor som korrelerar med flödeslinjer som korsar vägar inom 10 m buffertzoner kring dessa trummor samt anger procentuell andel av det totala antalet kända trummor i området (207 st – indikeras av var ramen för respektive stapel i a) slutar) respektive antal utgör. Den undre figuren (b) visar antalet vägkorsningar av flödeslinjesegment som korsar vägar utanför respektive buffertzoner kring de kända vägtrumorna. Enbart flödeslinjer med flödesackumulation ≥ 1 ha i linjernas slut har använts för att ta fram statistiken.

Att antalet flödeslinjekorrelerade trummor för HK-AI-SP i figur 2.5.3 a) är högre än för HK-AI-SAMTL kan tolkas som att hur vattenflöden fördelas i HK-AI-SP efterliknar flödesfördelningsmönstret i referensmodellen HK-INV/TRV (framtagen med existerande trummor) mer än fördelningsmönstret i HK-AI-SAMTL (samtliga AI-identifierade trummor). Detta är rimligt eftersom HK-AI-SP-modellen enbart använder sig av trumlokaliseringar som överensstämmer med lokaliseringar av existerande trummor. Då HK-AI-SAMTL-modellen innehåller många korrigeringar för trummor som inte existerar är en tolkning att den modellen fördelar ut vattenflöden i högre grad och att det är därför som antalet existerande trummor som korrelerar med vägkorsande flödeslinjer ≥ 1 ha är lägre än för HK-AI-SP-modellen. I utsnittet nederst till höger i figur 2.5.2 kan vi se ett exempel på att en flödeslinje ≥ 1 ha från HK-AI-SAMTL inte passerar genom den andra buffertzonen från vänster kring en känd trumlokalisering utan i stället passerar en AI-identifierad trumlokalisering något till höger.

För ordinarie markhöjdmodell (d.v.s. utan hydrologisk korrigering) visar figur 2.5.3 a) att antalet trummor korrelerade med vägkorsande flödeslinjer ≥ 1 ha bara uppgår till ca hälften av antalet korrelerade trummor för referensmodellen HK-INV/TRV. Att skillnaden är så stor visar på att data om kända trummor är viktig för framtagandet av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell. Samtidigt är det intressant att antalet trummor korrelerade med vägkorsande flödeslinjer för ordinarie markhöjdmodell ändå är så högt eftersom den modellen inte innehåller någon hydrologisk korrigering.

Även om vi inte illustrerar detta här kan vi för ordinarie markhöjdmodell, utan inlagd hydrologisk korrigering för vägtrummor, se att genombrytningskanaler över vägar överlag (samt motsvarande vägkorsande flödeslinjer) som bildas vid tillämpning av genombrytning med verktyget BreachDepressions korrelerar väldigt väl med vägkorsande flödeslinjer som verktyget r.watersheds ger för den ogenombrutna modellen. Utav detta kan vi dra slutsatsen att verktygen r.watersheds och BreachDepressions ger snarlika resultat när det gäller styrning av flöden över vägar.

Verktyget BreachDepressions bildar bara genombrytningskanaler där gropar och sänkor förekommer i en höjdmodell. Det är då rimligtvis gropförekomst i anslutning till väg och existerande vägtrumma som är orsaken till att det förekommer flödeslinjer över väg och flödeslinjekorrelerade vägtrummor i den ordinarie markhöjdmodellen där genombrytning tillämpats. Verktöget r.watershed å andra sidan tillämpar en minstakostnadsstyrning som tar sig ut ur gropar/sänkor genom att följa den brantaste vägen (se avsnitt 2.4.2). De bestämda flödesriktningarna i verktyget kommer då rimligtvis ge flödeslinjekorrelerade vägtrummor och flödeslinjer som leder över väg för gropar i höjdmodellen som är belägna vid vägbankar och i nära anslutning till existerande vägtrummor.

För ordinarie markhöjdmodell har vi 105 respektive 110 vägpasager för flödeslinjer utan koppling till kända vägtrummor (figur 2.5.3 b)) och 78 respektive 76 kända vägtrummor som korrelerar med flödeslinjer från modellen (figur 2.5.3 a)). Tillämpningen av verktygen BreachDepressions samt r.watershed på ordinarie markhöjdmodell ger alltså upphov till fler oönskade flödeslinjer över vägar än de som faktiskt skall förekomma. I ljus av diskussionen i föregående stycke kan vi härröra detta till förekomsten av gropar/sänkor i anslutning till vägar. För markhöjdmodell HK-AI-SAMTL har vi fler vägpasager för flödeslinjer utan koppling till kända trummor (130 st enligt figur 2.5.3 b), oavsett verktyg) än för ordinarie modell. Detta beror dock inte bara på förekomsten av gropar/sänkor i modell HK-AI-SAMTL utan även på att denna modell implementerar vägtrummor på platser där det inte finns några sådana.

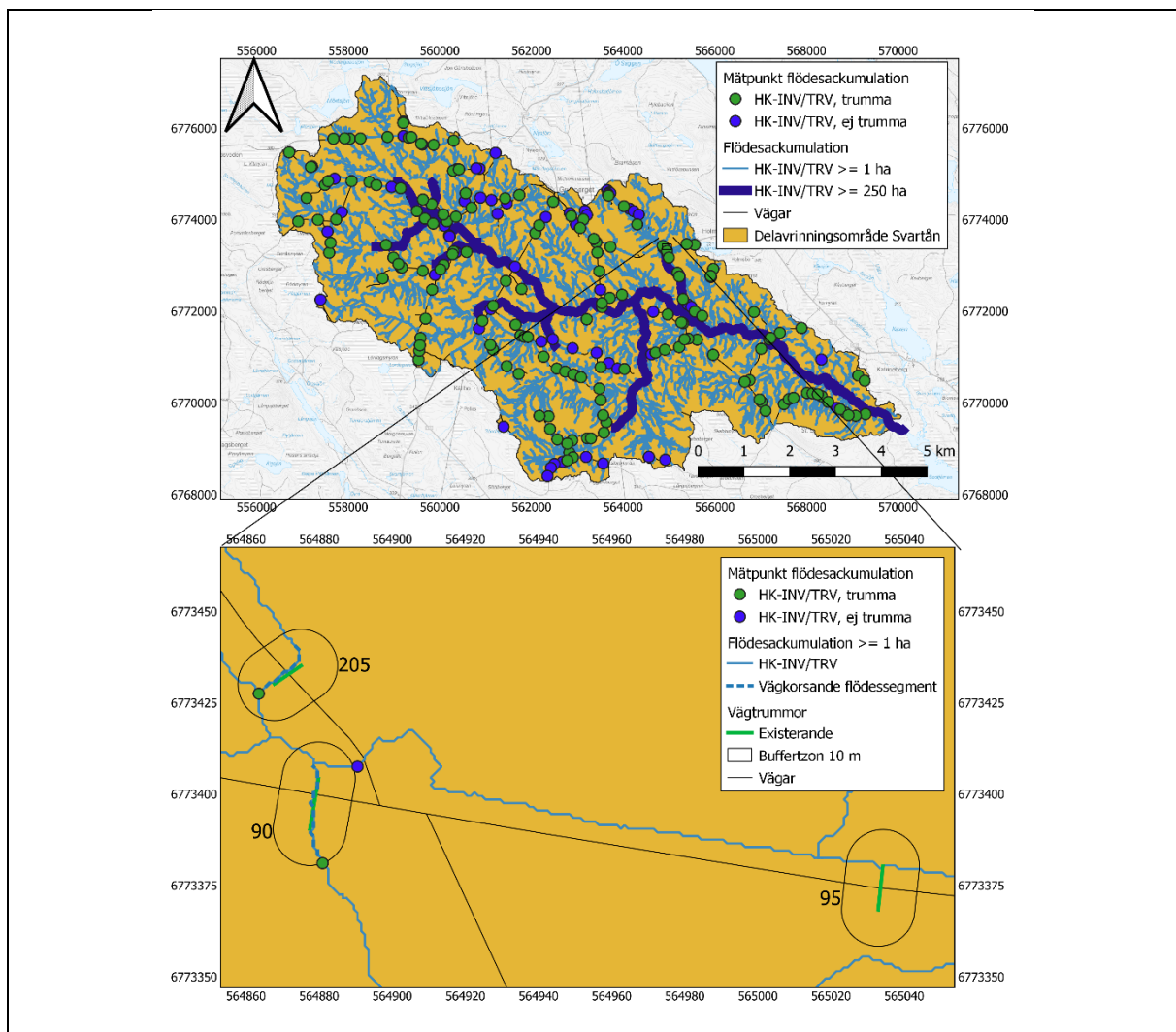
För modellerna HK-AI-SP och HK-INV/TRV (som enbart implementerar vägtrummor på platser där sådana finns) har vi omkring 70 vägpasager för flödeslinjer utan koppling till kända trummor enligt figur 2.5.3 b) samt omkring 140 respektive 160 kända vägtrummor som korrelerar med flödeslinjer

från dessa modeller. Här ger alltså tillämpningen av verktygen BreachDepressions samt r.watershed upphov till fler vägkorsande flödeslinjer som skall förekomma än de som inte skall det. Utifrån detta kan vi se att implementering av kända vägtrummor för hydrologisk korrigering minskar den påverkan som gropar/sänkor har i modeller helt utan hydrologisk korrigering för vägtrummor. Detta beror rimligtvis på att flöden i en hydrologiskt korrigerad modell i högre utsträckning styrs till de vägtrummor som implementerats för att ge flöden genom vägbankar på rätt plats. Att omkring 70 oönskade vägpassager ändå äger rum (ca en tredjedel av antalet kända trummor) indikerar dock att vi inte kan ignorera den effekt som gropar och sänkor har vid modellering av flöden med verktyg som hanterar sådana företeelser.

2.5.3. Analys av flödesackumulation vid flödeslinjepassage genom vägtrummor och över vägar

När vi tittar på antalet kända vägtrummor associerade med flödeslinjer (figur 2.5.3 a)) och antalet flödeslinjepassager över väg utan koppling till vägtrummor (figur 2.5.3 b)) får vi en bild av de olika markhöjdmodellernas översiktliga flödesmönster i relation till vägar och vägtrummor ser ut och stämmer sinsemellan. I detta avsnitt skall vi komplettera denna bild genom att studera flödesackumulation för vägkorsande flödeslinjer med och utan anslutning till kända vägtrummor.

För var och en av de markhöjdmodeller som vi har tagit fram för delavrinningsområde Svartån (tabell 4) har vi använt respektive modells flödeslinjer för att definiera mätpunkter för flödesackumulation i vid vägpassager. I figur 2.5.5. ser vi, i den övre bilden, flödeslinjer om minst 1 ha respektive 250 ha från HK-INV/TRV samt definierade mätpunkter i anslutning till vägpassager genom kända trummor (gröna punkter) samt vägpassager utan koppling till kända trummor (blåa punkter) för den modellen i hela delavrinningsområdet.



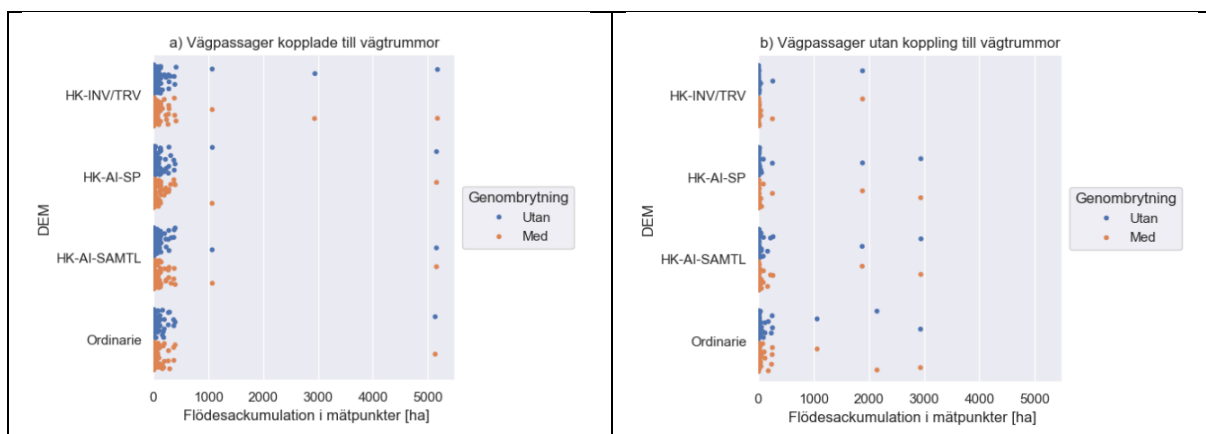
Figur 2.5.5. Framtagna mätpunkter för flödesackumulation från markhöjdmodell HK-INV/TRV i delavrinningsområde Svartån (överst) och illustration av hur mätpunkterna definieras (nederst). Gröna punkter – mätpunkter för vägkorsande flöden genom kända vägtrummor. Blåa punkter – mätpunkter för vägkorsande flöden utan koppling till kända vägtrummor. Se text för ytterligare beskrivning av mätpunkternas definition. Flödeslinjer med minst 1 ha flödesackumulation visas i bägge bilderna. Den övre bilden visar även flödeslinjer med minst 250 ha flödesackumulation för att illustrera huvud- och biflöden i delavrinningsområde Svartån

Mätpunkter för vägpassager genom kända trummor definieras (se den undre bilden i figur 2.5.5) genom buffertzoner på 10 m kring existerande trummor och flödeslinjer (med flödesackumulation ≥ 1 ha) som korsar en väg inuti buffertzonen. Mätpunkterna kan antingen befinna sig inne i buffertzonen (trumma nr 205) eller på buffertzonens kant (trumma nr 90). Flera mätpunkter kan vara möjliga för varje trumma och då väljs den punkt som har högst flödesackumulation som mätpunkt. Om det inte finns någon vägkorsande flödeslinje inom en trummas buffertzon så skapas ingen mätpunkt för den trumman (se till exempel trumma nr 95 i den högra delen av den nedersta bilden i figur 2.5.5). Notera att mätpunkternas läge och antal kan variera mellan olika markhöjdmodeller på grund av variationer i flödeslinjernas sträckning genom trummornas buffertzoner och vilka trumbuffertzoner som modellerna ger vägkorsande flödeslinjer inom.

I den under delen av figur 2.5.5 ser vi också en mätpunkt (blå) för en flödeslinje som passerar en väg utan koppling till någon känd vägtrumma. Genom att dela upp flödeslinjer i enskilda segment (med enbart start- och slutpunkt utan mellanliggande brytpunkter) kan vi ut plocka ut enbart de segment som korsar vägar utanför buffertzoner (10 m) kring kända trummor. Dessa segment har alltså start- och slutpunkt på ömse sidor om en väg och för dessa punkter kan vi ta fram den flödesackumulation som underliggande markhöjdmodell ger. Mätpunkter för vägpassager utan koppling till kända trummor definierar vi sedan genom att välja punkten med högst flödesackumulation från punktparen som definierar de vägkorsande flödessegmenten som plockats ut. För den flödeslinje i figur 2.5.5 som korsar vägen utan koppling till en känd trumma representerar den blåa punkten alltså den punkt i det faktiska vägkorsande segmentet där flödesackumulationen är högst.

2.5.3.1 Övergripande flödesackumulation för vägpassager

För att ge en övergripande bild av flödesackumulationen i de olika markhöjdmodellernas mätpunkter visar figur 2.5.6 uppmätt flödesackumulation uppdelat efter vägpassager för flödeslinjer som är kopplade till vägtrummor (a) och vägpassager utan sådan koppling (b) samt efter markhöjdmodell, utan respektive med genombrytning. Majoriteten av mätpunkterna har en flödesackumulation som är lägre än uppskattningsvis 400 ha för vägpassager kopplade till vägtrummor samt uppskattningsvis 300 ha för vägpassager utan sådan koppling.



Figur 2.5.6. Flödesackumulation i mätpunkter ifrån de olika markhöjdmodellerna för (a) vägpassager kopplade till vägtrummor och (b) vägpassager utan koppling till vägtrummor.

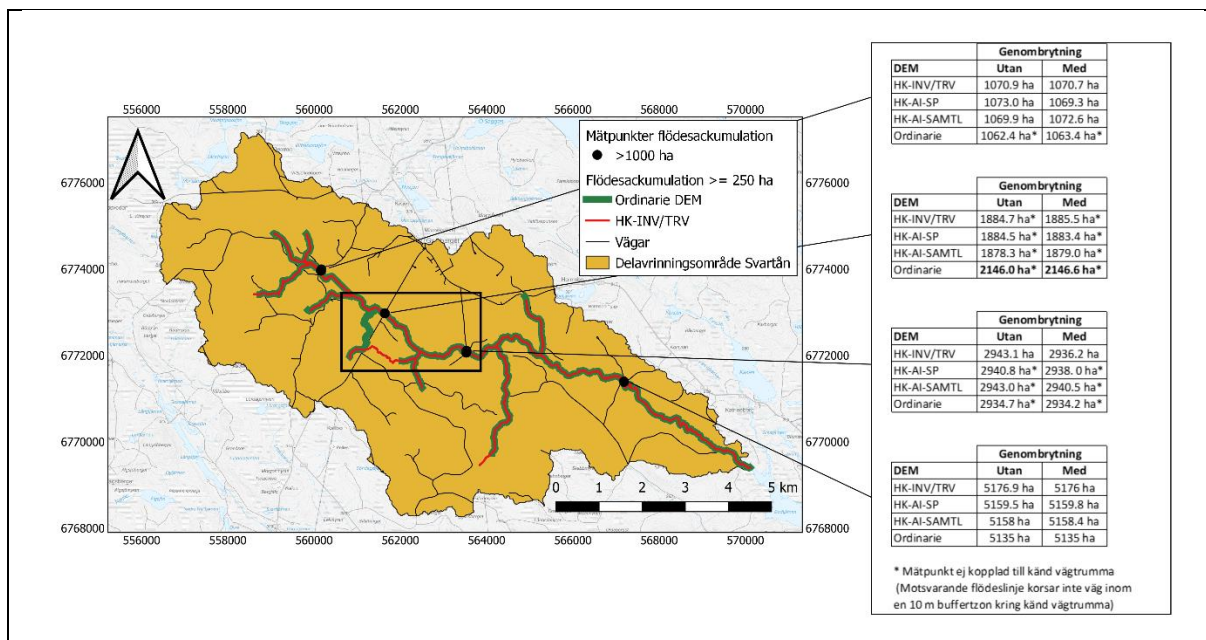
För vägpassagera kopplade till vägtrummor är det svårt att urskilja något mönster i skillnaderna mellan markhöjdmodellerna i mätpunkterna med flödesackumulation lägre än ~ 400 ha. För vägpassagera utan koppling till vägtrummor syns dock en trend med ökande spridning i intervallet upp till ~ 300 ha uppifrån och ner i figur 2.5.6 b), d.v.s. att markhöjdmodellernas flödesackumulation avviker mer och mer ifrån den som referensmodellen HK-INV/TRV ger. Detta påminner i viss mån om

figur 2.5.3 b) även om det faktum att antalet vägkorsande flödeslinjer utan koppling till kända vägtrummor är högst för HK-AI-SAMTL inte visar sig i form av utskickande flödesackumulationen i mätpunkterna för de modellerna (med respektive utan genombrytning) i figur 2.5.6 b).

I figur 2.5.6 kan vi se att samtliga modeller ger upphov till flödesackumulation som är högre än ca 1000 ha i ett antal mätpunkter. Dessa punkter kan delas in i fyra grupper med flödesackumulation omkring 1000 ha, 2000 ha, 3000 ha samt 5000 ha. Samtliga punkter i gruppen med högst flödesackumulation (~5000 ha) hänger ihop med vägkorsande flödeslinjer som är kopplade till kända vägtrummor. För gruppen med flödesackumulation omkring 2000 ha råder i stället det omvända förhållandet genom att dessa punkter hänger ihop vägkorsande flödeslinjer utan koppling till kända trummor. Notera också att flödesackumulationen ifrån ordinarie markhöjdmodell i denna grupp sticker ut jämfört med de övriga mätpunkterna. De andra två grupperna, med flödesackumulation kring 1000 respektive 3000 ha, hänger i sin tur ihop med vägkorsande flödeslinjer som både har och inte har koppling till kända vägtrummor.

Eftersom flödesackumulationen i mätpunkterna representerar all uppströms flödesackumulation så är dessa inte oberoende av varandra. Av de fyra grupperna med flödesackumulation >1000 ha representerar därför gruppen med flödesackumulation kring 1000 ha de mest uppströms belägna punkterna medan gruppen med flödesackumulation kring 5000 ha representerar de mest nedströms belägna punkterna. Att mätpunkterna i grupperna med flödesackumulation kring 1000 samt 3000 ha förekommer både med och utan koppling till kända vägtrummor indikerar möjligtvis att markhöjdmodellerna styr flödet på olika vägar innan de mest nedströms belägna punkterna nås.

För att kasta ljus över situationen har vi, i figur 2.5.7, plottat samtliga mätpunkter med flödesackumulation större än 1000 ha från samtliga använda markhöjdmodeller tillsammans med flödeslinjer som har flödesackumulation >= 250 ha ifrån ordinarie markhöjdmodell samt HK-INV/TRV.



Figur 2.5.7. Mätpunkter med flödesackumulation >1000 ha i delavrinningsområde Svartån samt flödeslinjer med flödesackumulation >=250 ha ifrån ordinarie markhöjdmodell (tjock grön linje) samt HK-INV/TRV (röd linje). Tabellen till höger återger flödesackumulationen i mätpunkterna från de olika modellerna. Situationen inom rektangeln diskuteras i texten.

Figur 2.5.7 visar att det inte går att särskilja mätpunkterna i respektive grupp (~1000 ha, ~2000 ha, ~3000 ha och ~5000 ha), ifrån varandra i den använda skalan och med den använda punktsymbolen.

Detta innebär därmed att de olika modellerna inte ger signifikant annorlunda flödesvägar för det dominerande flödet i delavrinningsområdet, vilket är det som ger upphov till det vattendrag (Svartån) som gett delavrinningsområdet sitt namn. Att en del av mätpunkterna klassats som tillhörande vägpassager utan koppling till kända vägtrummor beror på lokala avvikelser i motsvarande flödeslinjers vägpassager. Några av dessa passerar alltså vägar utanför de använda buffertzonerna (10 m) kring kända vägtrummor men med så små avvikelser att det inte påverkar den dominerande flödesvägen i delavrinningsområdet.

Till höger i figur 2.5.7 återfinns flödesackumulationen i mätpunkterna för respektive grupp. Utifrån den tabellen kan vi se att flödesackumulationen ifrån samtliga hydrologiskt korrigerade modeller (HK-INV/TRV, HK-AI-SP samt HK-AI-SAMTL) är snarlika i sin storlek inom de fyra grupperna. För den mest uppströms belägna gruppen (~1000 ha) samt de två mest nedströms belägna grupperna (~3000 ha och ~5000 ha) är också flödesackumulationen ifrån ordinarie markhöjdmodell snarlik den från de olika hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellerna.

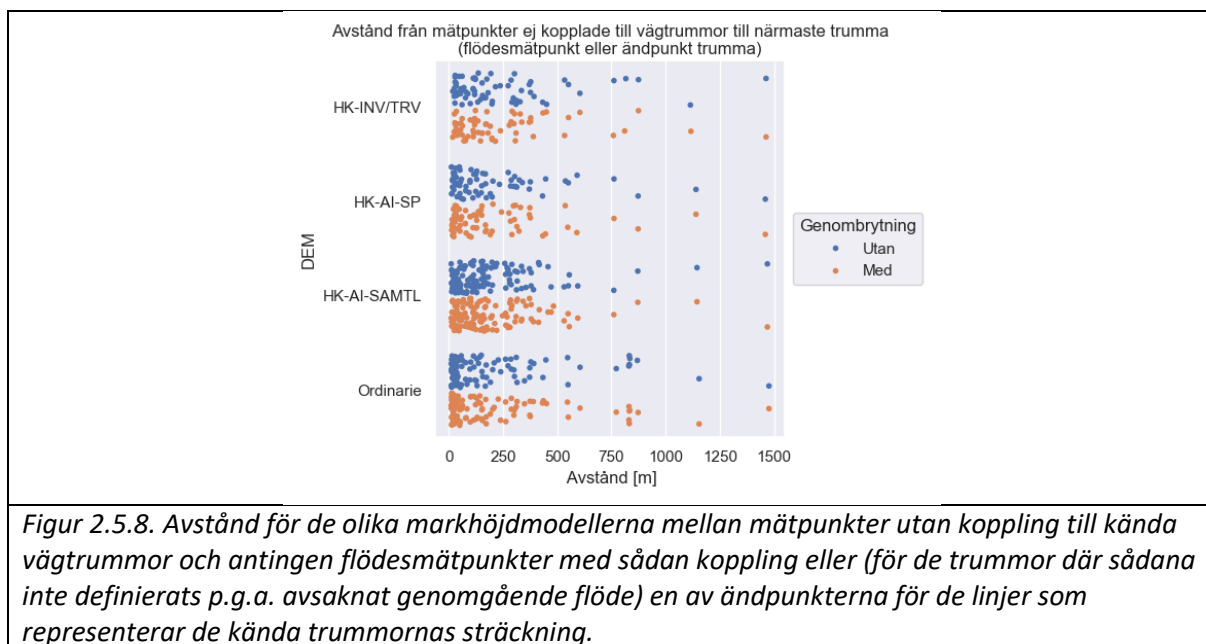
För den andra gruppen uppströms ifrån (~2000 ha) kan vi dock se att flödesackumulationen ifrån den ordinarie markhöjdmodellen är ca 270 ha högre än ifrån de hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellerna. Anledningen till detta kan vi se inom rektangeln i figur 2.5.7. Till den andra gruppen uppströms ifrån ansluter ett biflöde ifrån ordinarie markhöjdmodell medan motsvarande biflöde ifrån HK-INV/TRV i stället korsar en väg (genom en hydrologisk korrigering för en känd trumma) och ansluter till den dominerande flödeslinjen mellan den andra och den tredje gruppen uppströms ifrån. Även HK-AI-SP och HK-AI-SAMTL ger här ett biflöde som tar samma väg som det biflöde som HK-INV/TRV ger. Ordinarie markhöjdmodell ger alltså ett tillskott på ca 270 ha till dominerande flödeslinjen vid den andra gruppen uppströms ifrån som inte de hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellerna ger. Att motsvarande tillskott till den dominerande flödeslinjen sker mellan den andra och den tredje gruppen uppströms ifrån kan vi se genom att samtliga punkters flödesackumulation inom den tredje gruppen är snarlika varandra.

Vid vägpassagen i anslutning till den andra gruppen uppströms ifrån i figur 2.5.7 har ingen av de hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellerna haft någon inlagd hydrologisk korrigering för en vägtrumma. Trots detta har både genombrytning med verktyget BreachDepressions och flödesstyrning med verktyget r.watershed utan genombrytning här gett upphov till flöden över vägen och därmed räddat situationen med den ej inlagda hydrologiska korrigeringen. I tidigare statistik (figur 2.5.3 a)) har vi ju också sett att dessa verktyg kan ge flöden över väg som överensstämmer med kända vägtrummor.

Statistiken i figur 2.5.3. a) visar dock också att verktygen BreachDepressions och r.watershed inte alltid förmår åstadkomma flödesstyrning över väg. Biflödet från ordinarie markhöjdmodell inom rektangeln i figur 2.5.7 som ansluter till den dominerande flödeslinjen vid den andra gruppen uppströms ifrån är ett exempel på detta. Där biflödena från de hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellerna tar sig en annan väg än biflödet från ordinarie markhöjdmodell så sker detta genom en inlagd hydrologisk korrigering för en vägtrumma och resulterande flödesstyrning över väg. Motsvarande flödesstyrning av biflödet över väg sker dock inte för ordinarie markhöjdmodell, varken med verktyget r.watershed eller med tillämpad genombrytning (BreachDepressions). Vi skall titta lite närmare på denna situation i avsnitt 2.5.3.2 men tills vidare utgå ifrån biflödesmönstret från markhöjdmodell HK-INV/TRV som representativ för den korrekta flödessituationen.

Sammanfattningsvis har vi alltså, för ordinarie markhöjdmodell i figur 2.5.7, ett exempel där genombrytning och styrning över en väg i ett fall kunnat rädda flödessituationen men i ett annat fall

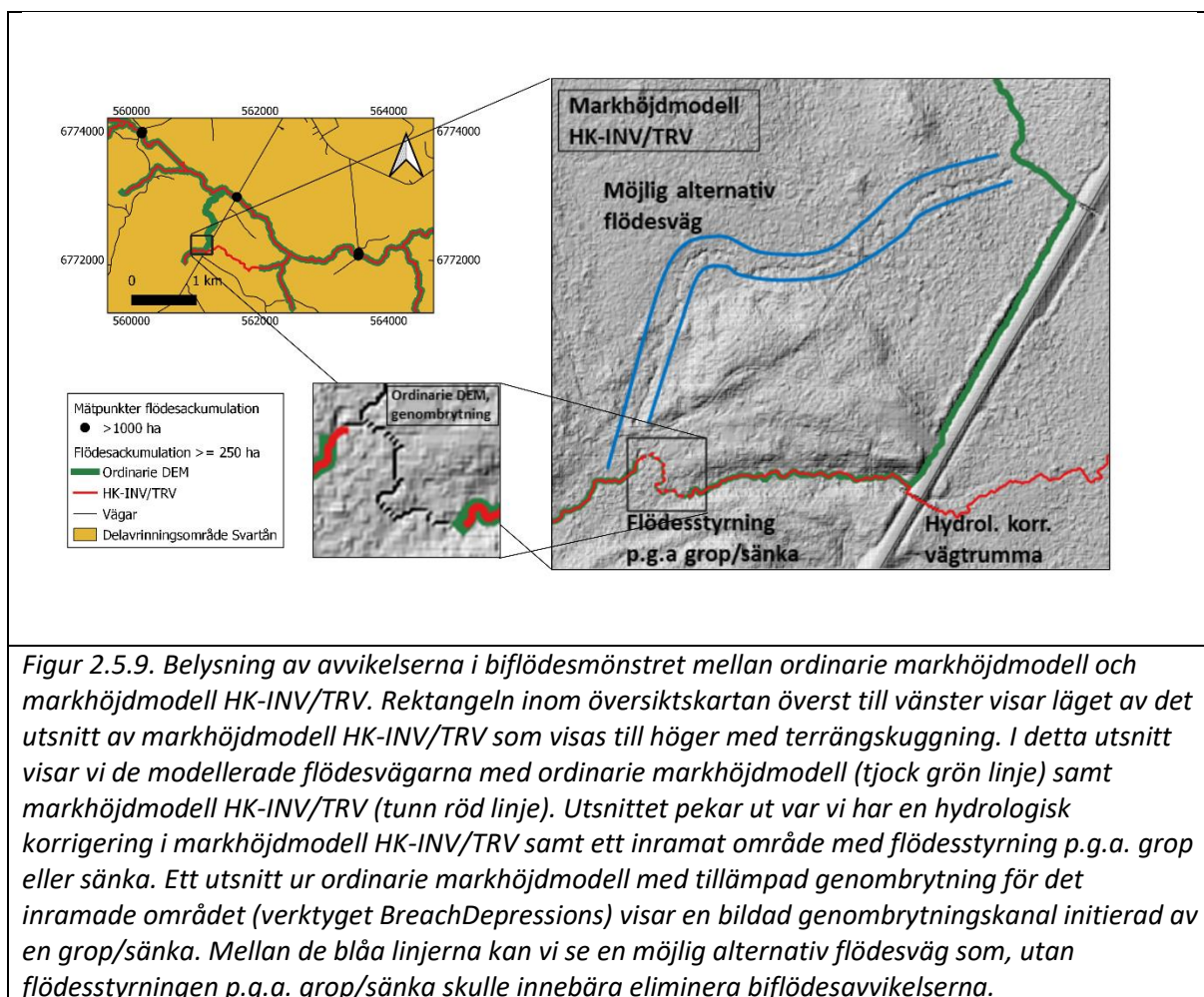
inte kunnat göra det i avsaknad av hydrologisk korrigering. Statistiken i figur 2.5.3 b) visar att det finns ett stort antal flödeslinjepassager över väg som inte kan kopplas till kända vägtrummor. I exemplet med de fyra grupperna av mätpunkter med flödesackumulation större än 1000 ha för delavrinningsområde Svartån gäller att de dominerande flödeslinjerna med tillhörande mätpunkter som inte kan kopplas till kända vägtrummor inte avviker på ett märkbart sätt (se figur 2.5.7) ifrån de som kan det. Detta väcker därför frågan om avvikelser som egentligen ej är märkbara kan ligga bakom mängden flödeslinjepassager över väg som inte kan kopplas till kända vägtrummor i figur 2.5.3 b). Figur 2.5.8 visar, för respektive markhöjdmodell, beräknade avstånd mellan mätpunkter som inte kan kopplas till vägtrummor och antingen närmaste mätpunkt kopplad till en vägtrumma eller (om sådan inte finns tillgänglig) en av ändpunkterna för närmaste vägtrumma. I figuren kan vi se att ett stort antal mätpunkter som inte är kopplade till vägtrummor befinner sig på större avstånd från närmsta trumma (mer än ~50 m, med ett högsta avstånd på ca 1500 m). Enligt figur 2.5.8 har vi alltså ett betydligt antal flödeslinjepassager över väg som vi kan säga saknar koppling till förekomst av kända vägtrummor i modellerna. Att dessa flödeslinjer ändå kan passera vägar på de aktuella platserna hänger rimligtvis i hög grad ihop med att det där förekommer gropar eller sänkor, med tillhörande genombrytning över väg i verktyget BreachDepressions eller flödesstyrning över väg i verktyget r.watershed.



Om vi tittar på delavrinningsområde Svartån som en enhet och enbart är intresserad av det sammanlagda ackumulerade flödet i områdets utloppspunkt så kan vi dra slutsatsen att varken inlagda hydrologiska korrigeringar eller fördelningen av gropar och sänkor i området har någon betydelse eftersom flödesackumulationen i huvudflödet för de mest nedströms belägna mätpunkterna inte skiljer sig nämnvärt åt mellan de använda markhöjdmodellerna. Är vi däremot intresserad av avrinningsområdet internt så har hydrologisk korrigering för kända vägtrummor betydelse. Utan sådan korrigering får det, för ordinarie markhöjdmodell, konsekvensen att delavrinningsområdets huvudflöde under en sträcka på ca 2 km har en flödesackumulation som är ca 270 ha för stor på grund av att ett biflöde inte leds igenom en existerande vägtrumma. I nästa avsnitt skall vi, som tidigare nämnts, titta lite närmare på denna situation.

2.5.3.2 Avvikande biflödesmönster mellan ordinarie markhöjdmodell och HK-INV/TRV

I detta arbete betraktar vi markhöjdmodell HK-INV/TRV som referensmodell eftersom den bygger på det fullständiga underlag med vägtrummor som vi har för delavrinningsområde Svartån. Följaktligen betraktar vi generellt den modellens flödesmönster som det korrekta. För avvikelserna i biflödesmönstret mellan ordinarie markhöjdmodell och modell HK-INV/TRV (figur 2.5.7) faller det sig därför naturligt att anse det avvikande biflödet från ordinarie markhöjdmodell som inkorrekt. Här skall vi genom figur 2.5.9 dock belysa att denna slutsats inte är självklar och att det till och med kan vara så att det avvikande biflödet ifrån ordinarie markhöjdmodell är mer korrekt än biflödessträckningen ifrån modell HK-INV/TRV.



I ordinarie markhöjdmodell med tillämpad genombrytning (verktyget BreachDepressions) kan vi se att vi har en bildad genombrytningskanal som sammanfaller med flödesvägarna för ordinarie markhöjdmodell och markhöjdmodell HK-INV/TRV utan genombrytning. Detta visas i det lilla markhöjdsutsnittet i figur 2.5.9. Då en genombrytningskanal i verktyget BreachDepressions initieras utifrån förekomsten av en grop/sänka och mark kommer verktyget r.watershed initiera motsvarande flödesstyrning i markhöjdmodeller där vi inte tillämpar genombrytning. I det stora utsnittet från markhöjdmodell HK-INV/TRV i figur 2.5.9 visar därför det streckade röda och gröna linjerna den flödesstyrning med verktyget r.watershed som sker för ordinarie markhöjdmodell och markhöjdmodell HK-INV/TRV p.g.a. förekomsten av gropen/sänkan. Denna flödesstyrning styr alltså de båda biflödena i riktning mot den väg som korsas av flödet från markhöjdmodell HK-INV/TRV.

Eftersom vi har en hydrologisk korrigering för en känd vägtrumma på en plats som sammanfaller med var de båda biflödena når fram till vägen så kan biflödet från den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen korsa vägen. Biflödet från ordinarie markhöjdmodell saknar dock en sådan korrigering och i avsaknad av en grop/sänka kan flödet inte heller styras över vägen. Biflödet från ordinarie markhöjdmodell följer därför vägen ett stycke innan det svänger av och fortsätter ut mot huvudflödet i delavrinningsområde Svartån.

I det stora utsnittet från markhöjdmodell HK-INV/TRV i figur 2.5.9 kan vi, mellan de två blåa linjerna, urskilja en vattendragsliknande struktur som ansluter ganska väl till den plats där grop/sänkeförekomsten bidrar till att leda de båda biflödena mot vägen. Denna vattendragsliknande struktur ansluter i sin tur till biflödet från ordinarie markhöjdmodell efter att det flödet lämnat sträckningen längs vägen. Om inte denna grop hade funnits är det möjligt att biflödena i stället skulle ha letat sig fram till och följt den tänkbara alternativa sträckning som vattendragsstrukturen inom de blåa linjerna utgör. I sådana fall skulle vi inte ha haft de biflödesavvikelser som visas i figur 2.5.7 med tillhörande avvikelser i flödesackumulation i huvudflödet för delavrinningsområde Svartån. Om den tänkbara alternativa sträckningen som figur 2.5.9 visar är den korrekta så innebär det att var gropar/sänkor förekommer kan ha en stor påverkan på modellerade flödessituationer vid tillämpning av verktyg som alltid leder flöden vidare.

2.5.3.3 Flödesackumulation i mätpunkter jämfört med referensmodellen HK-INV/TRV

Som vi såg i avsnitt 2.5.3.1 så återspeglar flödesackumulationen i de mätpunkter vi infört för varje markhöjdmodell situationen uppströms respektive mätpunkt. Hur stor flödesackumulationen är i mätpunkterna påverkas både av införda hydrologiska korrigeringar och av hur verktygen BreachDepressions samt r.watershed bidrar till att styra flöden i respektive markhöjdmodell. Genom att titta på hur flödesackumulationen i mätpunkter för vägkorsande flöden från de olika markhöjdmodellerna som är kopplade till kända vägtrummor stämmer överens med flödesackumulationen från referensmodellen HK-INV/TRV (utan tillämpad genombrytning) kan vi få en bild av hur dessa effekter påverkar flödessituationen i delavrinningsområde Svartån.

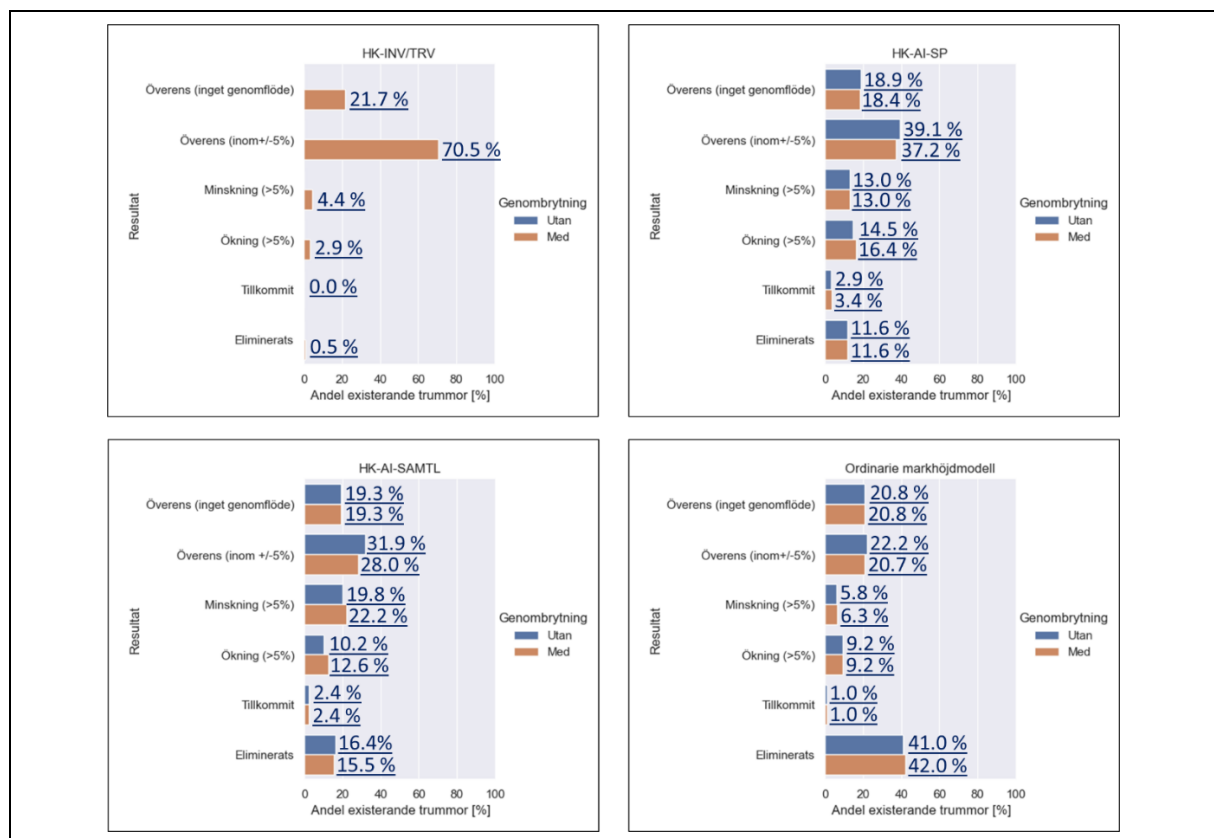
Biflödesmönstret från ordinarie markhöjdmodell i figur 2.5.7 skulle, enligt diskussionen i föregående avsnitt, kunna vara mer korrekt än biflödesmönstret från referensmodellen. Eftersom ordinarie markhöjdmodell saknar hydrologiska korrigeringar kan vi inte använda den för den utvärdering vi önskar göra i detta avsnitt. Eftersom markhöjdmodell HK-INV/TRV representerar den samlade information vi har om vägtrummor i delavrinningsområde Svartån är det den modell vi har att utgå ifrån som referens. Efterföljande diskussion kommer därför relatera till det flödesmönster och den flödesackumulation som den modellen ger.

I jämförelsen av de definierade mätpunkternas flödesackumulation från ordinarie markhöjdmodell, modell HK-AI-SP, modell HK-AI-SAMTL med referensmodell HK-INV/TRV (utan genombrytning) har vi inkluderat flödesackumulation ned till det tröskelvärde (1 ha) vi satt för att bilda flödeslinjer i verktyget r.watershed. De gjorda jämförelserna bygger på att bestämma andelen existerande vägtrummor med:

- flödesackumulation i respektive mätpunkt som:
 - överensstämmer på så sätt att varken jämförelsemodellen och referensmodellen HK-INV/TRV ger flödeslinjer genom trumman och att någon bestämd flödesackumulation inte finns för någon av modellerna - kategori Överens (inget genomflöde)
 - överensstämmer inom +/- 5 % av motsvarande flödesackumulation från referensmodellen HK-INV/TRV - kategori Överens (inom +/- 5%)

- är lägre än referensmodellens flödesackumulation minskad med 5 % - kategori Minskning (>5 %)
- är högre än referensmodellens flödesackumulation ökad med 5 % - kategori Ökning (>5 %).
- tillkommande flödesackumulation i respektive mätpunkt genom flödeslinjer som referensmodellen inte gett upphov till - kategori Tillkommit.
- eliminerad flödesackumulation i respektive mätpunkt genom flödeslinjer som referensmodellen gett upphov till men aktuell modell inte gör - kategori Elimineras.

Figur 2.5.10 visar en sammanställning av de gjorda jämförelserna av flödesackumulation enligt ovan med en delfigur för respektive underlag för hydrologisk korrigering (HK-INV/TRV, HK-AI-SP, HK-AI-SAMTL och ordinarie DEM). Eftersom alla jämförelser görs mot markhöjdmodellen baserat på underlag HK-INV/TRV utan tillämpad genombrytning så visar sammanställningen för detta underlag bara jämförelseresultatet för underlag HK-INV/TRV med tillämpad genombrytning. För resterande underlag visar sammanställningen jämförelseresultaten från motsvarande markhöjdmodeller med respektive utan tillämpad genombrytning.



Figur 2.5.10. Sammanställda resultat för jämförelser av flödesackumulation i mätpunkter mellan de olika hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellerna för delavrinningsområde Svartån och referensmodell HK-INV/TRV utan tillämpad genombrytning. Stapeldiagrammen visar andelen trummor förknippade med sex olika kategorier av jämförelseresultat för markhöjdmodellerna baserade på olika trumunderlag för hydrologisk korrigering. Dessa kategorier beskrivs i rapporttexten. Överst till vänster: jämförelseresultat för trumunderlag HK-INV/TRV (kända vägtrummor) med tillämpad genombrytning. Därefter följer jämförelseresultat både med och utan tillämpad genombrytning för trumunderlag HK-AI-SP (överst till höger), trumunderlag HK-AI-SAMTL (nederst till vänster) samt ordinarie markhöjdmodell utan hydrologisk korrigering (nederst till höger).

I nedanstående diskussion om figur 2.5.10 kommer vi inte diskutera de skillnader i jämförelseresultat som markhöjdmodeller utan respektive med genombrytning ger upphov till eftersom dessa skillnader inte förändrar det övergripande mönstret i figur 2.5.10. Här nöjer vi oss med att konstatera att de små skillnader som ibland finns i figuren indikerar att flödesstyrningen som verktygen BreachDepressions och r.watershed ger kan avvika från varandra för de aktuella markhöjdmodellerna (i avsnitt 2.5.3.4 kommer vi se ett exempel på detta). Sådana avvikelser kommer påverka flödesmönstret och ger därför utslag i en sammanställningsstatistik som i figur 2.5.10.

Om vi börjar med ordinarie markhöjdmodell (nederst till höger i figur 2.5.10) så innebär avsaknaden av hydrologisk korrigering att motsvarande flödesmönster och flödesackumulation enbart beror på flödesstyrningen som verktygen BreachDepressions (vid tillämpad genombrytning) samt r.watershed bidrar med. Frånvaron av hydrologisk korrigering ser vi tydligt genom den höga andelen trummor (41-42%) i klassen Elimineras (där referensmodellen HK-INV/TRV utan genombrytning alltså ger genomflöde medan ordinarie modell inte gör det). Sedan bidrar flödesstyrningen till att det tillkommer genomflöde genom 2 trummor (klassen Tillkommit, 1%) där referensmodellen HK-INV/TRV utan genombrytning alltså inte ger något genomflöde. För de trummor där både ordinarie markhöjdmodell samt referensmodellen ger genomflöde så stämmer flödesackumulationen överens för ca 21-22% av de kända trummorna men har minskat för ca 6% och ökat för ca 9% av dessa. Även om genomflöde genom kända trummor kan ske trots avsaknad av hydrologisk korrigering så påverkar ändå denna avsaknad den flödesmängd som styrs genom de aktuella trummorna.

Underlag HK-AI-SAMTL för hydrologisk korrigering bygger på vägtrummor som till en mindre del är lokaliserade till platser där kända trummor förekommer och till en större del till platser där trummor inte finns. Eftersom underlaget till viss del ger hydrologisk korrigering där kända trummor finns visar figur 2.5.10 (nederst till vänster) att denna korrigering gett effekt genom att andelen kända trummor där genomflöde eliminerats jämfört med referensmodellen sjunkit till ca 16% (klass Elimineras). Där både referensmodell och HK-AI-SAMTL ger trumgenomflöde ser vi att andelen sådana trummor har ökat totalt sett jämfört med ordinarie markhöjdmodell. För de kända trummorna med genomflöde stämmer flödesackumulationen överens med referensmodellen för ca 30% av de kända trummorna men har minskat för ca 20% och ökat för ca 10% av dessa. Här märks förändringarna jämfört med ordinarie markhöjdmodell framför allt på den större andelen trummor med överensstämmande flödesackumulation och på den större andelen trummor där flödesackumulationen minskat jämfört med referensmodellen. Då vi nu har hydrologiska korrigeringar där kända trummor finns bidrar det rimligtvis till den högre andelen trummor med överensstämmande flödesackumulation. Att vi samtidigt har hydrologiska korrigeringar på platser där kända trummor inte finns innebär dock en högre grad av flödesstyrning till flödesvägar som referensmodellen inte ger. Det är därför inte konstigt att vi har en så stor andel trummor där flödet minskat jämfört med referensmodellen samt att vi även kan se att andelen trummor där genomflöde tillkommit är något högre än för ordinarie markhöjdmodell.

Nästa underlag för hydrologisk korrigering, HK-AI-SP, ger en bild av vad vi kan förvänta oss om vi helt kan eliminera vägtrummelokaliseringar där sådana inte finns men inte har ett komplett underlag. I figur 2.5.10 (längst upp till höger) kan vi se att andelen trummor i klassen Elimineras minskat till ca 12%. Att vi inte har felaktigt lokaliserade hydrologiska korrigeringar bidrar alltså till att flöden i högre grad kan ledas genom existerande trummor än om sådana är inblandade och påverkar hur flöden styrs. Andelen kända trummor med trumgenomflöde har även ökat totalt sett jämfört med underlag HK-AI-SAMTL. Flödesackumulationen i anslutning till kända trummor stämmer nu överens med referensmodellen för ca 37-39% av de kända trummorna medan den har minskat för 13 % och ökat

för ca 15-16% av dessa. Jämfört med underlag HK-AI-SAMTL är andelen trummor med minskad flödesackumulation nu lägre medan andelen trummor med ökad flödesackumulation i stället är högre. Detta indikerar rimligtvis att flöden med ett inkomplett men korrekt lokaliserat underlag med hydrologiska korrigeringar i högre grad styr flödet till kända trummor än om vi också har felaktigt lokaliserade sådana. Flödesackumulationen bör då i högre utsträckning kunna öka i genomflöden för en större andel kända trummor. Att flöden ändå kan ta andra vägar än för referensmodellen ser vi dock genom att andelen trummor där genomflöde tillkommit ökat något jämfört med underlag HK-AI-SAMTL.

I diskussionen av figur 2.5.10 har vi hittills inte tagit upp andelen kända trummor där flödesmönstret stämmer överens genom att ingen markhöjdmodell ger genomflöde. För ordinarie markhöjdmodell, HK-AI-SAMTL och HK-AI-SP kan vi dock se att denna andel hela tiden minskar. Att så är fallet beror på att andelen kända trummor där genomflöde tillkommit hela tiden ökat. För det kompletta underlaget av hydrologiska korrigeringar för delavrinningsområde Svartån, HK-INV/TRV, kan vi längst upp till vänster i figur 2.5.10 se att 21.7% av de kända trummorna inte har något genomflöde med respektive utan genombrytning. Eftersom tillämpad genombrytning för referensunderlaget inte ger att genomflöde tillkommer för någon känd trumma så kan andelen trummor utan genomflöde som mest uppgå till 21.7%.

Jämförelsesammanställningen längst upp till vänster i figur 2.5.10 illustrerar effekten av att tillämpa genombrytning i markhöjdmodellen baserad på referensunderlaget HK-INV/TRV för hydrologisk korrigering i delavrinningsområde Svartån. Flödesackumulationen med genombrytning stämmer överens med den utan genombrytning för ca 70% av trummorna medan ca 5% uppvisar minskad flödesackumulation och ca 3% visar ökad flödesackumulation. Att det finns trummor med minskning respektive ökning visar att verktygen BreachDepressions (genombrytning) och r.watershed kan ge resultat som kan skilja sig åt. Detta visar sig också i att genombrytning orsakar ett eliminerat genomflöde för en trumma jämfört med motsvarande flöden utan genombrytning. Det eliminerade flödet genom denna trumma med tillämpad genombrytning behöver då ta sig en annan väg och det kan då påverka flöden genom andra trummor. Detta är möjligtvis förklaringen till att vi har ett antal trummor med avvikelser från den flödesackumulation som fås utan genombrytning.

Med en ökande grad av kompletta hydrologiska korrigeringar när det gäller vägtrummor i delavrinningsområde Svartån bör jämförelsen med referensunderlaget HK-INV/TRV gå mot det som sammanställningen längst upp till vänster i figur 2.5.10 visar. Om det inte vore någon skillnad mellan verktygen BreachDepressions och r.watershed borde andelen trummor med genomflöden som tillkommit eller eliminerats samt andelen trummor där flödesackumulationen minskat eller ökat jämfört med referensmodellen gå mot 0%. Följaktligen skulle andelen trummor med överensstämmande flödesackumulation gå mot 78% och andelen trummor utan genomflöde gå mot 22% desto mer komplett vårt underlag med hydrologiska korrigeringar vore.

2.5.3.4 Olika flödesvägars påverkan på ett biflöde

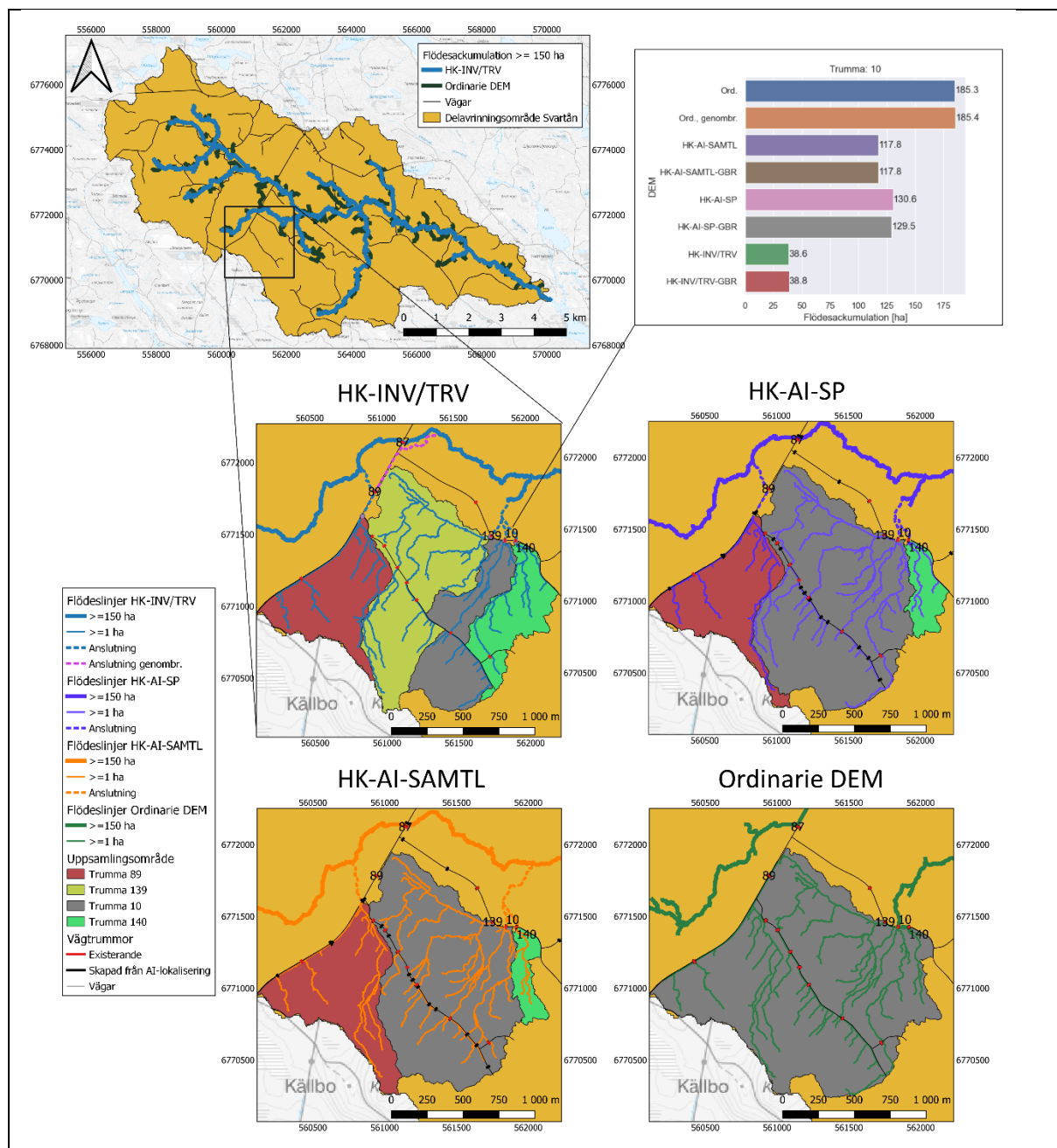
I avsnitt 2.5.3.1 visade vi och diskuterade hur olika flödesvägar för biflöden ifrån ordinarie markhöjdmodell samt referensmodellen HK-INV/TRV påverkade huvudflödet i delavrinningsområde Svartån. I det här avsnittet skall vi på en mer lokal nivå belysa faktorer vid hydrologisk korrigering och flödesstyrning som kan ge upphov till olika flödesvägar och bidra till en påverkan på biflödesnivå. För detta utgår vi från uppmätt flödesackumulation genom en av de kända trummorna i delavrinningsområde Svartån, vägtrumma nr 10. Från stapeldiagrammet längst upp till höger i figur 2.5.11 kan vi se att markhöjdmodellen baserad på referensunderlag HK-INV/TRV ger lägst flödesackumulation (ca 39 ha) och ordinarie markhöjdmodell ger högst (ca 185 ha).

Markhöjdmodeller baserade på underlagen för hydrologisk korrigering i form av AI-lokaliserade trummor ger en flödesackumulation på ca 118 ha (HK-AI-SAMTL) samt ca 130 ha (HK-AI-SP). Dessa siffror indikerar en mer uppströms situation för referensunderlaget och en mer nedströmssituation för de andra modellerna. Då resultaten utan respektive med tillämpad genombrytning är snarlika kommer vi fokusera på flöden ifrån modellerna utan genombrytning i den fortsatta diskussionen.

Vad är det då som ligger bakom att flödesackumulationen igenom trumma nummer 10 skiljer sig åt mellan de olika markhöjdmodellerna? Vi kan belysa detta genom att titta på flödessituationen kring det inramade biflödet i översiktskartan längst upp till vänster i figur 2.5.11. Om vi börjar med referensunderlag HK-INV/TRV så ser vi i motsvarande detaljkarta (längst upp till vänster i flödessituationsmatrisen) att vi har en trumma till vänster (nr 139) och en till höger (nr 140) om trumma nr 10 som alla har varsitt genomflöde och varsitt uppsamlingsområde. Nedströms dessa löper flödet samman och ansluter sedan till den biflödesgren (≥ 150 ha) som leder flödet vidare. I området har vi även trumma nr 89. Flödet från dess uppsamlingsområde leds genom trumman och ansluter till en biflödesgren som så småningom, via trumma 87, löper samman med biflödesgrenen med flöden från trumma nr 139, 10 och 140. Nedströms detta sammanflöde har alltså allt uppsamlat flöde från trumma nr 89, 139, 10 och 140 sammanförts.

Figur 2.5.3 a) visar att vi har en trumma mindre med genomflöde för markhöjdmodell HK-INV/TRV med tillämpad genombrytning jämfört med situationen utan. Detta kan vi också se i figur 2.5.10 i stapeldiagrammet med sammanställda flödesackumulationsjämförelser för markhöjdmodell HK-INV/TRV genom att vi har 0.5% trummor (1 st) med eliminerat flöde efter tillämpad genombrytning. I flödessituationskartan för HK-INV/TRV i figur 2.5.11 kan vi se att det är trumma nr 89 som ligger bakom det i figur 2.5.3 a) och figur 2.5.10 visar. Utan genombrytning leds alltså flöde genom trumma 89 medan det i stället fortsätter längs vägen när genombrytning tillämpas. I detta fall får genombrytning alltså effekten att motverka en inlagd hydrologisk korrigering för en känd vägtrumma (nr 89). Detta får i sin tur följden att flödet från uppsamlingsområde för trumma nr 89 når biflödet från området nedströms trumma 87 i stället för uppströms. Anslutningspunkten till biflödet ligger då ca 750 meter nedströms anslutningspunkten flödet skulle ha haft om det letts genom trumma 89.

Att flödesmönstret i detaljkartan för HK-INV/TRV är vad vi bör förvänta oss med ett fullständigt underlag för hydrologisk korrigering ger en grund för utvärdering av flödesmönster från andra markhöjdmodeller. För markhöjdmodellen baserat på underlag HK-AI-SP, med hydrologiska korrigeringar för AI-identifierade trummor bara där det också finns kända trummor, ser vi i motsvarande detaljkarta (längst upp till höger i flödessituationsmatrisen) att uppsamlingsområdet för trumma nr 10 även täcker in uppsamlingsområdet för trumma nr 139 i detaljkartan för HK-INV/TRV. Detta innebär alltså att genomflödet i trumma 139 för HK-INV/TRV i stället sker igenom trumma nr 10 tillsammans med flödet från den trummans uppsamlingsområde, och det förklarar den ökning i flödesackumulation mellan HK-INV/TRV och HK-AI-SP som vi kan se i stapeldiagrammet i figur 2.5.11.



Figur 2.5.11. Illustration av flödesmönsters påverkan på biflödesnivå i anslutning till vägtrumma nr 10 i delavrinningsområde Svartån. Kartan längst upp till vänster ger en översikt över bi- och huvudflöden (flödesackumulaton >=150 ha) i delavrinningsområdet för ordinarie markhöjdmodell (tjock mörkgrön linje) samt referensmodellen HK-INV/TRV (tjock blå linje). Ramen visar det studerade biflödesområdet och matrisen med kartor nederst i figuren visar flödessituationen inom detta område ifrån markhöjdmodellerna med underlag HK-INV/TRV (referensunderlag), HK-AI-SP och HK-AI-SAMTL samt ifrån ordinarie markhöjdmodell. I dessa fyra kartor visas läget av fem existerande vägtrummor (nr 87, 89, 139, 10 och 140), uppsamlingsområdena för trumma 89, 139, 10 och 140 med interna flödeslinjer (>=1 ha) samt anslutningar till biflöden (>=150 ha) (streckade linjer för anslutning och tjockare linjer för biflöden). Uppsamlingsområdena är färgsatta utifrån deras koppling till de fyra trummorna för referensmodellen (längst upp till vänster i matrisen). Existerande vägtrummor och vägtrummor framtagna från AI-lokalisering visas med rött respektive svart. Diagrammet till höger om översiktskartan visar uppmätt flödesackumulaton genom trumma nr 10. Strecket ifrån diagrammets nedre vänstra hörn pekar ut läget för denna trumma i kartan för HK-INV/TRV.

För markhöjdmodellen baserat på underlag HK-AI-SAMTL, med hydrologiska korrigeringar för AI-identifierade trummor som även kan förekomma på platser där inga kända trummor finns, ser vi i motsvarande flödessituationskarta (längst ned till vänster i flödessituationsmatrisen i figur 2.5.10) att uppsamlingsområdet för trumma nr 10 till större delen, men inte helt och hållet, täcker uppsamlingsområdet för trumma 139 i detaljkartan för HK-INV/TRV. Den totala flödesackumulationen som leds genom trumma 10 för HK-AI-SAMTL blir därför lägre än motsvarande flödesackumulation för HK-AI-SP.

Varför får vi då inget genomflöde igenom trumma 139 med hydrologiska korrigeringar baserade på AI-identifierade trummor? För de platser där trumma nr 139, 10 och 140 befinner sig har vi utifrån AI-lokaliseringar gjort en uppskattning av start- och slutpunkter för motsvarande AI-identifierade trummor. Detta underlag har vi sedan använt för att ta fram hydrologiska korrigeringar. Eftersom hydrologiska korrigeringar baserat på information om kända trummor har gett genomflöden för samtliga av de tre trummorna men motsvarande AI-baserade hydrologiska korrigeringar enbart ger genomflöden för två av dessa kan vi dra slutsatsen att underlaget för de hydrologiska korrigeringarna är viktigt. I fallet med trumma 139 har alltså det AI-baserade underlaget för den hydrologiska korrigeringen inte fört med sig den önskvärda effekten med genomflöde. För det aktuella fallet med trumma 139 skulle anledningen till att så inte skett (för det koncept vi arbetat med i projektet) med det AI-baserade underlaget kunna vara att motsvarande hydrologisk korrigering i TIN-format inte kunnat passas in i underliggande höjdmodell tillräckligt bra för att ett genomflöde skall vara möjlig. Om vi också tittar närmare på uppsamlingsområdet till trumma 89 i flödessituationen för HK-INV/TRV kan vi där se flöde som leder rakt in mot en känd trumma med hydrologisk korrigering men där genomflöde inte sker. Även här har den hydrologiska korrigeringen inte gett önskad effekt. Dessa exempel illustrerar vikten av att underlag för hydrologisk korrigering, oavsett källa, håller en hög kvalitet så att korrigeringen kan passas in i underliggande höjdmodell på så sätt att den ger ett genomflöde på rätt plats och med korrekt riktning.

Flödesackumulationen som leds genom trumma 10 och trumma 140 i flödessituationerna för HK-AI-SP och HK-AI-SAMTL ansluter till biflödet som leder vidare vid samma punkt nedströms dessa trummor som den flödesackumulationen som leds genom trumma 139, 10 och 140 i flödessituationen för HK-INV/TRV. Hur flödesackumulationen som samlas upp till trumma 89 ansluter till biflödet som leder vidare skiljer sig dock åt mellan flödessituationen för HK-AI-SP och flödessituationen för HK-AI-SAMTL. Hydrologiska korrigeringar för HK-AI-SP har alltid anslutning till förekomst av kända trummor. Flödet som samlas upp till trumma 89 i flödessituationen för HK-AI-SP leds därför igenom trumman och ansluter till biflödet som leder vidare vid samma punkt där flödet genom trumma 89 ansluter i flödessituationen för HK-INV/TRV. I flödessituationen för HK-AI-SAMTL kan vi dock se att flödet från trumma 89:s uppsamlingsområde, genom en inlagd hydrologisk korrigering för en vägtrumma som inte existerar, har ett flöde över väg uppströms trumma 89. Därefter fortsätter flödet på andra sidan vägen och når biflödet som leder vidare på ungefär samma plats som flödet från uppsamlingsområdet för trumma 89 i flödessituationen för HK-AI-SP. För både HK-AI-SP och HK-AI-SAMTL fortsätter sedan biflödet via trumma 87 och når så småningom den punkt där uppsamlat flöde från trumma 10 och 140 ansluter i respektive flödessituation.

Ordinarie markhöjdmodell har inga inlagda hydrologiska korrigeringar för vägtrummor. I motsvarande flödessituation (längst ned till höger i flödessituationsmatrisen i figur 2.5.11) ser vi att det drastiskt förändrar flödesmönstret relaterat till trumma 89, 10, 139 och 140 jämfört med situationen för HK-INV/TRV, HK-AI-SP och HK-AI-SAMTL. Flödet över väg vid trumma 10 är nu den enda flödesväg som ansluter till ett biflöde för vidareflöde. Flödesackumulationen vid trumma 10 är

därför så stor att det biflödet (≥ 150 ha) nu får sin början direkt i anslutning till trumma 10 i stället för en bit nedströms som i de övriga flödessituationerna för området i figur 2.5.11.

Avsaknad av hydrologiska korrigeringar för vägtrummor får, för ordinarie markhöjdmodell, följden att vägarna i området bildar effektiva vattendelare och flödesbarriärer. Inom uppsamlingsområdet till trumma 10 korsar flödeslinjerna ordinarie markhöjdmodell bara vägar på ett fåtal ställen. Fyra av de korsningarna sker längs vägen som löper genom området. Den ena av dessa är vid vägens slut och den andra vid anslutning till den väg som leder till trumma 89. Genom att det är en ganska lång sträcka mellan de andra två vägpassagerna för flödeslinjerna bidrar detta till mer koncentrerade flöden i flödessituationen för ordinarie markhöjdmodell. En större del av det flöde som samlas upp ovanför vägen genom området koncentreras därför mer än vad som sker i flödessituationerna för de andra markhöjdmodellerna.

Flödessituationen för ordinarie markhöjdmodell i figur 2.5.11 representerar situationen utan tillämpad genombrytning. Det är då flödesstyrningen i verktyget r.watershed som avgör vad som skall ske när gropar och sänkor förekommer i markhöjdmodellen. Vid tillämpad genombrytning är det i stället verktyget BreachDepressions som avgör vad som kommer ske vid gropar och sänkor. Flödesmönstren utan respektive med genombrytning ger dock väl överensstämmande flödesmönster för ordinarie markhöjdmodell inom uppsamlingsområdet till trumma 10, med flödesstyrning över väg på samma platser.

Eftersom verktygen r.watershed och BreachDepressions bara ger flöden över väg i anslutning till gropar och sänkor så har den rumsliga fördelningen av dessa en stor betydelse i en markhöjdmodell utan hydrologiska korrigeringar. Av de fyra vägpassager för flödeslinjer från ordinarie markhöjdmodell som sker över vägen som löper igenom området kring trumma 89, 139, 10 och 140 sker bara två av dem i anslutning till någon av de sex kända trummorna vid denna väg. Om vi ser till kopplingen till de biflöden som leder flöden vidare från situationsområdet sker inte heller någon vägpassage vid trumma 89, trumma 139 och trumma 140 i flödessituationen för ordinarie markhöjdmodell. Utöver det har biflödet (≥ 150 ha) väster om den väg som korsas av trumma 89 inte någon vägpassage för ordinarie markhöjdmodell vid trumma 87.

I de hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellerna leder trummorna 89 och 87 till att flöden från respektive uppsamlingsområden för trumma 89 utgör tillskott till samma biflöde som flöden från respektive uppsamlingsområde för trumma 10, 139 och 140 så småningom också utgör tillskott till. Här har vi alltså bara ett större biflöde genom området. För ordinarie markhöjdmodell innebär dock de uteblivna vägpassagerna vid trumma 89 och trumma 87 att vi i stället får två större och från varandra isolerade biflöden där bara ett av dem, via trumma 10, har koppling till flöden från trumma 89, 139, 10 och 140:s uppsamlingsområden. Konsekvenserna av de två isolerade biflödena för huvudflödet i delavrinningsområde Svartån illustreras i figur 2.5.7 och diskuteras i avsnitt 2.5.3.1. I avsnitt 2.5.3.2 tar vi även upp möjligheten att det biflöde som för de hydrologiskt korrigerade modellerna i figur 2.5.11 samlar upp flöden ifrån trumma 10, 139 och 140:s uppsamlingsområden i själva verket inte skall ha den sträckning det har. Om så vore fallet skulle det uppsamlade flödet genom dessa trummor vara mer av ett källflöde än ett biflödestillskott.

Flödesstyrningen i verktygen r.watershed och BreachDepressions kan ge vägpassager om det finns gropar och sänkor i anslutning till en väg. För ordinarie markhöjdmodell har vi konstaterat att väldigt få vägpassager i området kring trumma 89, 139, 10 och 140 sker i anslutning till kända trummor. Detta innebär att frånvaro av gropar och sänkor i anslutning till kända trummor får stor betydelse för områdets flödesmönster med ordinarie markhöjdmodell. Samtidigt har gropar och sänkor i anslutning till väg där vi inte har någon vägtrumma också betydelse för flödesmönstret. Ett exempel

på det är hur flöden från uppsamlingsområdet till trumma 89 leds vidare för markhöjdmodell HK-INV/TRV, HK-AI-SP och ordinarie markhöjdmodell. För dessa modeller har vi vägpassager som leder mot trumma 89 även om de saknar inlagd hydrologisk korrigering i anslutning till väg på den aktuella platsen. Detta innebär alltså att flödesstyrning kopplad till förekomsten av en grop/sänka är det som leder flöden i riktning mot trumma 89.

Vid flödesstyrning över väg där vi saknar information om kända trummor är en rimlig fråga om associerade vägpassager sker på rätt plats. För fallet med flöden från trumma 89:s uppsamlingsområde så framstår det, i ljus av flödessituationen i stort, att det kan finnas en vägtrumma (även om den inte ingår i underlaget med kända trummor) som leder dessa flöden vidare vid den aktuella T-korsningen. Flödesstyrning över väg kopplad till grop- eller sänkeförekomst innebär i detta fall då att grop/sänka förekommer på rätt plats, d.v.s. där vägpassage skall initieras för att leda flöden från trumma 89:s uppsamlingsområde vidare. Utan någon form av bekräftelse kan vi dock inte vara helt säkra på att så verkligen är fallet, och en flödesstyrning över väg på fel plats har potential att signifikant förändra en flödessituation. Om vi i detta fall dock utgår från att platsen för flödesstyrning över väg är korrekt så kan vi inte vara säkra på att flödesstyrningen sker över rätt väg. Det skulle ju kunna vara så att styrningen av flödet över väg från trumma 89:s uppsamlingsområde för markhöjdmodell HK-INV/TRV, HK-AI-SP samt ordinarie markhöjdmodell i stället skall ske såsom för markhöjdmodell HK-AI-SAMTL, d.v.s. över huvudvägen vid T-korsningen.

I detta avsnitt (2.5) har vi, för delavrinningsområde Svartån, tittat på statistik kring flödeslinjepassager över väg och tillhörande flödesackumulation samt två specifika flödessituationer med syfte att söka utvärdera indata och metod för hydrologisk korrigering med fokus på vägtrummor och flödesstyrning vid gropar och sänkor. I nästa avsnitt skall vi diskutera hela arbetet i deluppdrag 2 och även ge rekommendationer för fortsatt arbete med indata och hydrologisk korrigering.

2.6 Diskussion arbetspaket Indata

I arbetspaket Indata till en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell har vi tittat både på ett koncept för tillhandahållande och framställning av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell samt kvalitetsaspekter i relation till indata i form av vägtrummor. Vi kommer diskutera tillhandahållande och framställning av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell samt kvalitetsaspekter i relation till indata i separata underavsnitt. I arbetet med detta projekt har det klarnat att det, beroende på syftet med den modellering som skall göras, finns två utgångspunkter när det gäller hantering av sänkor, gropar och platta ytor i en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell (se avsnitt 2.1). För dessa företeelser är den ena utgångspunkten att flöden tillåts stanna upp där dessa förekommer medan den andra är att detta inte får ske och att flöden i stället skall ledas vidare. I ett tredje underavsnitt kommer vi därför diskutera flödesstyrning i relation till gropar, sänkor och platta ytor. Strävan är att hålla diskussionen i de tre underavsnitten fristående från varandra. Det kan dock finnas hänvisningar mellan underavsnitten då det finns kopplingar mellan dem, framför allt när det gäller flödesstyrning i relation till gropar, sänkor och platta ytor.

2.6.1 Koncept för tillhandahållande och framställning av hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell

För ett tillhandahållande av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell har vi i arbetspaket Indata utgått ifrån att Lantmäteriet skall stå för detta. Tillhandahållandemodellen bygger därför på att komplettera Lantmäteriets befintliga infrastruktur för tillhandahållandet av ordinarie markhöjdmodell (se figur 2.3.1 i avsnitt 2.3.1). I den modell vi har tänkt oss införs de hydrologiska korrigeringarna genom brytgeometrier i en representation av den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen i form av en TIN-struktur.

Ovanstående koncept innebär att det är nödvändigt att ta fram brytgeometrier utifrån indata om företeelser för hydrologisk korrigering. I projektet har vi tagit fram en metod som, med lägesinformation i plan om vägtrummers ändpunkter, tar fram motsvarande brytgeometrier för hydrologisk korrigering och höjdsätter dessa utifrån ordinarie markhöjdmodell. För analys i projektet har vi sedan använt denna metod för att ta fram olika uppsättningar hydrologiskt korrigerade markhöjdmodeller utifrån olika underlag när det gäller vägtrummor.

Genom att vår tillhandahållandemodell separerar framtagningen av brytgeometrier för hydrologisk korrigering från framställningen av den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen är det enkelt att komplettera med hydrologisk korrigering för andra företeelser än vägtrummor. För att, till exempel, införa hydrologisk korrigering för diken är framtagning av brytgeometrier som representerar diken det enda som behövs. Givet linjesträckningen för ett dike skulle då en standardmodell kunna användas för att utifrån denna ta fram brytgeometrier och höjdsätta dessa med hjälp av ordinarie markhöjdmodell.

Vid framtagning av brytgeometrier för hydrologisk korrigering är höjdsättningen av dessa en potentiell felkälla som vi vill nämna. Som figur 2.3.3 visar och vi redogör för i avsnitt 2.3.2 så använder vi höjd från ordinarie markhöjdmodell där vägbank övergår i vattendrag för att höjdskillnaderna mellan dessa punkter på ömse sidor om vägbanken skall definiera flödesriktningen genom den hydrologiska korrigeringen för trumman. Detta för med sig att det finns en risk, speciellt i flacka områden, att höjdsättningen av brytgeometrierna leder till flödesriktningar genom trummor som är i motsatt riktning jämfört med verklig flödesriktning. En sådan risk skulle kunna minimeras/elimineras genom att indata om företeelser för hydrologisk korrigering tydligt anger flödesriktning. För exempelvis vägtrummor skulle information om vilken av ändpunkterna som utgör inlopp och vilken ändpunkt som utgör utlopp vara tillräcklig för att säkerställa rätt flödesriktning.

I projektet har vi enbart arbetat med upplösningen 1 m x 1 m. För en upplösning om 10 m x 10 m är det nödvändigt att anpassa brytgeometrierna till denna upplösning så att effekten av motsvarande hydrologisk korrigering minskas eller försvinner vid representationen av den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen i rasterformat. Brytgeometrier för en vägtrumma anpassade till 1 m x 1 m upplösning behöver ha en bredd på ca 2 m för att vi skall vara säkra att rasterrepresentationen kan fånga upp dessa. För 10 m x 10 m upplösning är det nödvändigt att justera denna bredd för att säkerställa att de hydrologiska korrigeringarna verkligen representeras i höjdmodellsrastret. Om vi bara ser till genereringen av brytgeometrier är det enkelt att anpassa den till 10 m x 10 m med framtagna metod.

Det finns dock några faktorer att undersöka inför en upplösning om 10 m x 10 m för en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell. Den ena handlar om hur brytlinjegeometrierna skall höjdsättas ifrån befintlig markhöjdmodell för att passa in eftersom mycket större förändringar kan ske på 10 m än på 1 m som är utgångspunkten för framställning i 1 m x 1 m upplösning. En annan faktor är hur modellerade flöden genom hydrologiska korrigeringar för vägtrummor i 10 m x 10 m fortsätter när flödena kommer ut från trummorna. Hur väl kan dessa ansluta till de vattendrag som trummorna mynnar ut i om dessa i verkligheten har en bredd om ca 1-2 m? Kommer det vara nödvändigt att skapa kanaler för dessa vattendrag som har en bredd anpassad till upplösningen 10 m x 10 m för att flödena ut från trummorna skall ledas rätt? Dessa frågor, och sannolikt även andra, behöver utredas innan ett beslut tas om ett tillhandahållande i 10 m x 10 m upplösning. En tanke som framkommit i slutfasen på projektet är att införa hydrologiska korrigeringar genom att revidera flödesriktningar i ett flödesriktningslager i stället för att förändra underliggande höjdmodell. Om ett sådant angreppssätt är användbart behöver dock utredas.

Att tillgodose de båda utgångspunkterna om vidareflöde eller ej i anslutning till gropar, sänkor och platta områden innebär i praktiken ett behov av att tillhandahålla dubbla uppsättningar av den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen för varje upplösning, en för varje utgångspunkt. Det är i stort sett rakt på sak att ta fram en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell som inte hanterar sänkor, gropar och platta områden eftersom detta inte kräver ställningstaganden kring metoder för sådan hantering. Att ta fram en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell som ger vidareflöden från sänkor, gropar och platta ytor medför dock ett behov av metodval och en god metodkänedom (se avsnitt 2.6.3). När det sedan gäller framställning av följdprodukter såsom flödesriktningar, flödesackumulation och flödeslinjer ifrån hydrologiskt korrigerade markhöjdmodeller än användares utgångspunkter också viktiga för de metodval som behövs.

2.6.2 Kvalitetsaspekter relaterade till indata för hydrologisk korrigering med avseende på vägtrummor

I avsnitt 2.2.2 tog vi upp fullständighet, god överensstämmelse mellan lokalisering och faktiskt läge, information som belyser hur den hydrologiska korrigeringen skall göras och att undvika felaktigt lokaliserade hydrologiska korrigeringar som viktiga kvalitetsaspekter för indata till en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell. Att genomförda analyser och undersökningar i arbetspaket 2 enbart rör ett delavrinningsområde innebär att det inte är säkert att slutsatser ifrån dessa är generellt tillämpliga. Utifrån erhållna lärdomar ifrån hydrologisk korrigering i delavrinningsområde Svartån skall vi dock ändå ge oss på att formulera vad vi bedömer vara av generell relevans när det gäller ovan nämnda kvalitetsaspekter.

Vi konstaterade i slutet av avsnitt 2.5.3.1 att inlagda hydrologiska korrigeringar saknade betydelse för delavrinningsområde Svartån om vårt enda intresse är att bestämma ackumulerat flöde i områdets utloppspunkt. Kan vi generalisera en sådan slutsats till att gälla alla studerade avrinningsområden? Inte nödvändigtvis. Om en hydrologisk korrigering är så belägen att den medför utflöde ur ett

avrinningsområde på en annan plats än dess utloppspunkt så beror effekten av detta på det ackumulerade flödet som leds igenom den hydrologiska korrigeringen. Om detta flöde är stort i förhållande till det ackumulerade flödet i avrinningsområdets utloppspunkt så skulle en sådan hydrologisk korrigering rimligtvis få en stor betydelse på avrinningsområdesnivå. I sådana fall är det förstås av stor vikt att just denna hydrologiska korrigering motsvarar en verklig företeelse som påverkar vattenflöden, att den är korrekt lokaliserad och att den leder flödet vidare i överensstämmelse med vad som sker i verkligheten.

Det underlag med kända vägtrummor vi använt oss av i delavrinningsområde Svartån består dels av data från en omfattande kartläggning av vägtrummor i Gävleborgs län och dels av data från Trafikverket om vägtrummor längs statliga vägar (se avsnitt 2.3.2). Genom att kombinera data från den omfattande kartläggningen med data från Trafikverket har vi ett underlag med hög grad av fullständighet när det gäller vägtrummor i Gävleborgs län. När det gäller andra delar av Sverige har vi sannolikt inte tillgång till data om vägtrummor med motsvarande fullständighetsgrad. I Länsstyrelsens biotopsdatabaser (se tabell 2) finns enligt uppgift data om vägtrummor, men vi har inte kännedom om hur omfattande eller fullständiga dessa databaser är. Vi känner inte heller till kartläggningar av vägtrummor liknande den i Gävleborgs län inom andra områden.

Om vi skall ta fram en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell med rikstäckning utifrån ett underlag med kartlagda vägtrummor kommer modellens förmåga att representera verkligheten variera mellan olika platser utifrån hur fullständigheten i vägtrummeunderlaget varierar. Utifrån vår studie i delavrinningsområde Svartån kommer variationer i fullständighet när det gäller vägtrummor medföra variationer i hur flödesnät och flödesackumulation på olika platser i flödesnätet överensstämmer med vad ett fullständigt underlag skulle ge. Sannolikt kommer även flödessituationen i områden med låg grad av fullständighet när det gäller vägtrummor också påverka flödessituationen i områden där graden av fullständighet är hög. Att sträva mot en hög grad av fullständighet och en homogen fullständighetssituation i vägtrummeunderlaget för hydrologisk korrigering är därför önskvärt vid framställning av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell.

Att bygga upp en rikstäckande och homogen databas med kartlagda vägtrummor som har hög grad av fullständighet är ett arbete som uppskattningsvis kommer ta tid. Att komplettera befintliga data om vägtrummor med indirekta data genom AI-baserade metoder är då ett sätt att öka fullständigheten i väntan på uppbyggnaden av en sådan databas. AI-baserade metoder för generellt med sig fyra typer av resultat: sant positiva och sant negativa samt falskt positiva och falskt negativa. Sant positiva och sant negativa resultat är önskvärda eftersom dessa överensstämmer med faktiska förekomster och icke-förekomster av vägtrummor i det här fallet. Falskt positiva och falskt negativa resultat är däremot inte önskvärda eftersom dessa ger förekomster av vägtrummor där sådana inte finns (falskt positiva) samt icke-förekomster där sådana faktiskt finns (falskt negativa).

För en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell som bygger på AI-baserade (indirekta) data om vägtrummor är en hög andel sant respektive en låg andel falskt positiva lokaliseringar av vägtrummor viktig ur kvalitetssynpunkt. Utan tillgång till ett referensunderlag kan vi dock inte avgöra vilken resultatkategori en AI-identifierad lokalisering av en vägtrumma tillhör, och därmed inte heller ovanstående andelar. För det underlag med AI-lokaliseringar av vägtrummor vi använt oss av i delavrinningsområde Svartån har vi utifrån det tillgängliga referensunderlaget med 207 kända vägtrummor fler falskt positiva lokaliseringar (267 st) än sant positiva (174 st). Andelen sant positiva lokaliseringar av vägtrummor (174 av 207) kan rimligtvis ses som ett bra resultat. Att vi däremot har ett större antal falskt positiva lokaliseringar än det totala antalet vägtrummor innebär att en majoritet av erhållna lokaliseringar inte motsvarar faktiskt förekommande vägtrummor. Det är då alltså större sannolikhet att en lokaliserad vägtrumma är inkorrekt än att den är korrekt.

Om vi generellt kan förvänta oss att AI-baserade metoder innebär en viss sannolikhet för inkorrekta lokaliseringar för det med sig ett behov av att validera samtliga AI-lokaliserade vägtrummor innan motsvarande hydrologiska korrigeringar inkluderas i en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell. Detta gäller i synnerhet om sannolikheten för inkorrekta lokaliseringar är större än för korrekta. En viktig del i AI-baserad framtagning av indata för hydrologisk korrigering är alltså att tillämpa metoder för validering och eliminering av falskt positiva lokaliseringar.

Sammantaget kommer flödesmönster och flödesackumulation i en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell med hydrologiska korrektioner för vägtrummor påverkas av korrekta, inkorrekta och saknade vägtrummelokaliseringar samt hantering av gropar, sänkor och platta ytor om sådan förekommer (se avsnitt 2.6.3 för en diskussion kring sådan flödesstyrning). Exakt hur bristande fullständighet i data om vägtrummor och felaktigt lokaliserade vägtrummor kommer påverka flödesmönster är svårt att förutsäga utan modellering med den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen där samtliga hydrologiska korrigeringar är inkluderade. Att kvalitetsbrister i indata för hydrologisk korrigering kommer påverka hur ackumulerade flöden sprids i den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen är dock utan tvekan. Detta för i sin tur med sig att flödesackumulation på olika punkter inte nödvändigtvis är representativ för den flödessituation som indata utan felaktigt lokaliserade hydrologiska korrigeringar skulle ge. I dessa icke-representativa fall kan de ackumulerade flöden som passerar vägar där vägtrummor faktiskt finns vara lägre eller högre än vad som skulle vara fallet om hydrologiska korrigeringar för falskt lokaliserade vägtrummor inte fanns inlagda i modellen. Möjligtvis är det mer sannolikt att de icke-representativa ackumulerade flödena kommer vara lägre i större utsträckning än motsatsen då korrigeringar för falskt lokaliserade vägtrummor bidrar till mer utspridda flöden. Det är dock inte givet att det alltid kommer bli så.

För delavrinningsområde Svartån kan vi se att den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodell som representerar det kompletta underlaget med kända vägtrummor (referensmodell HK-INV/TRV) inte ger upphov till vägpasserande flödeslinjer i anslutning till samtliga av dessa. I de allra flesta fall beror detta på att modellerade flöden med denna markhöjdmodell inte leds till de kända trummor där vägpasserande flödeslinjer saknas. Detta är i sig inget märkligt eftersom förekomsten av en trumma på en viss plats inte behöver betyda att en flödesmodellering med en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell (med korrigering för trumman inlagd) kommer leda flöden till trumman.

I vissa fall har vi dock kända trummor där modellerade flöden i referensmodellen leder fram till trummorna utan att väglinjepassager sker fast hydrologiska korrigeringar finns inlagda. För de hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellerna som baserar sig på AI-identifierade vägtrummor ser vi detta i större utsträckning än för referensmodell HK-INV/TRV. Här kan vi exempelvis ha väglinjepassager för referensmodellen men inte för de modeller där AI-identifierade trummor utgör underlaget för hydrologisk korrigering i delavrinningsområde Svartån. För AI-lokaliseringar av vägtrummor som sammanfaller med kända vägtrummor skiljer sig överlag de AI-identifierade trummornas start- och slutpunkter från start- och slutpunkter för motsvarande kända trummor. Detta för i sin tur med sig att de hydrologiska korrigeringarna för de AI-identifierade trummorna skiljer sig från motsvarande korrigeringar i referensmodellen.

Att referensmodellens hydrologiska korrigeringar ger vägpasserande flödeslinjer men inte de hydrologiska korrigeringarna för de AI-identifierade vägtrummorna indikerar två saker. Den ena handlar om att kvaliteten i lokaliseringen av vägtrummas ändpunkter är viktig medan den andra handlar om att den hydrologiska korrigeringen utifrån indata om en vägtrumma behöver anpassas till underliggande höjdmodell. I vårt koncept för framtagning av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell innebär anpassningen till underliggande höjdmodell att bestämma höjder i den brytgeometri som representerar vägtrummor så att flöden leds igenom denna i önskad riktning.

Bristande kvalitet i lokalisering och bristande anpassning till höjdmodell kan båda innebära en hydrologisk korrigering inte ger en passerande flödeslinje vid flödesmodellering. För de fall där vi ser detta i de hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellerna vi tagit fram är det rimligtvis dessa aspekter som ligger bakom. I och med att de hydrologiska korrigeringarna i referensmodellen baseras på ett inmätt underlag är förutsättningarna goda för hydrologiska korrigeringar som ger önskat resultat. De AI-baserade underlagen till hydrologiska korrigeringar utgår däremot från uppskattningar med en enkel modell utifrån ett bestämt område där en vägtrumma sannolikt finns. I och med att dessa uppskattningar är mycket osäkrare än faktiska inmätta data är förutsättningarna sämre för önskat resultat av de hydrologiska korrigeringarna. Framtagning av hydrologiska korrigeringar för vägtrummor av hög kvalitet vinner därför på ett koordinatunderlag som väl representerar trummornas faktiska läge. Anpassningen av hydrologiska korrigeringar till underliggande höjdmodell kan rimligtvis också vinna på kompletterande information som anger flödesriktning genom respektive trumma. De hydrologiska korrigeringarna kan då utformas så att de säkerställer genomflöden med rätt riktning vid flödesmodellering.

2.6.3 Flödesstyrning i relation till gropar och sänkor

För att säkerställa utgångspunkten att flöden inte stannar upp där gropar, sänkor eller platta ytor finns i en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell är det nödvändigt att hantera sådana företeelser. Eftersom meningen med sådan hantering är att leda flöden vidare så kommer den att påverka flödesmönster och flödessituation i en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell. Vid framställning av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell som tillfredsställer en utgångspunkt om att alla flöden skall ledas vidare är det därför viktigt med en god förståelse av vad detta kan föra med sig.

Utifrån den analys vi har gjort i delavrinningsområde Svartån bedömer några faktorer som betydelsefulla för hur flödesstyrning från gropar, sänkor och platta ytor påverkar flödesmönstren i en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell. Den första av dessa handlar om den rumsliga fördelningen av gropar, sänkor och platta ytor, d.v.s. var dessa är belägna, eftersom vidareflöden initieras från dessa punkter. I delavrinningsområde Svartån kan vi se att vi även utan hydrologiska korrigeringar kan få flödeslinjepassager över väg där kända trummor finns när vi tillämpar metoder för vidareflöde från gropar, sänkor och platta ytor. Tyvärr är dock inte sådana metoder att räkna med för att komplettera ett ofullständigt vägtrummeunderlag eftersom förekomsten av gropar och sänkor i anslutning till väg inte nödvändigtvis sammanfaller med vägtrummons lokalisering. I många fall finns gropar och sänkor där de inte behövs (där vägtrummor inte finns) och saknas där de behövs (där vägtrummor finns).

Hur flödesstyrning från gropar, sänkor och platta ytor påverkar flödesmönster beror också på var dessa befinner sig i det flödesnät eller flödesstruktur som underliggande markhöjdmodell skapar. Om en grop är så belägen att den samlar upp flöden från ett stort omgivande område har vidareledningen av det flödet rimligtvis en större inverkan på flödessituationen nedströms än om gropens uppsamlingsområde är mycket mindre. För att få en uppfattning om detta är det nödvändigt att utföra en flödesmodellering och uppskatta det flöde som ackumuleras till varje grop, sänka och platt yta i en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell.

Hydrologiska korrigeringar har även betydelse för det flöde som leds vidare ifrån gropar, sänkor och platta ytor. I delavrinningsområde Svartån kan vi se att ökande fullständighet när det gäller vägtrummor och tillhörande hydrologiska korrigeringar reducerar, i alla fall till en viss nivå, antalet flödeslinjepassager över väg som saknar koppling till kända vägtrummor. En högre grad av fullständighet när det gäller vägtrummor innebär rimligtvis att flöden över vägar i högre grad sker genom motsvarande hydrologiska korrigeringar och därmed minskar antalet vägpassager som är kopplade till förekomst av gropar och sänkor på andra platser vid vägar. Det verkar dock som att det

någonstans finns en gräns när ökning av fullständigheten inte ger någon effekt när det gäller att minska flödeslinjepassage över väg där vägtrummor inte finns.

Hur flödesstyrning i samband med gropar, sänkor och platta ytor sker beror också på metod, verktyg och underliggande höjdmodell. I arbetspaket 2 har vi dels tillämpat genombrytning med verktyget BreachDepressions samt den flödesstyrning som verktyget r.watershed ger när gropar, sänkor och platta ytor förekommer. Bortsett från flödesstyrning över platta ytor ger dessa verktyg överlag snarlika resultat i delavrinningsområde Svartån när det gäller flödesstyrning över väg utan koppling till kända vägtrummor. Det finns dock några fall där flödesstyrningen i anslutning till gropar eller sänkor från BreachDepressions respektive r.watershed skiljer sig från varandra, och detta beror sannolikt på en kombination av de olikheter som finns i de två metodernas arbetssätt och underliggande markhöjdmodell.

En möjlig utmaning med olika metoder för flödesstyrning för vidareflöden vid gropar, sänkor och platta ytor kan vara att dessa lämpar sig olika väl för olika tillämpningar. Inför framställning av en hydrologisk korrigerad markhöjdmodell som implementerar vidareflöde vid gropar, sänkor och platta ytor är därför frågan om metodval för sådan flödesstyrning viktig att få klarhet i från användare.

Slutligen vill vi lyfta att en enda grop eller sänka kan få en betydande påverkan på flödesmönstret i en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell och att en sådan grop inte nödvändigtvis behöver vara lokaliserad i anslutning till en väg. Ett exempel i delavrinningsområde Svartån (se avsnitt 2.5.3.2) är den grop där flödesstyrningen i de verktyg vi använt leder ett biflöde mot en väg i stället för att styra biflödet mot den möjliga alternativa flödesväg som kan ses i höjdmodellen. I kombination med att det råkar vara en vägtrumma med tillhörande hydrologisk korrigering precis där biflödet når vägen får flödesstyrningen genom groppen följden att biflödet möjligtvis tar en helt annan väg än det egentligen skall.

I föregående avsnitt lyfte vi fram att hydrologiska korrigeringar för AI-lokaliserade vägtrummor som inte kan valideras inte skall läggas in i en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell. Om en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell skall tillfredsställa utgångspunkten att flöden inte får stanna upp i gropar, sänkor eller platta ytor är det svårt att förutsäga hur tillhörande flödesstyrning påverkar flödesmönstret. Att undersöka och validera flödesstyrning i samband med gropar, sänkor och platta ytor är därför lika viktigt som att validera AI-lokaliserade vägtrummor för att uppnå representativa flödesmönster från en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell där flöden inte tillåts stanna upp.

För att avslutningsvis sammanfatta deluppdrag 2 så utgör fullständiga och kvalitetssäkrade indata, definierade utgångspunkter för analys och modellering, validerad flödesstyrning vid gropar, sänkor och platta ytor (om vidareflöde skall ske) samt god förståelse för olika metoders funktion och tillämpbarhet nödvändiga förutsättningar för en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell med tillhörande flödesriktningar, flödesackumulation och flödeslinjer som myndighetsgemensamma produkter.

3 Deluppdrag 3 Flödeslinjer i relation till Hydrografi i nätverk

Denna tredje aktivitet handlar om att utreda hur flödeslinjerna skulle kunna bidra till att förbättra kvaliteten i Hydrografi i nätverk (HiN). Dagens HiN är framtagna från datamängden i Topografi 10, som saknar en del av de permanenta vattendragen. De mindre vattendragen i skogsmark kan dessutom ha ett osäkert läge.

I projektet ingår att undersöka hur man kan förbättra geometrin och precisionen i HiN, vilka delar som skulle kunna genereras automatiskt och om samhällets behov uppfylls av en produkt eller om det behövs flera produkter.

3.1 Scenarier

I arbetsgruppen har vi diskuterat fram några olika möjligheter att tillhandahålla den nya datamängden flödeslinjer, i förhållande till den befintliga nedladdningsprodukten inom HiN, d.v.s. Hydrografi Nedladdning.

Vi har då landat i tre olika scenarier som vi undersökt lite närmare och beskriver i följande kapitel:

- En helt integrerad produkt, där flödeslinjerna ingår i HiN.
- En kombiprodukt med två olika teman, HiN och flödeslinjer, där flödeslinjerna har begränsad attributuppsättning och går att koppla ihop med HiN.
- Två helt separata produkter, som inte går att koppla ihop.

3.1.1 Helt integrerad produkt

Detta är en produkt där flödeslinjerna helt ingår i HiN, följer svensk vattenstandard respektive Inspire och har motsvarande attributuppsättning som objekten i HiN. Det skulle således bli en kraftigt utökad hydrografiprodukt jämfört med dagens HiN.

+ Flera hydrobehov tillgodoses i en sammanhållen produkt.

+ Lantmäteriet tillhandahåller EN hydrografiprodukt.

+ Möjlighet till nätverksanalyser även på flödeslinjerna.

– En tung, mycket utrymmeskrävande produkt för användarna att arbeta med. Pixligheten på flödeslinjerna tillsammans med ett högre antal objekt och attribut innebär kraftigt ökade datamängder.

– Mycket stor jobbinsats krävs för att konstruera och infoga alla stomlinjer för att skapa ett nätverk, samt att påföra alla attribut som krävs till flödeslinjerna för att skapa HiN-produkten.

– Användningsområdena kan vara olika för dagens HiN respektive flödeslinjerna, vilket innebär att det är opraktiskt att ha det sammanslaget i en produkt. Många användare har inte behov av flödeslinjerna, utan bara HiN-delen.

– Det är viktigt att vattendragen i HiN är bekräftade, vilket flödeslinjerna till stor del inte kommer att vara, vilket innebär en blandning av säkerställda verkliga objekt och osäkra, i vissa fall falska objekt.

3.1.2 Kombiprodukt

Detta är en produkt där man kan ladda ner HiN och/eller flödeslinjer och man har möjlighet att koppla på flödeslinjerna till HiN. Flödeslinjerna har dock en mindre/annan attributuppsättning än

HiN. Vid en kombiprodukt skulle det även vara möjligt att ha HiN-delen enligt Inspire och en flödeslinjedel som inte följer Inspire. Tanken är att använda flödeslinjerna som indata/facit och justera HiN efter de nya flödeslinjerna.

- + HiN fortsätter ha samma storlek som idag.

- + För de användare som även har behov av mindre och fler vattendrag kan flödeslinjerna kopplas på HiN, vilket borde kunna innebära att man kan göra nätverksanalyser (måste utredas mer).

- + Tydligt vad som är karterat (HiN) och vad som är beräknat (flödeslinjerna).

- Mycket stor jobbinsats att anpassa HiN och flödeslinjerna till varandra geometriskt så att de går att koppla ihop. Mycket stor jobbinsats krävs även för att konstruera och infoga alla stomlinjer för att ansluta flödeslinjerna till HiNs stomlinjer i sjöar och vattendrag.

- Komplicerad ajourhållning då två datamängder ska matchas. Nygenereras flödeslinjerna krävs ny anpassning till HiN om HiN inte är så korrekt att den bränns ned i den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen.

3.1.3 Två helt separata produkter

Detta alternativ skulle innebära två helt frikopplade produkter, HiN och en flödeslinjeprodukt, som inte går att koppla ihop. HiN-produkten fortsätter att vara samma som idag, förutom eventuellt införande av vissa kvalitetshöjande åtgärder som tillrättaläggning av vattendrag och komplettering med nya vattendrag. Flödeslinjerna har en annan attributuppsättning än HiN och geometrierna sammanfaller inte.

- + HiN fortsätter ha samma storlek som idag.

- + Tydligt vad som är karterat (HiN) och vad som är beräknat (flödeslinjerna).

- + Inga resurser krävs för att anpassa produkterna till varandra.

- Två hydrografiprodukter hos samma myndighet, som inte är kompatibla med varandra, vilket kan orsaka viss förvirring.

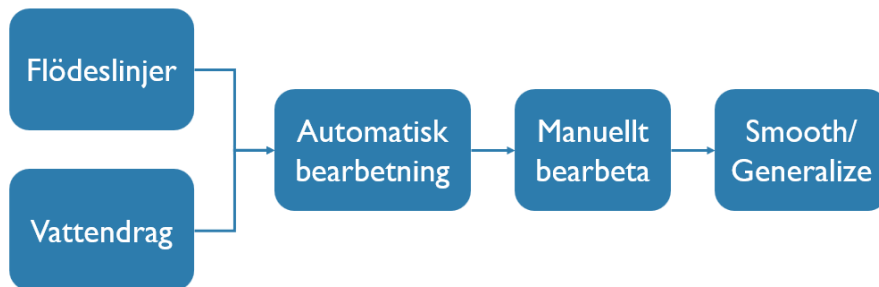
- Begränsade nätverksanalyser på flödeslinjerna.

3.2 Tillrättaläggning av HiN med hjälp av flödeslinjerna enligt kombiprodukten

Baserat på de olika scenariernas olika för- och nackdelar valde arbetsgruppen att titta närmare på kombiprodukten då den sågs som mest flexibel och användbar för olika typer av användare.

Kombiprodukten består av Lantmäteriets HiN-produkt, som innehåller de större vattendragen i kombination med flödeslinjerna. För att detta ska fungera måste vi anpassa HiN med flödeslinjerna så att de hänger ihop. Vi vet även att Lantmäteriets vattendrag ibland ligger fel enligt höjdmodellen och att de på vissa platser kan rinna över kullar m.m. För att få en bild av hur en sådan produkt och hur metoden skulle kunna se ut så har ett test gjorts för att anpassa HiN med flödeslinjerna.

En övergripande process skulle kunna se ut som följande, se figur 3.2.1.



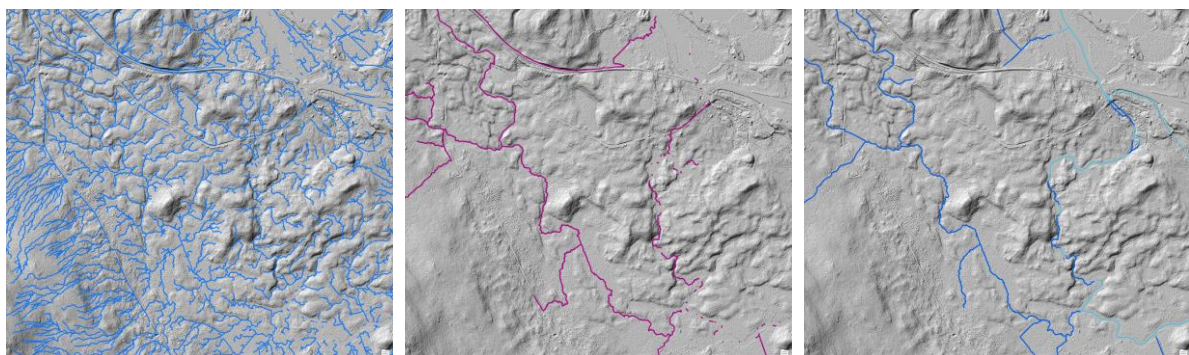
Figur 3.2.1 Process för att anpassa HiN till flödeslinjerna.

Processen går ut på att vi har indata i form av flödeslinjer och de vattendrag som finns i Topografi 10, vilka är en grund till HiN.

I testdata som publicerats av Skogsstyrelsen har flödeslinjerna beräknats fram från den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen. Minsta flödesackumulationen på flödeslinjerna ligger på 1 ha. Detta betyder att flödeslinjerna redovisar mycket små vattendrag och många där det inte förekommer vatten permanent.

Vattendragen som förekommer i HiN är större vattendrag och har ofta en grövre generalisering än flödeslinjerna. Men de bör representera vattendrag som har vatten i sig permanent.

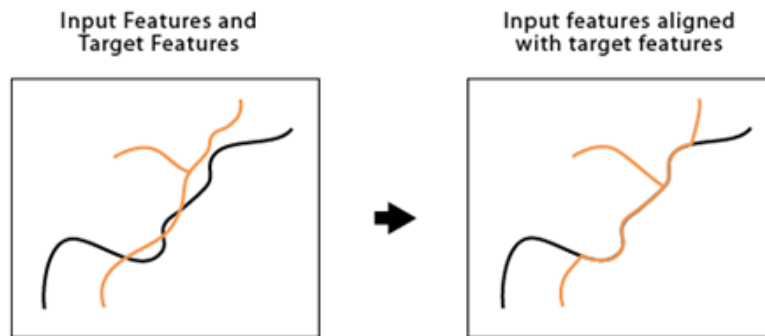
För att enklare kunna passa in HiN med flödeslinjerna så har ett urval gjorts på flödeslinjerna. I testdata har vi endast använt oss av flödeslinjer med större flödesackumulation än 15 ha, se figur 2. I detta område stämde en gräns på 15 ha bäst för att få en så lika bild som möjligt mellan flödeslinjerna och HiN. I andra delar av landet kan andra gränsvärden behöva användas för att få rätt urval från flödeslinjerna. Det varierar beroende på landskapets topografi.



Figur 3.2.2 Till vänster: alla flödeslinjer. I mitten: flödeslinjer med en flödesackumulation på minst 15 ha. Till höger: HiN

3.2.1 Anpassa flödeslinjerna med HiN enligt kombiprodukten.

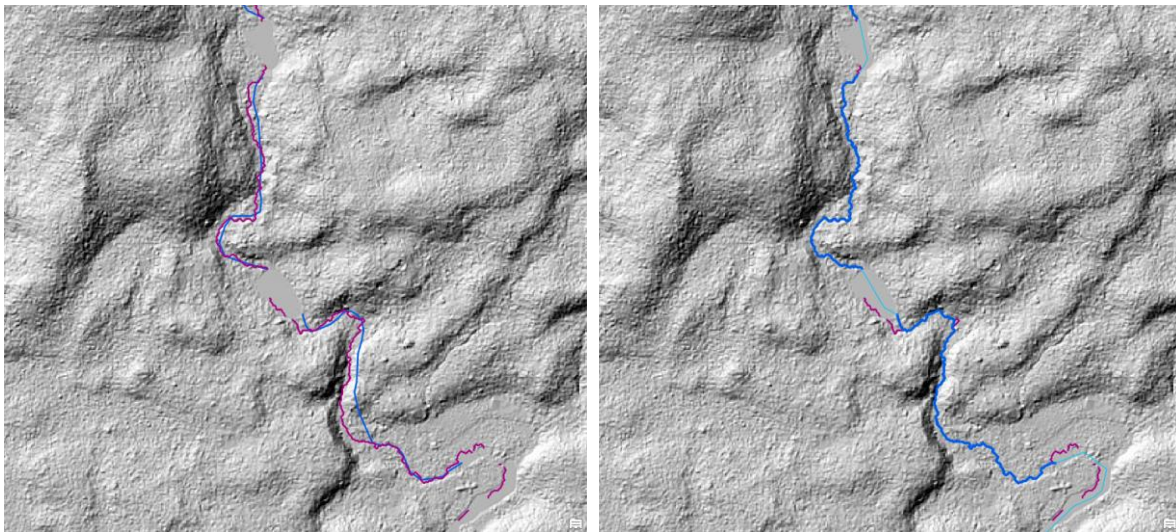
Nästa steg har bestått av att försöka anpassa Lantmäteriets vattendrags geografiska läge till flödeslinjernas läge. Den metod som just nu gett bäst resultat är geobearbetningsverktyget "Align Features", se figur 3.



Figur 1.2.1.1 "Align Features". Källa: Esri (2024).

Efter den automatiska anpassningen så måste vattendragen gås igenom manuellt och anpassas till flödeslinjerna, vilket kan vara ett tidsödande jobb.

Slutresultatet är då vattendrag i HiN som är anpassade till flödeslinjerna, se figur 3.2.1.2. Attributen från HiN har tagits vara på samt att det är möjligt att föra över den information som efterfrågas från flödeslinjerna till vattendragen i HiN så som till exempel flödesackumuleringen.



Figur 3.2.1.2 Lila linje = flödeslinjer; blå linje = HiN. Till vänster: resultat efter den automatiska anpassningen. Till höger: resultat efter manuell anpassning.

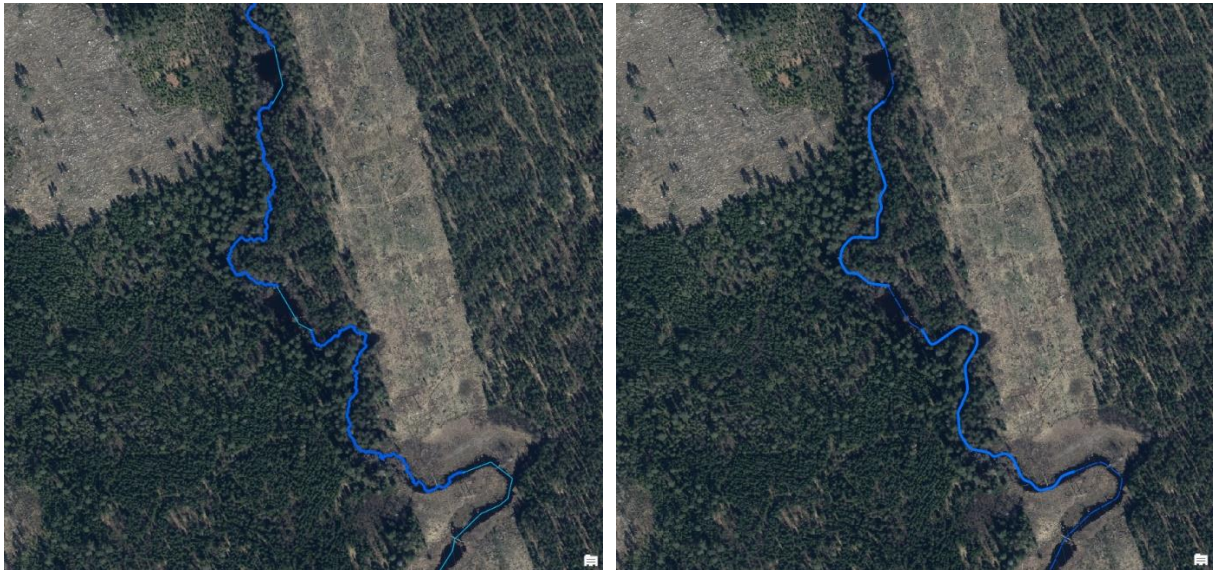
3.2.2 Generalisera vattendragen

Det sista steget handlar om att förfina vattendragen kartografiskt samt att lätta upp datamängden i storlek.

Här vill vi behålla vattendragens karaktär men samtidigt ge en bättre representation av hur ett naturligt vattendrag ser ut och flödar fram i stället för att hoppa från pixel till pixel. Detta moment har vi inte jobbat så mycket med, mer än att vi testat att det går att få till lite mjukare vattendrag.

I figur 3.2.2.1 har vi först generaliserat flödeslinjerna, sedan kört en "smooth" för att få fram en mer kartografisk geometri men ändå behålla vattendragens egenskaper.

Men här finns det mer att titta vidare på och metoden kan utvecklas mer.



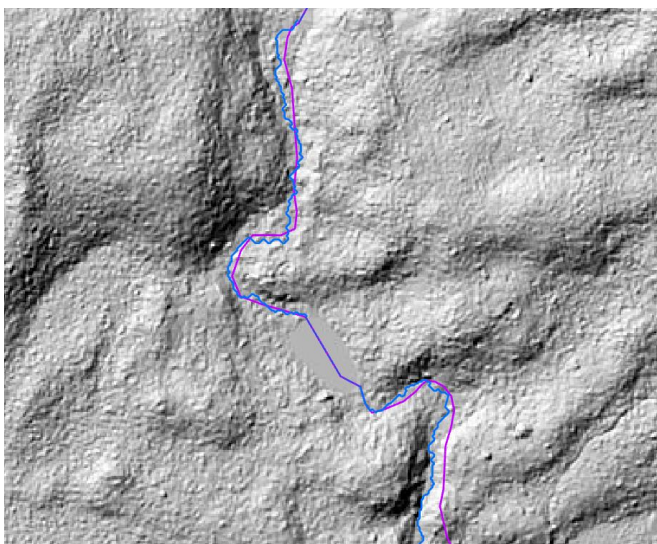
Figur 3.2.2.1 Till vänster: Vattendrag i originalform och anpassade till flödeslinjen. Till höger: Vattendragen efter generalisering.

3.2.3 Resultat av tillrättaläggning av HiN med hjälp av flödeslinjerna

Arbetsgruppens tester visar på att det är möjligt att byta ut geometrin på Lantmäteriets vattendrag mot flödeslinjerna framtagna från den hydrokorrigerade höjdmodellen och samtidigt behålla HiNs attribut.

Dock är metoden inte 100 % automatisk utan innehåller en del manuella steg, vilket gör att utbytet skulle ta tid.

Vi ser också att flödeslinjerna inte alltid stämmer med hur vattendragen går i verkligheten. Så även om vi justerar vattendragen efter flödeslinjerna så kommer de inte bli helt korrekta, även om de största avvikelserna kan justeras.



Figur 3.2.3.1 Lila - vattendraget HiN före anpassningen. Blå - HiN efter anpassningen till flödeslinjerna.

Flödeslinjernas geometrier är för pixliga för att kunna användas rakt av i HiN, de behöver generaliseras/smoothas. Pixligheten innebär betydligt mer noder, vilket ger större filer som gör data otympligt och svårarbetat. Eftersom vattnet inte rinner i sicksack utan tar rakaste vägen inom flodfåran ökar pixligheten längden på linjerna som därför sämre representerar verkligheten. Samtidigt bör en uträtning göras med försiktighet så att linjerepresentationen fortfarande håller sig i bäckfåran, inte ger en för kort längd jämfört med verkligheten och fortfarande hanterar t.ex. meandring korrekt.

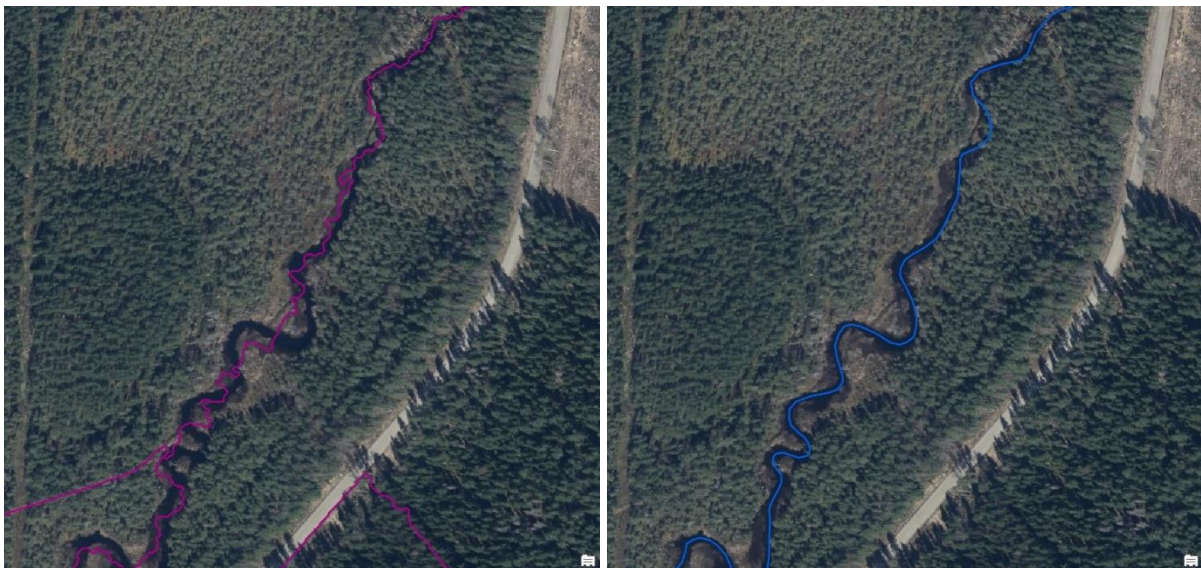
Arbetsgruppen ser i dagsläget inget tydligt sätt att särskilja de flödeslinjer som bör kompletteras i HiN med de flödeslinjer som inte följer de verkliga vattendragen. En flödeslinje kan följa ett vattendrag perfekt för att sedan vika av vid ett "falskt" hinder, se figur 3.2.3.2. Vid den stora byggnaden syns det tydligt att flödeslinjen går på vägen. Viktigt att vattendragen som ingår i HiN är verifierade.



Figur 3.2.3.2 Flödeslinjen som avviker från vattendraget vid den stora byggnaden går tydligt på marken.

Ett annat exempel där flödeslinjerna inte riktigt stämmer med verkligheten är där vattendragen är breda. Flödeslinjerna sicksackar sig fram från strandkant till strandkant och genar över vattendragets meandring.

Jämför man detta med HiN så stämmer HiN bättre med verkligheten, se figur 3.2.3.3.



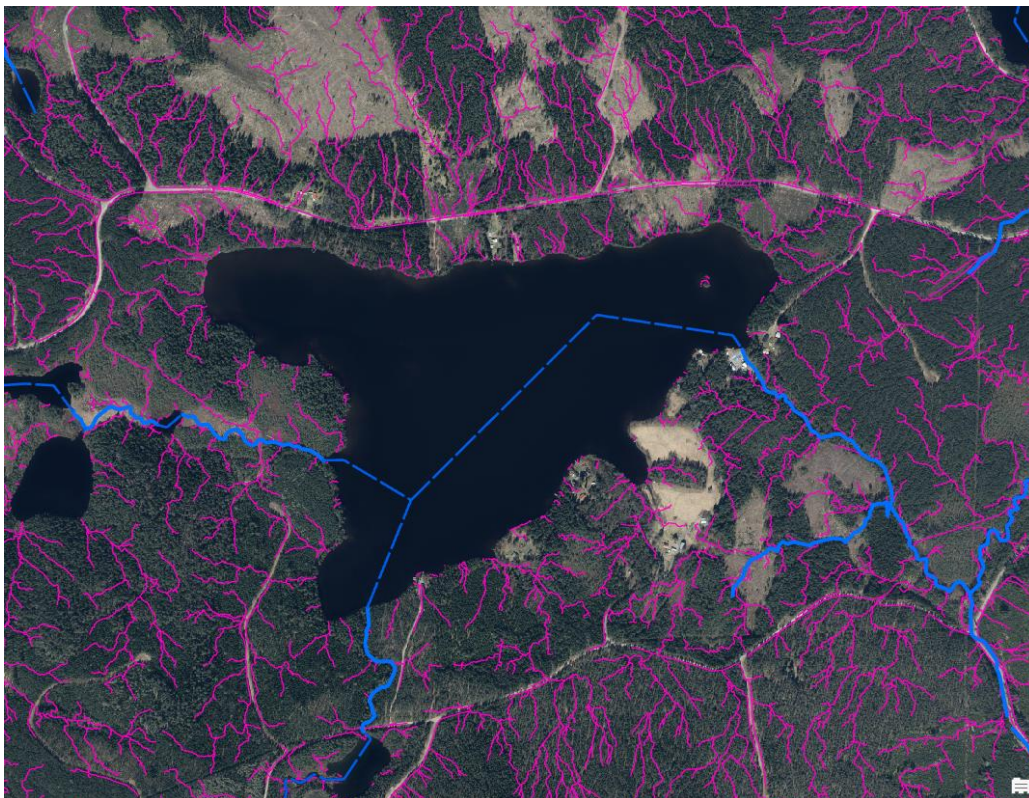
Figur 3.2.3.3 Till vänster: flödeslinje. Till höger: HiN

En begränsning med flödeslinjerna är att de inte kan hantera bifurkationer, (små som stora) där flödeslinjerna endast kan ta en väg, vilket gör att flödeslinjerna kan gena och missa vissa större vattendrag, se figur 3.2.3.4.



Figur 3.2.3.4 Flödeslinjerna klarar inte bifurkationer vilket gör att vissa vattendrag missas.

Hur flödeslinjerna ska kopplas ihop i sjöar till ett nätverk har vi idag ingen bra lösning på.



Figur 2 Flödeslinjer i lila och Vattendrag i blått.

3.3 Diskussion

Flera faktorer gör att vi inte förordar den integrerade produkten. Det blir en tung, mycket utrymmeskrävande produkt för användarna att arbeta med, många användare har dessutom endast behov av de större och säkra vattendragen som finns i dagens HiN. Dessutom blandas här säkra vattendrag med vattendrag som endast kan uppstå vid höga vattenflöden och osäkra/beräknade flöden. Arbetsinsatsen som krävs för att konstruera produkten är dessutom hög.

I kombiprodukten är det tydligt vilka vattendrag som är säkra och vilka som är beräknade. Vill man ha bägge datamängderna kan man koppla på flödeslinjerna till HiN. Det finns dock flera svårigheter som behöver lösas innan produkterna kan användas tillsammans. Produkterna behöver geometriskt anpassas till varandra så att de går att koppla ihop. Ska man kunna göra nätverksanalyser även på de flödeslinjer som kopplas på HiN behöver en lösning på hur det ska byggas upp och fungera tas fram. I nuläget är flödeslinjerna allt för geometriskt inkorrekta för att göra denna geometriska anpassning.

Fram tills dess att HiNs vattendrag är så pass lägeskorrekta att de kan användas som indata vid framtagandet av flödeslinjer, framstår två separata produkter som det rimligaste alternativet. Det viktigaste enligt vår användarundersökning var också att minska lägesosäkerheten i HiN och det minst viktiga var att kunna koppla ihop HiNs nätverk med flödeslinjerna. Oavsett bör vi därför rätta upp HiN efter markhöjdmodellen, i dagsläget finns en hel del brister, som t.ex. vattendrag som rinner längs fjällsidor och över kullar. Att korrigera HiN helt efter flödeslinjerna skulle inte förbättra helheten av HiN i nuläget. En del sträckningar skulle bli bättre medan andra sämre. I början av uppdraget diskuterades hur flödeslinjerna kunde användas för att förtäta nuvarande HiN, men vid användarundersökningen framkom dock inget större sådant behov, se deluppdrag 1.

4 Slutsats och rekommendationer för fortsatt arbete

Projektet har tittat på tre olika delar. Del ett handlar om användarperspektivet hos myndigheter och hur de använder de olika hydrologiska produkterna. Del två utreder metod och koncept för framställning av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell samt indata för korrigering av markhöjdmodellen i form av vägtrummor. Del tre utreder hur flödeslinjer från en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell skulle kunna användas för att förbättra lägesosäkerheten i HiN.

Användningsområdena är många och spridda. Allt ifrån skyfallskartering och nationell kartläggning av vattenförekomster till planeringsunderlag för återskapande av våtmarker. Det kan således vara svårt att tillgodose alla behov i endast en produkt.

Vid intervjuerna framkom att det finns behov av två olika upplösningar, 1 m x 1 m och 10 m x 10 m, där den grövre upplösningen används av vattenförvaltningen (SMHI, HaV, Vattenmyndigheterna m.fl.).

Enligt undersökningen är det viktigast att producera och tillhandahålla en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell och inte dess följdprodukter som flödesackumulation i raster- och vektorformat (flödeslinjer).

En klar majoritet ser en nytta av ett myndighetsgemensamt koncept och samfinansiering av detta koncept. Baserat på det så anser vi att det är aktuellt att utreda en förvaltande organisation och finansiering. För att kunna utreda samfinansiering bör en grov kostnadsuppskattning för framställning, tillgängliggörande och förvaltning tas fram.

Korrekta indata är av stor vikt för de flesta användningsområden men finns inte sammanhållet. Då en förvaltande organisation finns på plats kan man tillsammans komma fram till de lämpligaste indata (kravställning) och därefter arbeta för att gemensamt förbättra indata. Detta tror vi är ett vinnande koncept och till stor nytta för samhället.

Finns en förvaltande organisation så blir det enklare att prioritera de olika kraven och titta på kostnad/nytta vid framställning av produkten/produkterna.

I deluppdrag två har vi tittat på ett koncept som kompletterar Lantmäteriets befintliga infrastruktur och data för framställning av ordinarie markhöjdmodell med brytgeometrier utifrån indata om hydrologiska korrigeringar. Utformning och höjdsättning av brytgeometrierna är viktig för att den hydrologiskt korrigerade markhöjdmodellen skall ge flöden och flödesriktningar som överensstämmer med verkliga flöden i och genom inlagda företeelser för hydrologisk korrigering. För exempelvis vägtrummor skulle detta underlättas av information om vilken ände som utgör inlopp och vilken ände som utgör utlopp.

Vår utvärdering av indata för hydrologisk korrigering gällande vägtrummor belyser att lägesnoggrannhet och fullständighet utgör förutsättningar för en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell av hög kvalitet. Att bygga upp en rikstäckande databas med företeelser för hydrologisk korrigering är därför av stor vikt, och ett sådant arbete bör också säkerställa att den information som behövs för korrekta flödesriktningar i dessa korrigeringar finns. När det gäller AI-baserade indata och andra indirekta datakällor så kan dessa utgöra ett komplement till faktiska data under förutsättning att sådana data kan valideras och uteslutas om de inte skulle representera verkliga företeelser.

När det gäller flödesriktningar, flödesackumulation och flödeslinjer är användares utgångspunkter samt metodval betydelsefulla för resultaten. För en utgångspunkt, att vatten alltid skall flöda vidare,

visar vår utvärdering att flera faktorer är viktiga att beakta vid hantering av gropar, sänkor och platta ytor. Generellt bör all flödesstyrning som vidareflöden ifrån gropar, sänkor och platta ytor medför valideras för att säkerställa att fall som ger en betydande påverkan på erhållna flödesmönster är rimliga utifrån sannolika flödesvägar och att signifikanta flöden inte leds fel väg. För att kunna tillhandahålla en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell som tillfredsställer ett krav om vidareflöde ifrån gropar, sänkor och platta ytor är det nödvändigt att utreda lämpligt metodval för associerad flödesstyrning utifrån användares utgångspunkter och säkerställa att användare och producent har god förståelse för olika metoders funktion samt för- och nackdelar. Utöver det är det också nödvändigt att utreda hur den flödesstyrning som olika metoder för att hantera gropar, sänkor och platta ytor ger skall valideras.

För att kunna förbättra lägesosäkerheten i HiN så bör vi veta hur vi vill att HiN och flödeslinjerna ska förhålla sig till varandra. Så i deluppdrag tre har arbetsgruppen diskuterat fram tre scenarier:

- En helt integrerad produkt, där flödeslinjerna ingår i HiN.
- En kombiprodukt med två olika teman, HiN och Flödeslinjer, där flödeslinjerna har begränsad attributuppsättning och går att koppla ihop med HiN.
- Två helt separata produkter, som inte går att koppla ihop.

Om man ser till de olika produktscenarierna, så är kombiprodukten praktisk och flexibel. Det finns dock flera svårigheter som behöver lösas innan produkterna kan användas tillsammans. Fram till dess att HiN:s vattendrag är så pass lägeskorrekta att de kan användas som indata vid framtagandet av flödeslinjer, framstår två separata produkter som det rimligaste alternativet om man skulle göra ett tillhandahållande av flödeslinjerna idag.

Testerna i deluppdrag tre har visat att vissa metoder för att korrigera markhöjdmodellen, så som genombrytningarna, har givit felaktiga resultat och att anpassa vattendragen mot flödeslinjerna i vissa fall kan försämra det verkliga läget. Detta gör att helheten i HiN inte kommer att förbättras om en sådan anpassning görs. Förslagsvis bör man först minska lägesosäkerheten i HiN så att den eventuellt kan användas som indata till en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell och därefter återigen utreda koppling till HiN.

Sammanfattningsvis har vi i deluppdrag 1 sett att användare prioriterar en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell före produkter såsom flödesriktningar, flödesackumulation och flödeslinjer. Deluppdrag 1 visar även på att tillämpningar såsom nationell kartläggning av vattenförekomster och skyfallskartering har olika utgångspunkter när det gäller huruvida vatten skall kunna flöda vidare eller ej i en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell. Från deluppdrag 2 drar vi slutsatsen att det är nödvändigt att utreda lämplig metod för att tillfredsställa en utgångspunkt om vidareflöde då flödesstyrning i samband med gropar, sänkor och platta ytor kan ge betydande effekter på erhållna flödesmönster. Deluppdrag 3 visar även att den flödesstyrning som tillämpning av genombrytning medför kan orsaka att flödeslinjer avviker från den faktiska sträckningen för vattendrag. Sammantaget förordar därför Lantmäteriets arbetsgrupp att till en början fokusera på framställningen av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell som inte hanterar gropar, sänkor och platta ytor och att tills vidare avvakta med följdprodukterna flödesriktningar, flödesackumulation och flödeslinjer då dessa är beroende av metodval och utgångspunkter för analys och modellering.

Rekommendationer för fortsatt arbete i samverkan:

- Fokusera på framställning och tillhandahållande av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell (ej följdprodukter som flödeslinjer)

- Metod för att tillhandahålla och lagra två upplösningar, 1 m x 1 m samt 10 m x 10 m
- Fortsatta utredningar kring indata och metod:
 - Bygga upp gemensam databas för väg- och järnvägstrummor med de data som behövs för att motsvarande hydrologiska korrigeringar skall ge flöden i korrekt riktning genom trummorna.
 - Utredda föreslagna indata från användarna.
 - Utredda och komma fram till gemensamma utgångspunkter och metodval för eventuell framtida framtagning av flödesackumulation och flödeslinjer.

Rekommendationer för fortsatt arbete på Lantmäteriet:

- Minska lägesosäkerheten i HiN
- Utredda förvaltande organisation och samfinansiering mellan myndigheter
- Grov kostnadsuppskattning för framställning, tillhandahållande och förvaltning av en hydrologiskt korrigerad markhöjdmodell.

5 Referenser

Esri (2024). Align Features (Editing). <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/editing/align-features.htm> [Hämtad: 2024-12-18]

Metz, M., Mitasova, H. & Harmon, R. S. (2011). Efficient extraction of drainage networks from massive, radar-based elevation models with least cost path search. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 667–678. <https://doi:10.5194/hess-15-667-2011>

Lidberg, W., Nilsson, M., Lundmark, T. & Ågren, A. M. (2017). Evaluating preprocessing methods of digital elevation models for hydrological modelling. *Hydrological Processes*, 31, 4660–4668. <https://doi.org/10.1002/hyp.11385>

Lidberg, William (2025). Deep learning-enhanced detection of road culverts in high-resolution digital elevation models: Improving stream network accuracy in Sweden. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 57, 102148. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.102148>