

Kvalitetsbeskrivning och kvalitetspåverkande faktorer vid produktion av TIN-modeller

Axel Andersson

Civilingenjörsutbildningen i Lantmäteri
Lunds Tekniska Högskola

Institutionen för Naturgeografi och Ekosystemvetenskap
Lunds Universitet





LUNDS UNIVERSITET
Lunds Tekniska Högskola

Kvalitetsbeskrivning och kvalitetspåverkande faktorer vid produktion av TIN-modeller

EXTM05 Master uppsats, 30 hp
Civilingenjörsutbildningen i Lantmäteri

Axel Andersson

Handledare:

Lars Harrie

Institutionen för naturgeografi och Ekosystemvetenskap

Maj 22, 2024

Opponent: Hanna Lundström

Examinator: Petter Pilesjö

Copyright © Axel Andersson, LTH

Institutionen för Naturgeografi och Ekosystemvetenskap
Lunds Universitet
Sölvegatan 12
223 62 Lund

Telefon: 046-222 30 30

Fax: 046-222 03 21

Hemsida: <http://www.nateko.lu.se>

Examensarbete i geografisk informationsteknik nr 37

Tryckt av E-tryck, E-huset, 2024

Abstract

During recent years there has been great development in the technology used to gather elevation data over large areas with laser scanners. Increased usage of elevation data in society as well as work processes being developed simultaneously at different places implies a need for uniform data management. In discussions regarding elevation data quality, the main issues are often quality in source data or the finished elevation model. Less attention is however given to what happens in the production process of elevation models.

This thesis project aims to investigate how quality in triangulated elevation models, TIN-models, should be described. Furthermore, what quality affecting factors exist in the production process and their effects is researched. Lastly, this thesis studies if specifications for data sets like point clouds and break geometries affect the quality of TIN-models.

The report begins with a literature review to establish central terms and concepts. The research questions are then studied by conducting an interview study as well as case studies. In the interview study people that use TIN-models are interviewed about their usage and quality demands of TIN-models. The interviews indicate that data reduction is an important factor to optimize production of TIN-models and afterwards have TIN-models small enough to manage.

In the case studies the effects of data reduction, which appeared as an important factor in the production process, are studied. In addition, the effects of using break geometries are evaluated. The case studies show that, depending on different factors, large parts of the original data sets can be reduced. In some cases, less than 1 % of original dataset is needed for creating acceptable TIN-models. Use of break geometries can also allow for further data reduction if they are well placed and well produced.

Towards the end of the report the results are discussed and conclusions are drawn. It is discussed how quality of TIN-models can be described. Additionally, it is discussed how data reduction and other parameters in source data and production process affect the quality of the final TIN-model.

Sammanfattning

Under de senaste åren har det skett stor utveckling inom teknologin för att samla in höjddata över stora markområden med bland annat laserskanner. En ökad användning av höjddata i samhället kombinerat med att arbetsprocesser utvecklats av olika aktörer innebär ett behov av enhetlig datahantering. I diskussioner om kvalitet på höjddata talas ofta om kvalitet med avseende på insamlade data och på slutlig produkt. Mindre fokus har däremot lagts på vad som händer under själva produktionsprocessen.

Detta arbete syftar till att utreda hur kvalitet i triangulerade höjdmodeller, TIN-modeller, ska beskrivas. Dessutom utreds vilka kvalitetspåverkande faktorer som finns i produktionsprocessen och deras effekter. Slutligen utreds hur specifikationer om datamängder som punktmoln och brytgeometrier påverkar kvaliteten i TIN-modeller.

Rapporten inleds med en litteraturoversikt för att etablera centrala begrepp och koncept. Arbetets frågeställningar utreds därefter genom en intervjustudie och fallstudier. I intervjufasen intervjuas personer som använder TIN om deras användning och krav på TIN-modeller. Intervjuerna pekar på att datareduktion är en viktig faktor för att effektivisera produktionen av TIN-modellen och sedan ha en modell som är liten nog att hantera.

I fallstudierna studeras effekten av datareduktion, som framkom i intervjuerna som en viktig faktor i produktionsprocessen. Dessutom studeras effekten av användning av brytgeometrier. Fallstudierna visar att beroende på olika faktorer kan stora delar av den ursprungliga datamängden reduceras bort. I vissa fall räcker det med 1 % av den ursprungliga datamängden för att skapa acceptabla TIN-modeller. Användande av brytgeometrier kan även möjliggöra ytterligare datareduktion om de är välplacerade och väl inmätta.

I slutet av rapporten diskuteras resultaten och slutsatser dras. Närmare bestämt diskuteras hur kvalitet av TIN-modeller kan beskrivas. Dessutom diskuteras det hur datareduktion och andra parametrar i indata och produktionsprocessen av TIN-modeller påverkar den slutliga kvaliteten.

Förord

Denna rapport utgör resultatet av det examensarbete inom geografisk informationsteknik som avslutar civilingenjörsprogrammet i Lantmäteri på Lunds Tekniska Högskola, LTH. Examensarbetet omfattar 30 högskolepoäng och har genomförts under våren 2024 i samarbete med avdelningen för Information, Strategi och Samordning på Tyréns.

Ett stort tack ska först och främst riktas till Lars Harrie som genom sitt handledningsarbete givit otaliga goda råd och förslag under arbetets gång. Som den största dörröppnaren under arbetets gång från idé till färdigt arbete går hans bidrag inte att underskatta.

Tack ska även riktas till Johan Larsson Wallin som i rollen som handledare på Tyréns givit många tips och förslag och hjälpt till att etablera flera viktiga kontakter. Tack även till Pär Hagberg som kommit med många förbättringsförslag under resans gång. Er stora hjälp med att etablera kontakter inför intervjuerna och stöttning under skrivandet av denna rapport var till stor hjälp.

Tack till alla personer som ställde upp på intervjuer samt Peter Axelsson som även avsatte tid för ett samtal.

Tack till resten av avdelningen på Tyréns för sällskapet och stöttningen under arbetets gång.

Tack till alla kursare, vänner, nära och kära för fem fantastiska år i Lund.

Maj 2024

Axel Andersson

Innehållsförteckning

Del I. Inledning	1
1. Introduktion.....	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Problemformulering	2
1.3 Syfte och forskningsfrågeställningar	3
1.4 Övergripande metod.....	3
1.5 Avgränsningar	4
1.6 Disposition	4
Del II. Litteraturoversikt	5
2. Grundläggande begrepp.....	5
2.1 Punktmoln	5
2.2 TIN-modeller	8
2.3 Brytgeometrier.....	10
3. Produktionsmetoder.....	12
3.1 Filtrering av markpunkter.....	12
3.2 Datareduktion	13
3.3 Trianguleringsmetoder	14
4. Nationella specifikationer för storskaliga geodata	16
4.1 Punktmoln	17
4.2 Brytgeometrier.....	17
4.3 GRID.....	17
5. Kvalitetsbegrepp.....	18
5.1 Kvalitetsdefinitioner	18
5.2 Kvalitet på indata.....	18
5.3 Kvalitet på slutprodukt.....	20
5.4 Kvalitet i produktionsprocessen	21
5.5 Kvalitetsutvärderingsmetoder.....	22
6. Kvalitetspåverkande faktorer	23
6.1 Lägesosäkerhet	23
6.2 Datareduktion	24
6.3 Brytgeometrier.....	25

Del III. Intervjuer och fallstudie	26
7. Intervjuer.....	26
7.1 Metod – urval av intervjupersoner.....	26
7.2 Intervjuformat.....	26
7.3 Resultat.....	27
8. Fallstudier	30
8.1 Erfarenhet från litteraturöversikt & intervjuer	30
8.2 Val av fallstudier.....	32
8.3 Data och studieområde.....	32
8.4 Metod	36
8.5 Resultat.....	41
Del IV. Diskussion & Slutsatser	53
9. Diskussion.....	53
9.1 Kvalitetsbeskrivning av TIN-modeller	53
9.2 Diskussion om resultat av fallstudie	55
10. Slutsatser	58
Litteraturförteckning.....	59
Appendix.....	1
Appendix A. Informationsutbytesmodeller	1
A.1 Punktmoln	1
A.2 Brytlinjer	2
Appendix B. Intervjusammanfattningar	3
B.1 3D-utvecklare, Malmö Stad.....	3
B.2 3D-visualiserare, Tyréns	4
B.3 Mättekniker, Tyréns.....	4
B.4 Produktionsutvecklare, Lantmäteriet	5
B.5 Projektör, Väg, Gata & Mark, Tyréns.....	6
B.6 Vattenutredare 1, Tyréns	7
B.7 Vattenutredare 2, Tyréns	8
Appendix C. FME-Skript.....	10
C.1 Klipper ut punktmolnet – Malmö	10

C.2 Höjdsättning av brytgeometrier – Malmö	10
C.3 Koordinatkonvertering – Örkelljunga.....	10
C.4 Klipper ut punktmolnet - Örkelljunga.....	11
C.5 Filtrera brytgeometrier - Örkelljunga.....	11
C.6 Generera TIN-modellen	12
C.7 Utvärdering av TIN-modellen och skriva resultat	13
C.8 Förälderkrift	14
Appendix D. Fallstudieresultat.....	15
D.1 Resultat – Malmö.....	15
D.2 Resultat – Örkelljunga	20

Del I. Inledning

1. Introduktion

1.1 Bakgrund

Idag digitaliseras samhället i en mycket snabb takt. Utveckling inom digital hantering av geografisk information är därför något som etablerat sig som ett intressant ämne för flera aktörer inom samhällsbyggnadssektorn. Att hantera geografisk information digitalt möjliggör för breda applikationer som använder stora mängder data på ett sätt som analog hantering inte tillåter. Geografiska informationssystem (GIS) används i stor utsträckning för att göra beräkningar men även för att visualisera såväl dåtid och nutid som framtid inom samhällsbyggnadssektorn. Den breda applikationen gör teknologin attraktiv för både privata och offentliga aktörer som ofta arbetar enskilt med att utveckla sina egna GIS-lösningar.

Höjdmodeller är en typ av geodata som används för att beskriva ett områdes topografi (terräng), vilket i sin tur är intressant inom flera olika användningsområden kopplade till markanvändning. Exempel på användningsområden är studier av hydrologiska aspekter inom jord- och skogsbruk, skyfallsanalyser vid riskhantering samt regional planering för exempelvis exploatering (Pilesjö, Eklundh, Lindberg, Larsson & Guldåker 2020). Triangulated Irregular Network (TIN) är ett vanligt sätt att representera höjddata, antingen som slutprodukt eller som ett steg på vägen för att till exempel bilda raster-modeller (GRID). Modellen bildas genom att triangulera nodpunkter för att bilda ett vektorlager bestående av icke-överlappande trianglar. TIN-modeller lämpar sig för att modellera ytor inmätta med låg mätosäkerhet. Eftersom trianglarna i modellen har olika storlek (är irreguljära) kan de både vara generella och specifika i samma modell beroende på lokala behov, exempelvis är små trianglar bra vid heterogen terräng med tar upp onödigt lagringskapacitet om de beskriver homogen terräng (Vivoni, Ivanov, Bras & Entekhabi 2004). TIN-modellens uppbyggnad gör att det går att genomföra relativt snabba och lagringsmässigt billiga beräkningar. Dock förloras information mellan trianglarnas hörnpunkter vilken ersätts med interpolering mellan dessa hörnpunkter. Därav bör punkter som är signifikanta för modellering av området användas som hörnpunkter och inte ersättas av interpolering (Vivoni et al. 2004).

Datan för höjdmodeller samlas vanligen in genom flygburen laserskanning eller flygfotografier, men terrester laserskanning kan också göras, och lagras sedan i punktmoln (Vosselman & Maas 2010). Laserskannrar är relativt lättillgängliga på marknaden och så är även diverse program för processering av datan för att skapa punktmoln. Eftersom punktmolnen generellt håller hög kvalitet kan de produceras i fler syften än för att användas till höjdmodeller såsom 3D-stadsmodeller, skogsförvaltning samt dokumentation och kartläggning av kulturhistoriskt viktiga områden (Vosselman & Maas 2010).

Det finns en del svensk dokumentation och riktlinjer för hantering av höjdmodeller. Lantmäteriets Handböcker i mät- och kartfrågor (HMK) innehåller standarder och anvisningar

för upphandling, beställning, insamling, hantering och leverans av geodata (Lantmäteriet u.å.a). Nyligen lanserades handboken *HMK-Höjdmodell 2023* som bl.a. beskriver hur höjdmodeller inklusive TIN-modeller ska upphandlas och levereras. Handbokens instruktioner avseende kontroll av höjdmodeller innebär antingen en visuell kontroll i programmet eller jämförelse med en höjdmodell med lägre lägesosäkerhet, antingen över hela området eller genom stickprov (Lantmäteriet 2023).

Behovet av heltäckande specifikationer är av nationell vikt. Lokala skillnader i arbetssätt mellan exempelvis kommuner gör det svårt för aktörer som verkar över flera administrativa enheter såsom regioner, statliga myndigheter och större samhällsbyggnadsbolag (Smartbuilt u.å.). Därav har Lantmäteriet erhållit regeringsuppdraget *Smartare samhällsbyggnadsprocess* som syftar till att etablera en nationell infrastruktur för standardiserade datamängder för geodata (Smartbuilt u.å.). För att etablera infrastrukturen krävs enhetliga specifikationer för geodata och flera parallella initiativ pågår för detta. Ett av dessa initiativ är projektet *Nationella specifikationer för storskaliga geodata* (hädanefter kallat NS-projektet). Projektet syftar främst till att ta fram nationella specifikationer för höjddata. Inom detta tema behandlas främst hantering av laserpunktmoln, brytgeometrier och GRID-modeller.

Punktmolnen skapas av till exempel flygburen laserskanning. Brytgeometrier är viktiga strukturer som är önskvärda att bevara i detalj såsom exempelvis vägkanter eller broar. De fungerar som ett skelett för modellen samt en länk mellan 2D- och 3D-objekt i geodatabas och höjdmodell. GRID-modeller är också ett vanligt format att lagra höjdmodeller förutom TIN-modeller. I ett GRID lagras höjddata i ett rasterformat vilket är ett vanligt format för kontinuerliga data såsom höjddata. Det är effektivt men nackdelen är att prestandan blir beroende av upplösningen.

Detta examensarbete görs i samarbete med samhällsbyggnadsföretaget Tyréns som är en av aktörerna som deltar i NS-projektet. Tyréns agerar ofta som konsult i samhällsbyggnadsprojekt av varierande storlek och i olika roller. Det ligger därför i deras intresse att geodata hanteras enhetligt. Medarbetare på Tyréns är delaktiga i de initiativ som bedrivs inom *Smartare samhällsbyggnadsprocess* och de arbetar mycket med höjdinformation.

1.2 Problemformulering

Höjdmodeller utgör inte sällan viktiga beslutsunderlag inom samhällsbyggnadssektorn. Den breda applikationen innebär även ett brett spektrum av behov när det kommer till kvalitet. Det går alltså inte nödvändigtvis att beskriva en modell som bättre än en annan oberoende av modellernas användningsområde. Behovet av att redovisa kvalitet kvarstår dock fortfarande och produktionsprocessen innehåller flera viktiga steg som kan utföras på olika sätt. Därför finns det ett behov av att kunna redovisa kvalitetsaspekter i processen att skapa höjdmodeller, dvs. inte endast genom att ange kvalitet på indata och slutprodukt.

Kvalitetskontroller av framtagna höjdmodeller kan göras i samband med slutet av produktionsprocessen men det är inte givet vilka metoder som ska tillämpas. *HMK-Höjdmodell 2023* nämner tre fördjupande kontroller som kan göras på den slutliga modellen. Ett sätt är att visuellt inspektera delar av modellen som kan tänkas vara svåra för modelleringsalgoritmen att

modellera korrekt. De två andra sätten som nämns är att antingen genom stickprov eller test över hela modellen, jämföra gentemot en annan höjdmodell med en känd, lägre osäkerhet. Dessa kontrollmetoder är däremot inte alltid lämpliga att förlita sig på. Den första utvärderingsmetoden bygger på kompetens hos inspektören och är svår att utvärdera matematiskt. De andra metoderna förlitar sig på att det redan finns en bättre modell (eller i alla fall bättre inmätta punkter) för en del av arbetsområdet vilket det inte alltid går att förlita sig på att det ska finnas.

Kvalitet i indata är relativt enkelt att erhålla i samband med datainsamlingar och mätningar. Kvalitet i slutprodukt och även i arbetsprocessen är emellertid mer komplicerat, dels att erhålla men även att genomföra kontroller av kvalitetsdata. Med detta i åtanke är det intressant att titta på kvalitetspåverkande faktorer som finns i produktionsprocessen för höjdmodeller. Det är relevant att kvalitetsaspekten följer med i såväl produktionsprocessen som i insamling av data och presentation av slutprodukten. I detta finns det flera aspekter, både hur indatans egenskaper påverkar arbetsprocessen och hur attribut i arbetsprocessen påverkar slutprodukten.

HMK-handböckerna innehåller visserligen riktlinjer för hur kvalitetsfrågan ska hanteras men de fokuserar främst på datainsamling och kvalitetskrav från beställarens perspektiv. Det finns en del kontrollmetoder som genomföraren av uppdraget kan hänvisa till vid kontroll av slutprodukt men dessa är begränsade. Det saknas även bra dokumentation angående kvalitetspåverkande faktorer i processen, eller hänvisning till sådana.

1.3 Syfte och forskningsfrågeställningar

Arbetets syfte är att undersöka och utreda kvalitetspåverkande faktorer i processen för att producera TIN-modeller från punktmoln samt hur dessa faktorer påverkar kvaliteten av TIN-modellen. En viktig faktor som utreds är användandet av brytgeometrier. För att utvärdera kvalitetspåverkande faktorer måste produktionsmetoder och även kvalitetsbeskrivning utredas och bestämmas.

Utifrån syftet besvaras följande frågeställningar:

- Hur ska TIN-modellers kvalitet beskrivas?
- Vilka kvalitetspåverkande faktorer finns i produktionsprocessen av TIN-modeller skapade från punktmoln och brytlinjer?
- Vilken kvalitet kan förväntas av en TIN-modell beroende på indata, algoritm och parametrar?
- Vilken påverkan har NS-projektet på produktionsprocessen och kvalitetsfrågan för TIN-modeller?

1.4 Övergripande metod

Arbetsgången är uppdelad i tre steg. Det första steget är att etablera en litteraturöversikt som etablerar och förklarar berörda koncept. I framtagandet av litteraturöversikten eftersökes forskningsartiklar, handböcker och annan litteratur som verkar som ramverk för det fortsatta arbetet. Litteraturöversikten utgör därefter underlag för intervjuerna. I intervjuerna tillfrågas

aktörer i samhällsbyggnadsbranschen som använder TIN-modeller i sitt vardagliga arbete. Syftet är att fördjupa kunskapen utöver litteraturöversikten ur ett användarsammanhang. Intervjuerna används sedan i kombination med litteraturöversikten för att utgöra underlag för de praktiska fallstudierna. I fallstudierna produceras flera TIN-modeller med olika produktionsmetoder och kvalitetspåverkande parametrar.

Kvalitetsmått bestäms så att de är relevanta och kan fungera som verktyg för att redovisa TIN-modellens kvalitet vid leverans. Slutligen studeras NS-projektets påverkan på produktionsprocessen och används som referens vid övriga delar av arbetet.

1.5 Avgränsningar

Detta arbete fokuserar på några av de mest vedertagna metoderna för produktion av TIN-modeller utifrån laserskannade data. Punktmoln som skapats genom exempelvis flygfotografering behandlas inte i detta arbete. Extra fokus läggs på data som skapats genom flygburen laserskanning och arbetet undersöker inte hur insamling genom terrester laserskanning påverkar modellens kvalitet. Litteraturöversikten tar upp flera kvalitetspåverkande faktorer. Det som emellertid utreds är effekten datareduktion och användandet av brytgeometrier har på lägesosäkerheten i höjd. Andra kvalitetspåverkande faktorer som nämns men inte utreds vidare är exempelvis val av trianguleringsmetod.

1.6 Disposition

Rapporten består av fyra delar: Inledning, litteraturöversikt, genomförande och resultat av intervjuer och fallstudier samt diskussion och slutsatser. Inledningen består av det första kapitlet som är introduktionen. Introduktionen presenterar arbetets grundläggande förutsättningar såsom bakgrund, syfte och förevarande punkt. Introduktionen innehåller även en övergripande metodbeskrivning som förklarar litteraturöversikten, intervjuer och fallstudie övergripande. Mer detaljerade metodbeskrivningar finns i respektive kapitel.

Litteraturöversikten är den andra delen av rapporten. Den redogör för aktuell litteratur och består av fyra kapitel. Det första beskriver grundläggande begrepp såsom punktmoln och TIN-modeller. Det tredje beskriver även viktiga produktionsmetoder. I nästkommande kapitel kopplas NS-projektet till arbetet. Här presenteras vad projektgruppen producerat och bestämt hittills. Efterföljande kapitel hanterar definition av kvalitetsbegreppet vilket krävs för att utvärdera resultaten från fallstudien. Det sista kapitlet i litteraturöversikten hanterar kvalitetspåverkande faktorer i produktionsprocessen

Genomförandebeskrivning samt resultaten från intervjuer och fallstudier är den tredje delen av arbetet. Först beskrivs genomförandet och resultat av intervjustudien. Detta följs sedan upp av bakgrund, metod och resultat av fallstudierna. I den fjärde och sista delen diskuteras resultaten och slutsatser dras. Återkoppling görs till arbetets syfte och frågeställningar.

Del II. Litteraturoversikt

2. Grundläggande begrepp

2.1 Punktmoln

Punktmoln är ett utbrett sätt att lagra 3-dimensionella data. Det lagrar data i ett 3-dimensionellt punktformat vilket har sina fördelar med bevarande av data men är mer svår att använda för beräkningar och analyser. För det kan andra format vara lämpliga.

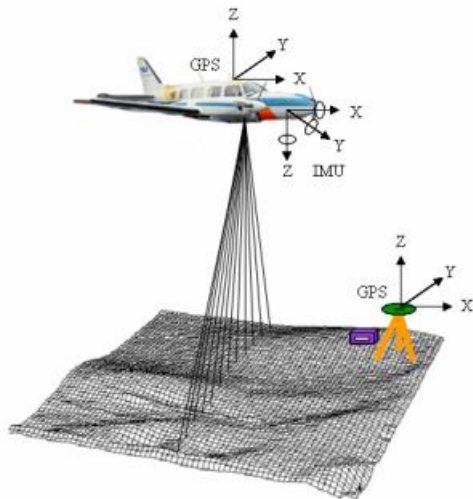
Punktmoln är ett vanligt format att visualisera insamlad data från exempelvis laserskanning, som ofta används för att samla in 3-dimensionella data (Beraldin, Blais & Lohr 2010). 3-dimensionella data kan samlas in på flera sätt och varje metod har sina egenskaper. Insamlingsmetoder av data till punktmoln delas generellt sett in i två kategorier, passiva och aktiva inmätningar (Pirotti, Piragnolo, Vettore & Guarnieri 2022). Passiv inmätning innebär att information endast mottages och det vanligaste exemplet i detta sammanhang är fotogrammetri. Genom att ta flera överlappande bilder som har information om var bilderna är tagna i sin metadata går det att bilda stora punktmoln (Pirotti et al. 2022).

Aktiv inmätning innebär däremot att signaler sänds ut och att svar på dessa, i form av exempelvis reflektion av signalen, returneras till sensorn. Aktiva inmätningssätt anses som mer konsekventa och bättre på att samla in mycket information, särskilt i områden där vegetation täcker marken (Pirotti et al. 2022). En av de mest använda kallas *light detection and ranging* (LiDAR).

2.1.1 LiDAR

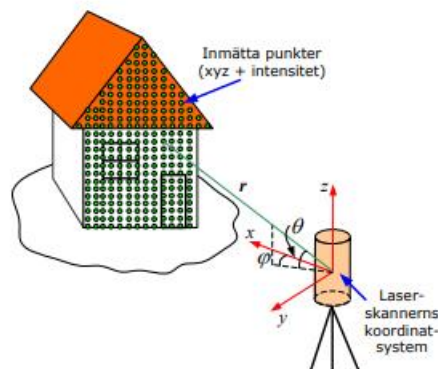
LiDAR fungerar som så att en laser skickar ut strålar. När en stråle studsar mot ett objekt skickas den tillbaka till en sensor. Genom att veta position och vinkel på sensorn samt tiden mellan strålens sändning och mottagning i sensorn går det att räkna ut var laserstrålen studsade i tre dimensioner (Beraldin, Blais & Lohr 2010). Slutprodukten blir att det blir ett stort moln av punkter där varje punkt, som skapas där en laserstråle har reflekterat och studsat tillbaka till sensorn, representerar ett stickprov av verkligheten. LiDAR-data skapas ofta genom luftburen eller terrester laserskanning.

Luftburen laserskanning kan göras från flera olika sorters luftburna farkoster såsom flygplan, helikopter eller drönare. Laserskannern har två komponenter, den ena är själva lasern och sensorn som mäter avståndet mellan farkosten och marken. Den andra är ett positioneringssystem baserat på GNSS (positioneringssystem t.ex. GPS) och tröghetsystem (Internal Measurement Unit) (Beraldin, Blais & Lohr 2010). Farkosten flyger i stråk över mätområdet och pulsstråket går vinkelrätt mot flygriktningen (se figur 2.1).



Figur 2.1: Principskiss av flygburen laserskanning av ett markområde (Lantmäteriet u.å. se Lantmäteriet et al. 2021 s.254).

Terrester laserskanning sker på marknivå bland annat genom statisk skanning där skannern normalt står på ett stativ (se figur 2.2) (Beraldin, Blais & Lohr 2010). Problemet med att mäta med dessa typer av skannrar är att det endast erhålls data från en specifik plats även om det går att maximera erhållen information med utrustning som exempelvis möjliggör 360-gradersmätning (Beraldin, Blais & Lohr 2010).



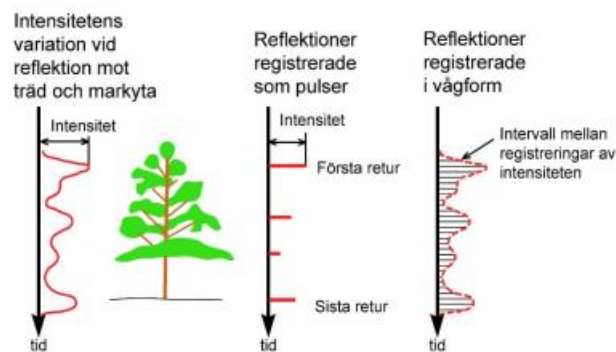
Figur 2.2: Principskiss av terrester laserskanning av byggnad (Staiger 2003 se Lantmäteriet et al. 2021 s.266).

Det går även att göra mobil terrester laserskanning genom att fästa skannern på olika typer av fordon. Det finns två tillvägagångssätt för mobil terrester laserskanning. Det ena är stop-and-go och den andra är on-the-fly (Kutterer 2010). Stop-and-go skapar punktmoln genom att röra sig över mätområdet, stanna med jämna intervall och genomföra skanningen. Denna metod liknar därmed statisk skanning med skillnaden att istället för ett stativ tillåter fordonet som skannern är monterad på att data kan insamlas över större områden och objekt skannas från flera vinklar (Kutterer 2010). On-the-fly innebär att det görs en kontinuerlig skanning samtidigt som fordonet rör sig. Att det går att genomföra skanningen samtidigt som fordonet är i rörelse

möjliggör snabbare genomförande av skanningen men det finns även potentiella felkällor. En sådan är att det finns potentiellt högre osäkerhet i GNSS-mottagaren om fordonet rör sig mellan byggnader som helt eller delvis kan blockera satellitsignaler (Kutterer 2010).

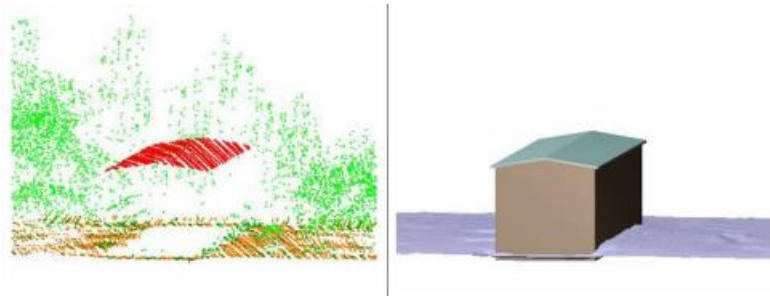
2.1.2 Klassificering och filtrering av datapunkter

Det är ofta avgörande för den fortsatta användningen av punktmolnet att veta vad punkten representerar (mark, träd, byggnad, etc.). Detta kallas klassificering och görs lämpligen av samtliga punkter i punktmolnet (Lantmäteriet 2023). Genom att exempelvis mäta amplituden av den studsande pulsen som kommer till sensorn finns möjligheten att göra antaganden kring vad som strålen studsar mot. Det finns olika sätt att klassificera eller filtrera punkter av en viss typ. Laserstrålar har förmågan att penetrera vissa objekt såsom vegetation och ge flera resultat från samma stråle. Om en och samma laserpuls studsar flera gånger och ger ekon kan amplituden av dessa mätas och påvisa exempelvis byggnader eller vegetation (se figur 2.3). Det går därmed att klassificera punkten genom att studera amplituden (Axelsson 1999).



Figur 2.3: Principskiss av reflektioner från laserskanning. När laserstrålen studsar mot trädet första gången reflekteras en relativt stor del av ljuset men mycket fortsätter också. En del reflekteras på vägen ner mellan trädtoppen och marken men nästa stora reflektion sker förs vid marken. (Lantmäteriet et al. 2021 s.254 omgjord från Vosselman & Maas 2010).

Då LiDAR-system kan sända flera hundra tusen pulser per sekund går det att skapa data som senare kan användas till detaljerade 3D-modeller (Beraldin, Blais & Lohr 2010). Eftersom laserstrålen även har viss penetrationsförmåga och kan studsas och komma tillbaka till sensorn flera gånger kan stora mängder data samlas in vilket kan leda till att data blir svårtolkade. Men med klassificering blir det lättare att urskilja hur miljön faktiskt ser ut och producera modeller (se figur 2.4).



Figur 2.4: Punktmoln skapat efter laserskanning av byggnad samt en enkel modell av byggnaden. Ett stort punktmoln med många punkter är svårtolkat men med klassificering är det möjligt att urskilja objekt och även producera tydliga modeller utifrån det från början otydliga punktmolnet (Lantmäteriet u. å. se Lantmäteriet et al. 2021 s.264).

2.1.3 Punktmolns egenskaper

Punkttäthet är ett viktigt attribut vid laserskanning. Det ger ett mått på detaljrikedomen för mätningen och ökad punkttäthet minskar även effekten av slumpmässiga fel (Lantmäteriet 2017a). Dock innebär hög punkttäthet att datamängdens storlek ökar vilket kan göra hantering väldigt resurskrävande upp till den grad att den blir nästintill omöjlig att hantera och lagra. Punkttätheten beror på flera faktorer såsom flyghöjd och flyghastighet. Även systeminställningar såsom skannerns synfält och pulsfrekvens är avgörande (Axelsson 1999).

Punktmoln sparas vanligen i LAS-filformatet (Beraldin, Blais & Lohr 2010). LAS-formatet utvecklades specifikt för att lagra punktmoln från LiDAR-data, vilket även är det vanligaste användningsområdet, men formatet stöder även andra 3-dimensionella punktdata (Library of Congress 2022).

Punktmoln kan visserligen användas direkt för exempelvis visualisering men ofta krävs ytterligare processer för att erhålla informationen som önskas (Vosselman & Klein 2010). En anledning till detta är att punkterna ofta är indexerad efter flygstråk vilket kan göra det svårt att hitta närliggande punkter. Ofta kräver tillämpningar att datan i punktmolnet kombineras med exempelvis vektordata då punktmolnsformatet inte stöder de analyser och operationer som ska utföras. Ett exempel på behov kan vara någon typ av process som är nödvändig för att extrahera information som trädhöjd (Vosselman & Klein 2010).

LiDAR anses vara en av de bästa metoderna för att producera högkvalitativa punktmoln (Beraldin, Blais & Lohr 2010). Detta bland annat på grund av dess höga precision, punkttäthet och datainsamlingstid. Faktumet att lasern har viss penetrationsförmåga gentemot växtlighet hjälper även inmätning av trädbevuxna områdes sanna markhöjd. Eftersom LiDAR leder till införskaffande av stora mängder data som inkluderar mer än bara punkter som representerar mark såsom vegetation och byggnader, krävs filtrering för att extrahera den intressanta datan (Briese 2010).

2.2 TIN-modeller

TIN-modeller är precis som punktmoln ett sätt att visualisera höjddata (Briese 2010), men istället för att visa enskilda, diskontinuerliga punkter skapas ett kontinuerligt triangelnät av

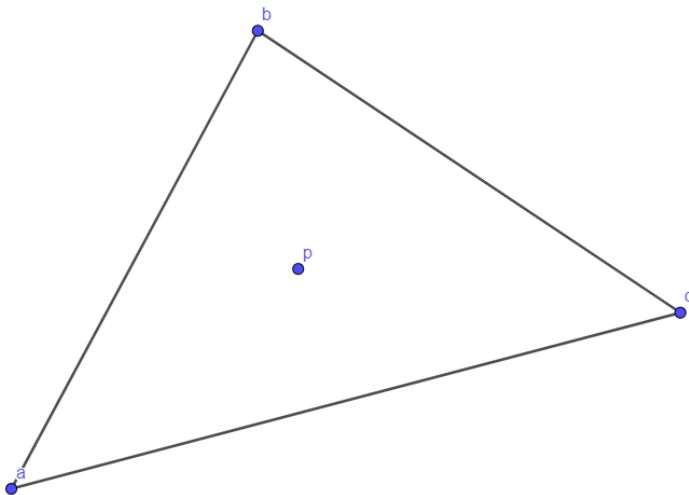
dessa punkter. Detta behöver inte göras för alla punkter i punktmolnet utan antalet trianglar kan anpassas beroende på behov och områdets komplexitet vilket leder till effektivare lagring av data. Samtidigt bibehålls en hög noggrannhet i de områden som kräver det (Vivoni et al. 2004). Möjligheten att inkludera viktiga formationer och strukturer i form av brytlinjer och inkludera dessa i TIN-modellen är en annan viktig funktion hos strukturen (Vivoni et al. 2004).

2.2.1 Trianguleringens grunder

För att generera en TIN-modell från punktmoln måste punkterna trianguleras. Genom att bilda trianglar mellan punkter kan plana, 3-dimensionella ytor som går genom de tre punkterna bildas. När triangulering sker över punkter i hela området går det att göra kontinuerliga ytor där samtliga punkter inom området har en interpolerad höjd. För att ta reda på den interpolerade höjden för punkten p i figur 2.5, jämförs avståndet till respektive hörnpunkt samt deras höjd. Ekvationen för höjden h av punkten p kan beskrivas som:

$$h(p) = \alpha \cdot h(a) + \beta \cdot h(b) + \gamma \cdot h(c) \quad (2.1)$$

där $\alpha + \beta + \gamma = 1$ och varje variabel motsvarar hur nära punkten p är respektive hörnpunkt.



Figur 2.5: Principskiss visande en punkt vars höjd ska beräknas i en triangel. Punkten p 's höjd kan beräknas genom att veta var i triangeln punkten är samt hörnpunkternas höjd.

2.2.2 TIN-modellers egenskaper och användningsområden

TIN-modeller är användbara inom flertalet områden där indatan är diskontinuerlig över området. Exempel på detta är 3D-undermarksmodeller för geologiska data som införskaffas genom exempelvis provborrningar (He, Zhang, Chen, Hou & Chen 2022).

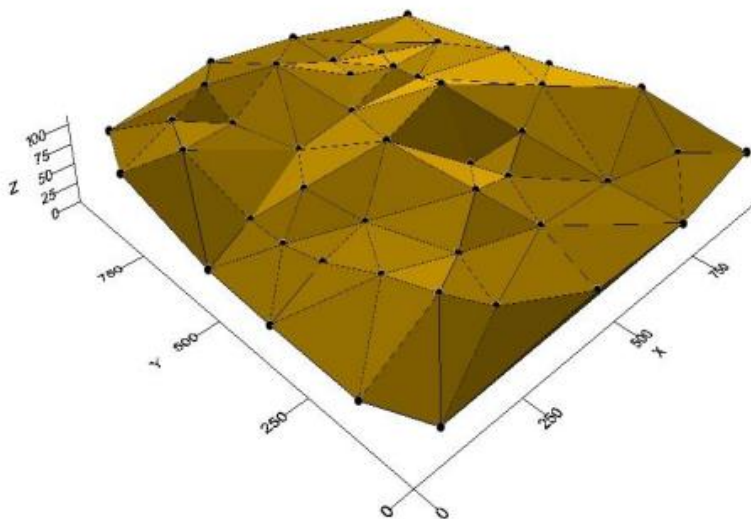
Eftersom TIN-modeller är kontinuerliga ytor som redan består av interpolerad data mellan trianglarnas hörnpunkter är det även möjligt att använda dem som underlag för att producera GRID-modeller (Werbrouck et al. 2011). Då TIN-modeller approximerar alla höjder inom det valda området underlättar det produktionen av GRID-modeller utan att riskera hål i modellen till följd av brist på data. (Werbrouck et al. 2011). Ett annat alternativ till GRID och TIN är höjdkurvor vilket är linjer som representerar en specifik höjd. Detta kan vara användbart vid plana visuella representationer av terräng exempelvis orienteringskartor. Höjdkurvor skapas

vanligen som en följdprodukt av TIN eller GRID (Lantmäteriet 2023). De lämpar sig dock sämre när det är nödvändigt att införskaffa information för hela området inklusive mellan höjdkurvorna eftersom det är svårt att interpolera mellan höjdkurvor (Milky, Kamel & Alshouny 2023).

TIN-modeller är ett vanligt format för så kallade digitala terrängmodeller (DTM), även kallade markhöjdmodeller (Maas 2010). DTMs är representationer av barmark utan exempelvis vegetation eller byggnader vilket skiljer sig från digitala ytmodeller (DSM) som representerar gränsen mellan atmosfären och jorden inklusive vegetation och byggnader (Briese 2010).

2.2.3 Generering av TIN-modeller

Även om punktmolnets punkter är definierade i tre dimensioner sker oftast själva trianguleringen endast i x- och y-led. Höjden läggs till först senare genom att applicera en funktion $h = f(x,y)$. Det rör sig alltså snarare om en höjdsatt 2D-modell än en 3D-modell, vilket kallas 2,5D. Detta fungerar alltjämt för att producera en fullgod markhöjdmodell (se figur 2.6) (Briese 2010; Koch & Heipke 2006).



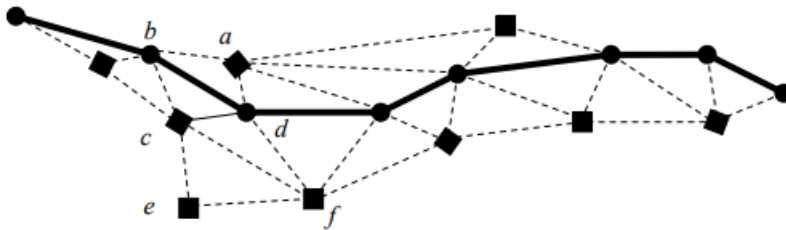
Figur 2.6: Yta i 2.5D vars höjder interpolerats med en TIN-modell (Harrie 2020 s.81).

Effekterna av en 2-dimensionell utgångspunkt blir svårigheter vid modellering av vertikala objekt såsom väggar men även uthängande byggnationer och formationer såsom broar och klippavsatser är problematiska. Det finns dock sätt att åtgärda problemet genom exempelvis integrering av objekten som separata objekt istället för punkter i trianguleringen (Koch & Heipke 2006). Det går även att implementera sanna 3D-trianguleringsmodeller på objekt men detta görs sällan för höjdmodeller (Koch & Heipke 2006; Parajola & DeCoro 2004).

2.3 Brytgeometrier

Det är viktigt att TIN-modeller, för att uppfylla sitt syfte, bevarar viktiga strukturer i terrängen, exempelvis åsryggar men även strukturer gjorda av människan såsom vägar (Little & Shi 2001;

Briese 2010). Brytgeometrier används ofta i samband med produktion av TIN-modeller eftersom de går att använda dem i produktionsprocessen för att behålla hög noggrannhet i viktiga områden av modellen (Briese 2010; Vivoni et al. 2004). Brytgeometrier minskar även behovet av punkter i modellen genom att tillhandahålla tydliga, väl inmätta geometrier att bygga modellen med (Little & Shi 2001). På grund av vilka typer av formationer det är som ska bevaras är brytlinjer (se figur 2.7) en vanlig form av brytgeometri men brytpunkter används även.



Figur 2.7: Skiss av triangulering med brytlinje (fet heldragen linje) (Harrie 2020 s.84).

Brytlinjer fungerar som ett skelett för modellen. Trianglarnas kanter får inte korsa dessa brytlinjer utan brytlinjerna måste vara kanter på trianglarna själva (HMK höjdmödel s.29). Skulle denna regel inte följas kan effekten bli grova fel i interpoleringen, exempelvis att toppar på höjder elimineras, samt att strukturer som är viktiga för fortsatt arbete med modellen försvinner.

2.3.1 Skapandet av brytgeometrier

Brytgeometrier produceras på flera sätt och har olika karaktär beroende på ursprung och produktionsmetod. Geometrierna kan vara befintliga 3D-data eller 2D-data som höjdsätts. Brytgeometrier kan produceras exempelvis genom fotogrammetrisk detaljmätning, geodetisk detaljmätning eller genom kartering av punktmolnet (Lantmäteriet 2023). Oberoende valet av mätmetod ska den klara kraven avseende mätosäkerhet. Fotogrammetrisk detaljmätning används vanligtvis i kombination med en separat insamlad markhöjdmödel som stöd vid mätningar med lägesosäkerhet på meter- eller decimeternivå. Vid mätningar på centimeternivå är det vanligt att använda sig av parallell laserskanning vid insamling av bilder (Lantmäteriet 2015). Fotogrammetrisk bestämning av brytlinjer görs genom manuell bestämning av punkter som kopplas ihop till brytlinjer (Briese 2010).

Geodetisk detaljmätning sker vanligen genom så kallad GNSS-baserad detaljmätning. Med RTK-teknik, som använder en basstation och rover för att genomföra mätningar, är det möjligt att bestämma brytgeometriernas exakta positioner på centimeternivå eller lägre (Lantmäteriet 2021). Med mätutrustningen går det att skapa dels brytpunkter men även brytlinjer och polygoner bestående av flera, ihopkopplade punkter.

Det är även möjligt att extrahera brytlinjer direkt från laserskannade data, antingen från punktmoln eller raster (Briese 2010). Det finns flera exempel på raster-metoder och en sådan är identifiering av kant-celler som sedan görs om till linjer i raster-till-vektor-algoritmer (Briese

2010). När brytlinjer extraheras från punktmoln görs det genom att ytor estimeras i punktmolnet och där två ytor korsas finns en brytlinje (Briese 2004). För att undvika att det bildas flera diskreta linjer, tillåts linjen växa i båda riktningar till dess att linjen avbryts eller formen jämnas ut (Briese 2010).

3. Produktionsmetoder

Det finns flera metoder att producera TIN-modeller (Harrie et al. 2020). Det finns även flera steg i produktionsprocessen som går att utföra och kombinera på olika sätt utefter behov, dock finns det generella steg som brukar tillämpas (Chen, Gao & Devereux 2017). Först och främst kan det finnas ett behov av att ta bort avvikande data (även känt som outliers) samt att filtrera punktmolnet så att endast de punkter som är intressanta för modellen som ska genereras finns kvar (Chen, Gao & Devereux 2017). Det kan även finnas behov av att reducera mängden data för att minska datorresurserna under tillverkningsprocessen (Werbrouck et al. 2011).

3.1 Filtrering av markpunkter

Punktmoln innehåller nästan alltid punkter som inte är intressanta att använda vid produktion av höjdmodeller. För att producera exempelvis markhöjdmodeller behöver punkter som studsar mot annat än marken sorteras bort. Detta kan till exempel vara punkter som bildats av studsar mot vegetation eller byggnader. Filtreringsalgoritmen kan utöver det anpassas att hitta specifika objekt såsom trädtoppar (Chen, Wang, Chang & Li 2020). Det går att klassa punkter utifrån till exempel amplituden av den returnerade strålen men det finns även flera kategorier av geometriska filtreringsalgoritmer såsom lutningsbaserade och interpolationsbaserade (Chen et al. 2020). Dessa filtreringsmetoder tenderar att prestera relativt bra på plan terräng men får större problem vid varierande och komplex terräng (Phan, Phan & Nguyen 2021). Trots att det föreslagits flera filtreringsalgoritmer med förmåga att relativt bra filtrera bort icke-markpunkter kan det krävas manuell visuell kontroll av det kvarvarande punktmolnet för att försäkra att det inte finns några uppenbara fel i filtreringen och annars åtgärda dem (Han, Li & Chen 2012).

Progressive TIN densification (PTD) är en vanlig typ av algoritm för filtrering av punktmoln (Nie et al. 2017). Det finns flera olika varianter av algoritmer men den klassiska PTD-metoden innebär i korthet att punktmolnet delas in i ett högupplöst grid. För varje cell selekteras den lägsta punkten inom cellen som *seed*-punkt eftersom denna troligtvis är en markpunkt. När detta har gjorts för alla celler bildas en enkel TIN-modell som representerar marken (Nie et al. 2017). Allt eftersom jämförs övriga punkter med TIN-modellen och om punkten som jämförs inte har för stor vinkel jämfört med TIN-ytan eller har för stort avstånd från den. Om punkten klarar kraven läggs den till TIN-modellen och klassas som markpunkt. Detta fortsätter till dess att alla punkter är klassificerade. PTD-metoden har dock en del problem i exempelvis komplex terräng. Det kan därför vara lämpligt att göra ändringar i flera steg i processen, som att ändra gränsvärdena eller ändra hur den initiala TIN-modellen genereras. Detta för att förbättra modellens prestanda vid behandling av till exempel svårmodellerad terräng (Nie et al. 2017).

3.2 Datareduktion

Trots att det försvinner en del punkter från punktmolnet vid klassificering och filtrering är det ofta fortfarande allt för stora datamängder för att, på ett effektivt sätt, producera en höjdmodell som uppfyller kraven från exempelvis beställare (Phan, Phan & Nguyen 2021). Det är viktigt att bestämma en lämplig punkttäthet för att optimera balansen mellan bevarandet av precision och noggrannhet å ena sidan, och effektivitet i hantering av datan å andra sidan (Werbrouck et al. 2011). Den generella tanken är att på ett optimalt sätt, alltså med så lite data som möjligt, uppnå kraven för modellen (Liu 2008). Samtidigt begränsar indatan hur hög detaljrikedom som kan appliceras på en modell. Om indatan är ett punktmoln med låg punkttäthet kan det vara olämpligt att generera en högupplöst höjdmodell. Ett mått som föreslagits för en GRID-struktur är att cellstorleken bör motsvara kvadratroten av kvoten mellan områdets area och antalet punkter (Liu 2008):

$$s = \sqrt{\frac{A}{n}} \quad (3.1)$$

där s är sidlängden på en cell, A är det modellerade områdets area och n är antalet punkter i det modellerade området. Dock är i detta fall storheten s oberoende av terrängens struktur. Det kan i det individuella fallet vara lämpligt med både högre och lägre upplösning. Ett annat mått för s är att bilda en transekt i modellen och mäta antalet inflektionspunkter (där ytans andraderivata byter tecken) och ta kvoten mellan dem (Liu 2008):

$$s = \frac{L}{2N_p} \quad (3.2)$$

där s är sidlängden på en cell, L är längden av transekten och N_p är antalet inflektionspunkter.

Valet av upplösning i indatan för modellering beror på vilket syfte modelleringen har (Chaubey, Cotter, Costello & Soerens 2005). Utvärderingen av modellerna kan därför även ske genom att jämföra modellens förmåga att tillfredsställa behovet i det specifika syftet snarare än att enbart studera skillnader mellan modeller i höjdded. Det går även att kompensera för låg upplösning om bevarandet av viktiga terränger är att önska genom att applicera exempelvis brytlinjer (Liu 2008).

För TIN-modeller varierar upplösningen och ett bestämt mått för hela modellen är således inte lämpligt. Begränsningen av data kan ske på flera sätt. Den kan ske innan trianguleringen genom att ta bort punkter från molnet, men även under trianguleringen genom att algoritmen väljer bort punkter att inkludera. Punkter kan tas bort slumpmässigt, med jämna intervall, eller efter specifika algoritmer som väljer vilka punkter som är viktigast för modellens prestanda. Ett sätt att förenkla punktmolnet är att skapa ett högupplöst GRID. Detta kan senare användas för att extrahera enstaka punkter inom varje cell, alternativt skapa en ny punkt inom varje cell. Studier har exempelvis genererat nya punkter i centrum av varje cell vars höjd är genomsnittshöjden av varje punkt inom cellen. Dessa punkter kan senare användas för att generera TIN-modellen (Phan, Phan & Nguyen 2021).

3.3 Trianguleringsmetoder

Det finns ingen unik vedertagen metod för att genomföra trianguleringen utan det finns flera etablerade metoder som passar olika bra beroende på modellens syfte (de Berg, van Kreveld, Overmars & Schwarzkopf 1997). Det finns därför flera typer av triangulering som kan appliceras vid produktion av TIN-modeller. Tre sådana typer är formberoende, databeroende och siktberoende triangulering. De vanligaste metoderna är varianter av formberoende triangulering som kallas Delaunay-triangulering och constrained Delaunay-triangulering (Wang, Lo, Brook & Arabnia 2001). Flera av metoderna utgår från att punkterna ligger i ett plan som trianguleras endast horisontellt utan att ta punkters höjd i beaktningstabell (de Berg et al 1997).

Utöver trianguleringsmetoder finns fler olika trianguleringsalgoritmer som skapar trianglarna utifrån villkor om trianglarnas egenskaper såsom Delaunay-egenskaper. Tre vanliga sådana är *divide-and-conquer*, *plane-sweep* och *greedy insertion* (Wang et al. 2001).

3.3.1 Formberoende triangulering

Formberoende triangulering använder geometriska begränsningar för att genomföra trianguleringen. Inom denna kategori finns det i sin tur tre underkriterier som kan appliceras självständigt. Dessa kriterier är max-min, min-max samt min-length. Max-min åsyftar att maximera den minsta vinkeln i hela området, medan min-max åsyftar att minimera den största vinkeln i området. Dessa två metoder tenderar att producera snarlika modeller (Wang et al. 2001). Min-length prioriterar att skapa trianglar med så korta sidor som möjligt. Denna metod kan skapa väldigt olika modeller jämfört med max-min och min-max. Syftet med formberoende triangulering är att minimera förekomsten av smala trianglar, vilka dels ökar felmarginalen vid interpolering, dels bidrar till att modellen tenderar att bli mindre estetiskt tilltalande (Wang et al. 2001).

3.3.2 Databeroende triangulering

Databeroende triangulering syftar till att minimera det geometriska felet vilket är avståndet mellan punkter och den interpolerade ytan. Andra, tvådimensionella algoritmer som endast triangulerar i x- och y-led kan leda till stora fel i höjd(z)-led (Wang et al. 2001). Smala trianglar kan alltså vara fördelaktiga att inkludera om de effektivt kan representera formationer i höjdmässigt komplexa miljöer. Genom att applicera en kostnadsfunktion som beror på skillnader i lutning mellan två trianglar som angränsar genom en kant kan trianglars lämplighet bedömas (Dyn & Ripa 1993). Denna kostnadsfunktion syftar till att minska skillnader i lutning mellan angränsande trianglar. Det finns flera sätt att sätta upp och applicera kriterier för att uppnå detta. Exempel på kriterier är *nearly C¹* (*NC¹*) som använder trianglarnas normaler för att minimera skillnader. Ett annat kriterium är *minimum energy*-kriteriet som syftar till att minimera felet mellan punkter inom trianguleringen (Dyn & Ripa 1993).

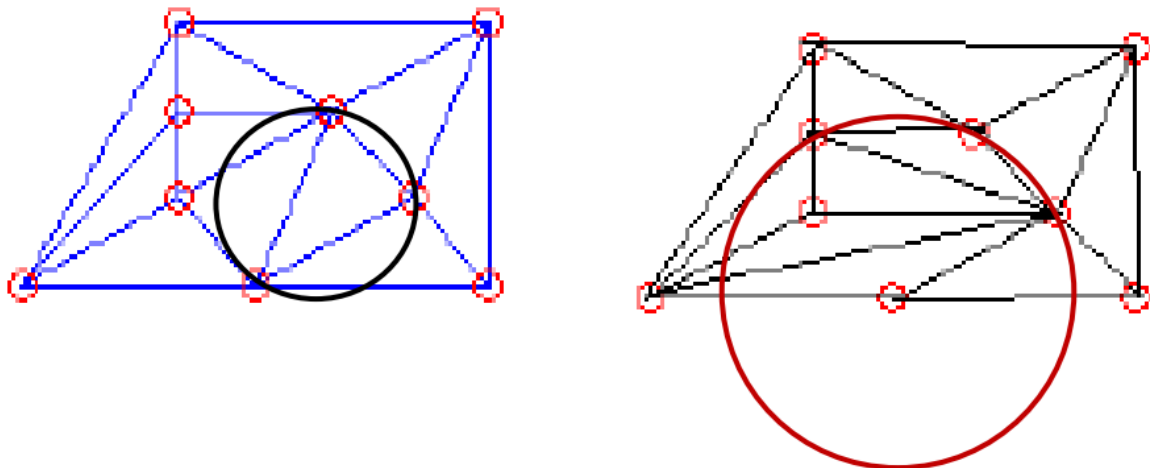
3.3.3 Siktberoende triangulering

Siktberoende triangulering görs ”on-the-fly” (Klein, Cohen-Or & Huttner 1998). Grundfilosofin är att spara datakapacitet genom att löpande rendera objekten som är synbara

för användaren som tittar på modellen på i miljön. Denna process tillåter snabb hantering av data och är populär i bland annat 3D-datorspel (Parajola & DeCoro 2004). Modellytan delas in hierarkiskt och kan renderas successivt. Detta leder till snabb rendering men kan också leda till sämre prestanda beroende på applikationsområde (Want et al. 2001). Trianguleringsmetodens karaktär och sämre prestationsförmågan sett till kvalitet över hela området gör att modellen främst lämpar sig väl för visualisering men mindre väl för till exempel projektering och flödesanalyser.

3.3.4 Delaunay-triangulering

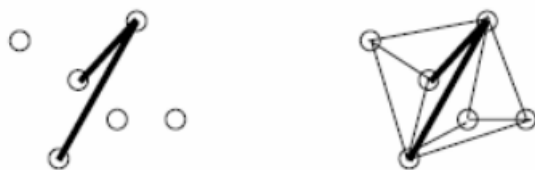
Den vanligaste trianguleringsmetoden är Delaunay-triangulering som är en typ av formberoende trianguleringsmetod med max-min-kriteriet. Med Delaunay-triangulering menas alla trianguleringar som uppfyller Delaunay-kriteriet (Wang et al. 2001). Kriteriet innebär att en triangel endast är godkänd om det går att bilda en cirkel som passerar genom triangelns samtliga hörn utan att innehålla andra punkter som är del av trianguleringen (se figur 3.1). Resultatet blir en yta med jämnt fördelade, jämnstora trianglar. Smala trianglar, som tenderar att vara mindre estetiskt tilltalande och innehålla mer interpoleringsfel, undviks därmed (Wang et al. 2001).



Figur 3.1. Den vänstra trianguleringen uppfyller Delaunay-kriteriet (inga övriga punkter inom cirkeln) till skillnad från den högra trianguleringen. (Harrie 2020 s.84).

3.3.5 Constrained Delaunay-triangulering

Constrained Delaunay-triangulering är en speciell version av formbaserad triangulering som innebär att brytgeometrier inkluderas i trianguleringen. Den generella regeln är att det inte är tillåtet att triangulera mellan två hörnpunkter som befinner sig på skilda sidor om brytlinjen (Wang et al. 2001). Effekten blir dock att trianglarna längs brytlinjen inte alltid uppfyller normala Delaunay-kriteriet utan kan vara långa och smala (se figur 3.2).



Figur 3.2: Punkter med brytlinje till vänster. Till höger, constrained Delaunay-triangulering med hjälp av samma brytlinje (Harrie 2020 s.86).

En annan kravställning krävs alltså för att kontrollera lämpligheten för de trianglar som angränsar brytlinjer (Wang et al. 2001). För detta kan en siktanalys appliceras som innebär att andra hörnpunkter som ligger inom Delaunay-kriteriets cirkel bara kan underkännas om de ligger på samma sida om brytlinjen som triangeln (Domiter & Zalik 2008), annars är de ”osynliga”.

Det finns dock möjlighet att kringgå begränsningarna som brytlinjerna medför (Wang et al. 2001). Genom att skapa nya punkter längs med brytlinjen är det möjligt att uppfylla Delaunay-kriteriet och samtidigt bevara god form. Dock är det svårt att bestämma var längs linjen dessa punkter bör placeras och på så sätt behålla en konsekvens i modellgenereringen (Wang et al. 2001).

4. Nationella specifikationer för storskaliga geodata

Projektet Nationella specifikationer för storskaliga geodata (NS-projektet) är ett strategiskt projekt inom innovationsprogrammet Smart Built Environment (Smartbuilt u.å.). Inom NS-projektet deltar flera aktörer som Lantmäteriet, Tyréns och flera större kommuner. Projektet leds av Lunds universitet och syftar främst till att ta fram och utvärdera preliminära nationella specifikationer för höjddatat. Syftet med specifikationerna är att det ska vara möjligt att söka efter öppna geografiska data utifrån bestämda attribut i en gemensam databas samt nationell enhetlighet i upphandling och delning av höjddata.

Arbetet i NS-projektet baseras till stor del på respons, från webbenkäter och referensgrupper, om höjddata som kommer från såväl offentlig som privat sektor. Användarberättelserna beskriver dels hur användning av höjddata ser ut, dels vilka krav som finns på höjddata och vilka effekter dessa har på arbetet med den. Utifrån användarberättelser valdes att NS-projektets specifikationer skulle gälla för punktmoln, brytgeometrier och GRID.

Centralt i NS-projektet är att skapa specifikationer för metadata såsom insamlingsområde och tidpunkt för datainsamling. Det finns även information som gör det möjligt att spåra datamängden som filreferenser till datakällor, hur data insamlats och av vem. Användaren kan även göra bedömningar på om datamängden är användbar i dennes syfte genom att studera exempelvis den redovisade lägesosäkerheten och punkttätheten. Eftersom specifikationer om kvalitetsredovisning inte bara gäller punktmoln utan även interpolerade höjddata som GRID är det av vikt att kunna redovisa kvalitet i hela produktionsprocessen.

I skrivande stund (maj 2024) genomförs tester för att utvärdera preliminära versioner av specifikationerna. Parallellt med att de praktiska testerna i detta examensarbete genomförs lagras information i enlighet med de preliminära specifikationerna som sedan kan användas i respektive filers metadata för att göra dem sökbara.

Genomgående är att punktmoln, brytgeometrier och GRID ska lagras med en logisk konsistens enligt framtagna informationsmodeller. Exempel på detta är att ha standardiserade filformat. Vidare finns kvalitetskrav för de produkter som tas fram inom respektive format.

4.1 Punktmoln

Specifikationerna för punktmoln berör dels generell information om punktmolnet såsom geografiskt läge men även information om dess kvalitet (se Appendix A.1). Exempel är lägesosäkerhet och punkttäthet, samt information om datainsamlingen som gör datan spårbar. Exempel på detta är hur datan insamlats, om den är insamlat med laserskanning eller fotogrammetri och om den är insamlat med flygburen eller terrester sensor samt hur sensorn rört sig eller varit placerad under datainsamlingen. Det är viktigt att punktmolnen är klassificerade, och framförallt att markpunkter är klassificerade korrekt.

4.2 Brytgeometrier

Brytgeometrier har varierande ursprung vilket påverkar strukturen på den tillhörande metadatan (se Appendix A.2). Exempelvis kan brytgeometrier bestå av olika typer av objekt, som ytor (polygoner), linjer och punkter. Generellt representerar brytgeometrier antingen befintliga objekt som är önskvärda att representera med högre kvalitet med avseende på exempelvis lägesosäkerhet än resten av markytan, eller höjdformationer som är viktiga för en mer korrekt representation av markytan som helhet. Befintliga objekt kan vara trottoarkanter, mittlinjer i vägen eller asfaltskanter mellan gångbana och gräsmatta. Höjdformationer kan vara exempelvis åsryggar, dikesbottnar. Det går även att utplacera så kallade allmänna höjdpunkter som är jämnt fördelade över plana ytor i arbetsområdet för ökad modelleringskvalitet. Det breda ursprunget och betydelsen av brytgeometrier kräver anpassade specifikationer och därav ska specifikationerna för brytgeometrierna vara breda för att kunna behandla alla typer av markdetaljer och deras påverkan på höjdmodeller.

4.3 GRID

Specifikationerna för GRID innehåller en del information (som specifikationerna för punktmoln) såsom geografiskt läge. Kvalitet för GRID:et, till exempel lägesosäkerhet och upplösning, ska även redovisas. För spårbarhet anges indatans ursprung. Dock finns mindre information om indatans kvalitet och mer om hur produktionen av GRID:et skett, exempelvis vilken programvara och interpoleringsmetod som använts. Detta för att även produkter ska vara spårbara i hela processen. Samspelet mellan GRID och datamängderna som används för att producera bland annat markhöjdmodeller, alltså punktmoln och brytgeometrier, behandlas även i specifikationerna.

5. Kvalitetsbegrepp

ISO9000 definierar kvalitet som en produkts förmåga att uppfylla användarbehoven. ISO19157 hanterar datakvalitet för geografisk information och specificerar principerna för kvalitet av geografiska data.

5.1 Kvalitetsdefinitioner

Kvalitet kan utvärderas på flera sätt. Dels varierar kvalitetsaspekterna för hur kvaliteten av indatan i form av punktmoln bör utvärderas men även för hur den slutliga modellen studeras (Briese 2010). Inom ramen för kvantifierbara kvalitetsparametrar för markmodeller delas de in i två områden (detta kallas ibland intern och extern kvalitet). Det ena området är kvalitet gentemot indatan som användes för att producera modellen (Briese 2010). Det blir alltså ett mått på hur modelleringen klarat av att bevara egenskaperna i punktmolnet. Det andra kvalitetsområdet beskriver modellens prestanda gentemot verkligheten. En exakt beskrivning av verkligheten finns dock inte, så istället krävs externa kontrolldata att jämföra med. Det är viktigt att denna data inte använts i samband med produktion av själva modellen. Det är även viktigt att denna kontrolldata är av högre kvalitet än indatan till modellen eftersom det ska vara en bättre återgivning av verkligheten (Briese 2010).

5.2 Kvalitet på indata

Kvalitet på indata är viktigt för att vidare definiera och redovisa kvalitet i process och slutprodukt. För HMK-standardnivåer 1-3 för flygburen laserskanning finns kvalitetsmått definierade för parametrarna punkttäthet, lägesosäkerhet och maximal skanningsvinkel (se tabell 5.1). Måtten är menade som tumregler och kan specificeras av beställare (Lantmäteriet 2017a).

Tabell 5.1: Kvalitetsparametrar i HMK-standardnivåer för flygburen laserskanning (Lantmäteriet 2017a).

Parametrar	HMK-Standardnivå 1	HMK-Standardnivå 2	HMK-Standardnivå 3
Punkttäthet (punkter /m ²)	0,5-2	6-12	20-30
Lägesosäkerhet i ideala förhållanden Plan/Höjd (m)*	0,30/0,10	0,15/0,05	0,05/0,02
Maximal skanningsvinkel	± 20°	± 20°	-

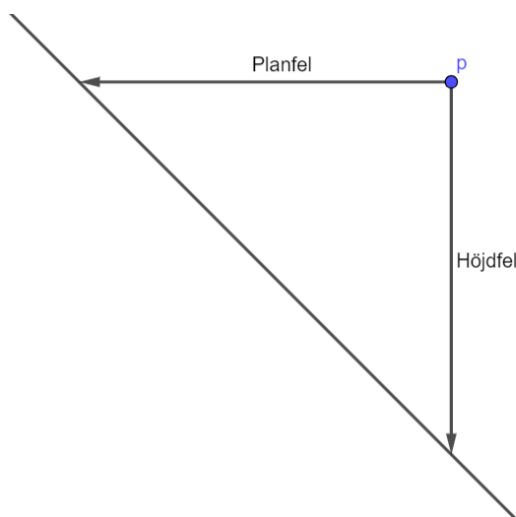
* Fungerar som tumregel för beställaren men värdena bör inte överskridas

Även om klassificering av punktmoln kan ses som en del av produktionsprocessen av TIN kan det även ses som en del av produktionsprocessen för punktmoln. Klassificerings- och filtreringsalgoritmer kan utvärderas på flera sätt. Ett sätt är att mäta och utvärdera olika typer av fel som uppstår när algoritmerna används såsom hur många punkter som klassificerats som

mark när de inte är det och vice versa samt summan av dessa fel vilket blir den totala felsumman (Nie et al 2017).

5.2.1 Kvalitet på punktmoln

En viktig faktor i kvaliteten av markmodellen är kvaliteten av den indata som används för produktionen. Viktiga kvalitetsaspekter för punktmoln är punkttäthet, filtrering av markpunkter samt deras lägesosäkerhet (Briese 2010). Punkttäthet beskriver hur komplett datamängden beskriver området, huruvida datainsamling behöver kompletteras och vidare vilka förutsättningar som finns för att genomföra användbara interpolationer. Filtrering är som nämnt i syfte att klargöra vilka punkter som är marken och vilka som är annat och som ska tas bort. Grova fel i denna kvalitetsfaktor innebär felaktiga interpoleringar. Lägesosäkerhet finns både i höjd och plan. Att mäta osäkerheten i både höjd och plan i terräng är emellertid komplicerat eftersom det är svårt att avgöra hur mycket av felet som är i höjd och hur mycket som är i plan (se figur 5.1). Lägesosäkerheten i punktmolnet följer med i interpoleringen och påverkar i förlängningen modellens lägesosäkerhet och medelfel gentemot verkligheten (Briese 2010).



Figur 5.1: Principskiss över hur potentiella fel i plan respektive höjd kan uttryckas när en punkt mäts på en slant. Det är i praktiken en kombination av båda men i vilken utsträckning respektive fel påverkar punkten p är svårt att avgöra.

Allteftersom teknologin inom datainsamling har utvecklats har förmågan att samla in data ökat markant. Möjligheten finns nu att samla in hundratusentals punkter per sekund. Generellt leder ökad mängd data till en lägre lägesosäkerhet. Dock leder en stor datamängd till höga resurskrav för lagring och hantering (Liu & Zhang 2008).

5.2.2 Kvalitet på brytgeometrier

För brytgeometrier gäller dels att de är inmätta i enlighet med kraven för lägesosäkerhet, dels att de är inmätta på sådant sätt att de trovärdigt kan återge terrängens form (Lantmäteriet 2017b). Det är alltså inte endast viktigt att brytgeometrierna är inmätta med låg lägesosäkerhet utan även att de inmätta objekten är rätt objekt. Utan viktiga brytgeometrier kan kvaliteten på den slutliga produkten sänkas.

5.3 Kvalitet på slutprodukt

Att definiera och redovisa kvalitet i slutprodukten, t.ex. TIN-modellen eller GRID där TIN har använts i processen, är en viktig aspekt av att visa vilka syften produkten kan vara användbar för. En stor fördel med utförlig kvalitetsredovisning på slutprodukten är att det möjliggör för användning i andra syften än vad det ursprungliga syftet med produkten var (Lantmäteriet 2017b). Detta är något som NS-projektet ämnar utvidga genom enhetlig redovisning av produkter vilket även kommer göra dem sökbara. Möjligheten att använda data och produkter till andra syften än det som de producerats för är en viktig del av det övergripande arbetet med att effektivisera byggandet genom att minska redundansen i dataproduktion.

5.3.1 Kvalitetsparametrar med kvalitetsmått

Det finns osäkerhet i geografiska data som representerar den fysiska miljön (Li et al. 2016). Även om det kan röra sig om stora datamängder kan kvalitetsbrister såsom osäkerhet och ofullständighet vara begränsande. För att bearbeta dessa begränsningar finns det utförliga standarder för att beskriva kvalitet (Li et al. 2016).

HMK beskriver flera övergripande kvalitetsteman för geodata som baseras på ISO19157 (se tabell 5.2). Dessa kvalitetsteman beskrivs genom kvalitetsparametrar som kopplas till kvalitetsmått vilka beskriver modellens prestation inom respektive tema (Lantmäteriet 2017b). Det finns även kvalitetsmått som är svåra att kvantifiera eller av någon anledning inte passar in i de andra kvalitetsteman.

Tabell 5.2: Viktiga kvalitetsteman samt deras respektive primära parametrar (Lantmäteriet 2017b).

Kvalitetsteman	Beskrivning	Kvalitetsparametrar
Fullständighet	Datamängden stämmer överens med specifikationen. Det är inte för mycket eller för lite data.	-Brist -Övertalighet
Logisk konsistens	Datamängden överensstämmer med de logiska reglerna.	-Konceptuell konsistens -Domänkonsistens -Formatkonsistens -Topologisk konsistens
Lägesosäkerhet	Osäkerhet i position	-Absolut lägesosäkerhet -Lokal lägesosäkerhet -Lägesosäkerhet hos rasterdata
Tematisk osäkerhet	Osäkerhet hos kvantitativa attribut och huruvida kvalitativa attribut är korrekt	-Klassificeringsosäkerhet -Tematisk osäkerhet, kvalitativa och kvantitativa attribut
Temporal kvalitet	Osäkerhet i temporala attribut	-Tidsosäkerhet -Temporal konsistens -Temporal kvalitet

5.3.2 Övriga kvalitetsparametrar

Andra kvalitetsteman som redovisas i HMK är syfte, spårbarhet och aktualitet. Geodatans syfte sätter den i ett sammanhang och beskriver vad den är producerad för. Detta ger insyn i hur geodatan ska tolkas och huruvida den kommer klara användarbehoven (Lantmäteriet 2017b). Spårbarhet är förmåga att redovisa produktens tillkomsthistorik. Det ger dels en indikation på produktens användbarhet, dels ger det dataproducenten en referens för felsökningar. Aktualitet beskrivs inte i ISO19157 men är väl använd och efterfrågad. Den är ett mått på hur uppdaterad geodatan är och dess vikt varierar beroende på användningsområde. Aktualitet redovisas lämpligen som den tidpunkt då den senast konstaterades som korrekt (Lantmäteriet 2017b).

Användbarhet är ännu ett av de kvalitetsteman som nämns i HMK. Den fungerar dels som ett samlingsnamn för aspekter som inte passar inom andra kvalitetsteman men den fungerar även som ett tema i sig. Den beskriver datamängdens lämplighet för ett specifikt syfte vilket kan öka tolkningsmöjligheter för användare som saknar kompetens att tolka andra kvalitetsparametrar. Informationen i form av indata eller modell måste vara hanterbar ur ett resursperspektiv.

5.4 Kvalitet i produktionsprocessen

Kvalitet i produktionsprocessen definieras till stor del i ISO9000-serien och berör främst kvalitetsstyrning. Den beskriver hur kvalitetsstyrningssystem ska implementeras vilka aktiviteter som ska genomföras inom exempelvis organisation, ledning, planering, utvärdering och förbättringsarbete (ISO 2016).

5.4.1 Generellt i produktionsprocessen

Kvalitetssäkring är en viktig del av kvalitetsarbetet och definieras i ISO-9000 som de planerade och systematiska aktiviteter som är implementerade i kvalitetssystem (Larrivé, Bédard; Gervais & Roy 2011). Kvalitetssäkring ska därmed inge förtroende att produkten kan uppfylla de kvalitetskrav som ställs. Det fungerar emellertid inte som någon typ av garanti (ansvarstagande) för kvaliteten av produkten. En certifiering enligt ISO-9001 av geodataproducenter innebär att en viss mängd resurser ska läggas på kvalitetssäkring. Det betyder alltså inte att en viss kvalitet måste uppnås av producenten (Larrivé et al. 2011).

Kvalitetskontroll skiljer sig jämfört med kvalitetssäkring och definieras enligt ISO-9000 som tekniker som används för att uppfylla kvalitetskrav (Larrivé et al. 2011). Genom tester och inspektioner av data som vid avvikelser kan användas för att förbättra processer och kvalitetssäkringen kan kvalitetskontroller användas för att garantera kvalitet till skillnad från kvalitetssäkring (Larrivé et al. 2011).

Genom ytterligare åtgärder såsom certifiering eller kvalitetssäkring och kvalitetskontroller av flera parter kan kvalitet i produktionsprocessen utvärderas och säkerställas. Detta kan utföras dels av producenter och mottagare av tjänster och produkter, dels av tredjepartsaktörer som kan granska producenter och säkerställa att kvalitetskrav är tillfredsställda (ISO 2016; Larrivé et al. 2011).

5.4.2 Punktmoln

Ett punktmoln kräver ofta förbehandling innan det kan användas för att producera höjdmodeller (Lantmäteriet 2017b). Exempel på detta är felaktiga punkter (brus) men även korrekta punkter som inte behövs för modellens syfte. Klassificering specificeras i ASPRS LAS-standarden men det finns även utrymme för beställare att lägga till egna klassificeringar (Lantmäteriet 2017b).

Lantmäteriet (2017b) beskriver att uttunning av punktmoln ska ske på sådant sätt att kraven för lägesosäkerhet och detaljeringsgrad fortfarande uppfylls. Vidare ska en höjdmodell bildad av ett uttunnat punktmoln inte avvika nämnvärt från en bildad av ett icke uttunnat punktmoln.

5.4.3 Triangulering

Eftersom TIN-modeller genereras för att skapa heltäckande modeller av diskret information såsom punktmoln är det viktigt att trianguleringen genomförs på sådant sätt att modellen inte ger en felaktig bild av de verkliga förhållandena modellen ska representera. Lantmäteriet (2023) anger att trianguleringen ska genomföras på ett kontrollerat sätt och att alla trianglar ska uppfylla kraven på lägesosäkerhet.

Andra krav på produktionsprocessen är att hantering av brytgeometrier vid triangulering ska genomföras så att trianglar bryts vid dessa (Lantmäteriet 2023). Det finns dock möjlighet att komplettera med fler brytgeometrier för att förbättra trianguleringen och täcka eventuella hål i datamängden såsom markytor under broar och vegetation (Lantmäteriet 2023).

5.5 Kvalitetsutvärderingsmetoder

För att effektivt utvärdera kvalitet i indata, process och slutprodukt måste det finnas lämpliga metoder att utvärdera kvalitetsteman och följa upp krav från beställare eller andra aktörer.

5.5.1 Generella metoder

Det finns flera etablerade kravnivåer som används i olika typer av samhällsbyggnadsprojekt. Exempel på sådan är HMK-standarder som innehåller kravstandarder på diverse kvalitetsparametrar i olika nivåer såsom mätmetod, upplösning och lägesosäkerhet (Lantmäteriet 2017b). Det finns fyra HMK-standardnivåer (0-3) där 0 är nivån med lägst krav på exempelvis lägesosäkerhet och upplösning och används vid globala eller nationella mätningar. Standardnivå 3 är längst bort på andra sidan skalan med högre krav på lägesosäkerhet och upplösning och används vid projektering i specifika projekt såsom för byggande (Lantmäteriet 2017b). Genom att ställa krav i enlighet med standardnivåer kan kvalitet utvärderas utifrån vissa bestämda mått.

5.5.2 Höjddata

Kvalitetsutvärderingen av höjdmodeller beror på kvalitetstema. Ett vedertaget sätt att kontrollera den interna lägesosäkerheten i höjddata är att beräkna medelfelet (root mean square error, RMSE) (Briese 2010).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (5.1)$$

Formeln för RMSE redovisas ovan, där y_i och \hat{y}_i är höjden för indata respektive den interpolerade höjden, och n är antalet mätvärden (punkter) som användes.

Medelabsolutfelet (MAE) är ett annat sätt att kontrollera den interna lägesosäkerheten som kan användas i kombination med RMSE (Liu & Zhang 2011).

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (5.2)$$

I formeln för MAE där y_i och \hat{y}_i höjden för indata respektive den interpolerade höjden, och n är antalet mätvärden (punkter) som användes.

HMK-standardnivåer innehåller krav på ungefärlig lägesosäkerhet (se tabell 5.3). De är inte precisa specifikationer på krav utan användarbehoven kan påverka kraven på bland annat lägesosäkerhet.

Tabell 5.3: HMK-standardnivåer, exempel på ändamål och ungefärlig lägesosäkerhet (Lantmäteriet 2017b).

HMK-standardnivå	0	1	2	3
Exempel på ändamål	Global/nationell mätning	Nationell/regional mätning	Detaljplanering	Projektering
Ungefärlig lägesosäkerhet	≥ 1 m	≤ 1 m	$\leq 0,1$ m	$\leq 0,05$ m

Det finns även exempel på att trianguleringen utvärderas genom att beräkna den största avvikelser i höjd mellan punktmoln och TIN-modell inom varje triangel. För varje triangel beräknas avståndet i höjd mellan denna och alla punkter som befinner sig horisontellt inom triangeln för att erhålla största avståndet (De Floriani 1989). Dock är denna utvärderingsmetod sårbar för extremfel som avviker från normalfördelningen vilket kan ge missvisande bild av modellens kvalitet överlag.

6. Kvalitetspåverkande faktorer

Det finns flera faktorer som påverkar kvaliteten i TIN-modellen på olika sätt. Förevarande kapitel berör viktiga kvalitetspåverkande faktorer inom viktiga kvalitetsteman för TIN-modeller.

6.1 Lägesosäkerhet

Lägesosäkerhet i höjdmodeller beror främst på ett antal faktorer. Terrängens morfologi (uppbyggnad), provtagningstäthet (i detta fall punkttäthet) samt interpolation anses vara de

faktorer som starkt korrelerar med fel, och i förlängningen osäkerhet, i höjdmodeller (Costantino & Angelini 2013). Lägesfelet kan delas in i två olika kategorier, spridningsfel på indatan samt interpolationsfel (Costantino & Angelini 2013; Lui, Hu & Hu 2015). Det totala lägesfelet kan sedan beskrivas enligt följande felfortplantningsformel:

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_{x_{interpolering}}^2 + \sigma_{x_{spridning}}^2} \quad (6.1)$$

Felfortplantning av standardfel beror i detta fall på fel i indatan och interpoleringen i den slutliga modellen. σ_y är det fortplantade standardfelet och $\sigma_{x_{interpolering,spridning}}$ är standardfelet för respektive osäkerhetskälla (Wasström, Lönnberg & Harrie 2020).

Spridningsfel från indatan kan liknas vid slumpmässiga fel och beror på lägesosäkerheten i insamlingsfasen. En låg lägesosäkerhet leder i sin tur till att majoriteten av felen är sprungna ur interpolationsfel (Costantino & Angelini 2013). Liu, Hu & Hu (2015) beskriver att spridningsfelet maximalt är så stort som det största spridningsfelet i de hörnpunkter som bildar respektive trianglar. Samma artikel beskriver interpolationsfelet R_T enligt:

$$|R_T| \leq \frac{3}{8} M_2 h^2 \quad (6.2)$$

där M_2 är den maximala andraderivatan i ytan och h är den längsta triangelkanten i ytan.

Detta blir ett mått över hur mycket terrängen förändras och hur mycket trianguleringen generaliserar vilket skapar interpoleringsfel (Liu, Hu & Hu 2015). Interpoleringsfel uppstår genom att trianglarna i TIN-modellen alltid skapar linjära ytor och därmed missar icke-linjära terrängförändringar inom trianglarna (Liu, Hu & Hu 2015).

6.2 Datareduktion

På grund av de stora datamängder som skapas vid insamling av LiDAR-data finns ett behov av att reducera datan som används för trianguleringen, t.ex. för att skapa hanterbara TIN-modeller (Liu & Zhang 2008). Den ökade kapaciteten inom datainsamling reflekteras inte inom utveckling av datalagring och datahantering. Teknologin som används att samla in geografiska data har blivit bättre, billigare och mer tillgänglig (Li et al 2016). Att volymer och variationer i format för geografiska data ökat innebär även nya utmaningar i verifiering och kontroll av kvalitet i datamängder (ISPRS 2012).

Eftersom det finns en klyfta mellan mängden geografiska data som kan skapas och kapaciteten att hantera och lagra samma data, behöver datan generaliseras och/eller kapaciteten för lagring och hantering öka. Eftersom det sistnämnda är svårt och väldigt resurskrävande att utföra i liten skala är det enklaste att generalisera eller på andra sätt begränsa datamängden. Dock förloras data om terrängen vilket kan påverka höjdmodellens förmåga att uppfylla sitt syfte. Möjligheter finns dock att reducera datamängden utan att nämnvärt påverka modellens kvalitet noterbart. Liu & Zhang (2008) visade exempelvis att det går att reducera modellen till åtminstone 50 % av den ursprungliga datamängden utan att det avsevärt påverkar medelfelet i deras GRID-modeller.

Datareduktion bör göras så att den på ett optimalt sätt begränsar resurskraven för hantering av datan utan att på ett negativt sätt påverka datans och modellernas kvalitet (Liu & Zhang 2011). Faktumet att olika punkter i punktmolnet har olika betydelse för bevarandet av punktmolnets kvalitet är ofta en följd av terrängen samt positionen i förhållande till viktiga formationer i terrängen (Liu & Zhang 2011).

6.3 Brytgeometrier

Eftersom brytlinjer fångar viktiga formationer såsom åsrygggar, dalbottnar och vattendrag minskar de risken för interpoleringsfel och tillåter i teorin en större reduktion av datamängden (Liu & Zhang 2008). Genom att inkludera brytlinjer i modelleringen som skelett minskas behovet av punkter för att med tillräckligt god kvalitet modellera terrängen (Little & Shi 2001).

Brytlinjernas främsta effekt är att de kompenserar för bristfälliga data. Liu & Zhang (2011) visar att brytgeometrier har en liten effekt på noggrannheten i modellerna när datareduktion endast skett i liten skala (<50% av datapunkterna borttagna). När datan reducerats till mindre än 50% av den ursprungliga datamängden spelar de större roll genom att plana ut medelfelskurvan. I ett test visades att med högkvalitativa brytlinjer kunde 95% av datan reduceras medan MAE och RMSE var vad de motsvarande med 50% datareduktion utan brytlinjer (Liu & Zhang 2011).

Del III. Intervjuer och fallstudie

7. Intervjuer

För att förankra studien i användningen av TIN-modeller i praktiska tillämpningar genomförs intervjuer med personer som använder TIN i sitt arbete. De tillfrågas hur TIN används och även kravställningen på TIN. Intervjuerna ger inblick i hur TIN används inom samhällsbyggnadsbranschen inom flera områden. Även producenter av TIN-modeller intervjuas för att klargöra hur produktionsprocessen ser ut i praktiken.

Syftet med intervjuerna är att etablera hur branschen ser på produktion, användning och kvalitetskrav på TIN-modeller. Intervjuerna utgör underlag för fallstudierna genom att tillföra exempel på produktionsprocesser men även vilka kvalitetsteman som är viktiga för respektive användningsområde samt vilka krav som kan finnas för respektive kvalitetstema.

7.1 Metod – urval av intervjupersoner

Flera av intervjupersonerna kommer från olika verksamhetsområden inom Tyréns-koncernen men även representanter från Malmö stad och Lantmäteriet deltog (se tabell 7.1).

Tabell 7.1: Intervjupersoner (för minskad redundans används nummer (Nr) som referens i följande tabeller).

Nr	Intervjuperson	Organisation	Intervjusammanfattning
1	3D-utvecklare	Malmö Stad	Appendix B.1
2	3D-visualiserare	Tyréns	Appendix B.2
3	Mättekniker	Tyréns	Appendix B.3
4	Produktionsutvecklare	Lantmäteriet	Appendix B.4
5	Projektör, Väg, gata & mark	Tyréns	Appendix B.5
6	Vattenutredare 1	Tyréns	Appendix B.6
7	Vattenutredare 2	Tyréns	Appendix B.7

7.2 Intervjuformat

Intervjuerna genomfördes antingen genom fysiska eller virtuella möten. Intervjuerna hölls i ett diskussionsformat på grund av den breda användningen bland intervjupersonerna. Efter intervjuerna skrevs sammanfattningar av respektive intervju som sedan skickades till intervjupersonen för revidering och godkännande.

Intervjuformatet var semistrukturerat. Ett semistrukturerat intervjuformat innehåller en grov struktur med centrala frågor som ska besvaras men hur frågorna ställs anpassas till vad som uppkommer under intervjun. Detta ger utrymme för utvidgande av frågor och följdfrågor som är relevanta för varje intervjuperson utan att möjligheten att jämföra svar mellan intervjupersoner på centrala frågor går förlorad.

Frågeformuläret som skickats ut till intervjupersonerna såg ut enligt följande:

1. Vad är din arbetsroll?
2. I vilket/vilka sammanhang använder du höjdmodeller? Vad är syftet med att arbeta med höjddata?
3. I vilken utsträckning använder du TIN-modeller?
4. I vilka tillämpningar använder du TIN-modeller?
- 5.a Hur genererar du TIN-modellerna?
 - Vilken indata används?
 - Hur spelar brytgeometrier in när du genererar TIN-modeller?
- 5.b Alternativt: Var får du TIN-modellerna från?
6. Vilken/vilka kvalitetsaspekter lägger du tyngd på i ditt arbete?
Exv. lägesosäkerhet, detaljrikedom, brytgeometrier, fina visualiseringar.

7.3 Resultat

Intervjusammanfattningar för samtliga intervjuer återfinns i Appendix B.

7.3.1 Användningsområde och indata

Intervjuerna visar på ett mycket varierat arbete kring höjdmodeller vilket var syftet med spridningen av intervjupersoner (se tabell 7.2).

Tabell 7.2: Yrkesbeskrivning av intervjupersonerna och deras användning av höjddata.

Nr	Intervjuperson	Användningssyfte	Indata
1	3D-utvecklare	Visualiseringsverktyg	Laserdata från extern leverantör
2	3D-visualiserare	Referensverktyg vid visualisering	LM laserdata skog
3	Mättekniker	Varierar beroende på beställare	Varierar
4	Produktionsutvecklare	Produktion av Nationella Höjdmodellen	Laserdata från egna flygningar
5	Projektör, Väg, gata & mark	Projekteringsunderlag	Varierar
6	Vattenutredare 1	Modelleringsunderlag för flödesanalyser	LM laserdata skog (vanligast)
7	Vattenutredare 2	Modelleringsunderlag för flödesanalyser av ytvatten	LM laserdata skog + egna mätningar

Indatan kommer även den från varierande källor men ofta kommer de från en leverantör eller Lantmäteriets *Laserdata Nedladdning, skog* som är en öppen datamängd bestående av ett nästintill rikstäckande (ca 75%), klassat punktmoln med en punkttäthet på 1-2 punkter/m² (Lantmäteriet 2022).

7.3.2 Produktion och slutprodukt

Hur TIN-modellerna produceras varierar mellan intervjupersonerna (se tabell 7.3). Flera har inte TIN som ett slutligt format utan TIN skapas som ett steg för att skapa exempelvis GRID medan andra använder TIN-modellen direkt. FME är en etablerad programvara men flera andra program används också för att generera TIN-modeller. Vissa av programmen är utvecklade för ett specifikt syfte, exempelvis Mike som är ett verktyg för modellering och simulering kring vattenhantering. Även om val av programvara i en del fall var densamma skiljde sig tillvägagångssätten fortfarande åt. Att flera använder FME-skript innebär inte att trianguleringen genomförs på samma sätt utan TIN-modeller genereras med hjälp av egna skript med varierande komplexitet.

Tabell 7.3: Intervjupersonernas produktionsmetoder av höjdmodeller, om och i så fall vilka brytgeometrier de använder samt vilket format den slutliga modellen har.

Nr	Produktionsmetod	Brytgeometrier	Slutprodukt
1	Egna FME-skript	Marktäckegränser	TIN-mesh
2	Global Mapper + Studio Max	Nej	Varierar, exv. höjdsatt ortofoto
3	Varierat + CAD-system	Varierar	Varierar
4	Terrascan + FME-skript	Vattenlinjer + Punkter under broar	GRID
5	Recap + Civil3D	Höjdformationer + väglinjer, vägkanter	TIN-mesh
6	Mike	Nej	TIN-mesh/GRID
7	FME-skript	Viktiga punkter och formationer	GRID

Brytgeometrier används av de flesta av intervjupersonerna. Då brytgeometrier inte används är detta på grund av den låga upplösningen på slutprodukt eller indata. Intervjuperson 2 uttryckte att den slutliga modellen inte behövde vara rätt men ”se rätt ut”. Detta innebär inte att modellen ska ge en felaktig bild av verkligheten men det kan vara okej om en mur som är 50 cm hög i verkligheten modelleras som att den är 40 cm hög. För intervjuperson 6 är det istället den låga upplösningen på indata som gör brytlinjer onödiga. Intervjuperson 6 uttryckte att det inte är lönt att använda sig av brytlinjer eftersom specifika formationers position inte fångas upp även om det hade varit lämpligt vid produktion och tillämpning av mer högupplösta modeller. Istället läggs resurser på att samla in mer detaljerade data i områden som bedöms viktiga för modelleringen där indatan inte är tillräcklig.

När brytgeometrier används är det specifikt till syftet med modellen. Exempel på detta är intervjuperson 4 som bland annat använder dem för att komplettera modellen i områden som inte fångats av laserskanningen. Ett annat exempel är intervjuperson 7 som bland annat använder brytgeometrier för att mäta in viktiga formationer under vattenytan där det inte nödvändigtvis är lägesosäkerhet utan tvärsnittsarean som kan vara det viktigaste. Betydelsen av användning av brytgeometrier skiljer sig även beroende på användningsområde. De kan användas som komplettering av punktmoln i områden som saknar data eller där datakvaliteten inte är tillräcklig. Med utförligt insamlade brytgeometrier kan TIN-modeller genereras direkt från brytgeometrier utan användning av punktmoln vilket intervjuperson 5 gör.

7.3.3 Kvalitetsutvärdering

Vilka kvalitetsteman som är viktigast hade intervjupersonerna generellt ingen klar uppfattning om. Det framgick att datamängdens storlek var avgörande. En stor datamängd leder dels till längre produktionstid, dels till att det tar längre tid att arbeta med modellen efter produktion. Ofta finns tillgång till högre detaljrikedom i modellerna för bättre prestanda men resurskraven för hantering av datan och modellerna gör att detaljrikedomen behöver begränsas. Detaljrikedom och lägesosäkerhet är ofta viktiga kvalitetsteman (se tabell 7.4) men dessa vägs ständigt mot hanterbarheten av datamängden, både under produktion och hos slutprodukt. För flera intervjupersoner handlar det inte om att producera en modell med så hög upplösning och låg lägesosäkerhet som möjligt utan en modell som klarar de utsatta kraven med så lite resurser som möjligt, vilket ofta innebär en mindre datamängd. Kvalitetsparametrar som överstiger de utsatta kraven är acceptabelt om arbetet med att framställa dem är rimliga ur ett resursperspektiv. Flera av intervjupersonerna, framförallt konsulterna, nämner att det är en fråga om resurshantering eftersom någon måste betala för de extra timmarna det tar att producera modellen.

Tabell 7.4: Vilken upplösning de slutliga modellerna som produceras av intervjupersonerna har. Vilka krav de har på lägesosäkerhet. Slutligen vilka kontrollmetoder som görs på modellen.

Nr	Upplösning	Tolerans lägesosäkerhet i höjd*	Kontrollmetod(er)
1	1-50 meter	5-10cm	Visuellt
2	1 meter	Decimeterfel	Visuellt
3	Varierar	Varierar	Statistiska mot indata, stickprov, visuell kontroll
4	1 meter	Centimeterfel (5cm)	Visuell
5	Varierar	Milli- till centimeterfel	Visuell, jämför med laserdata
6	1 meter eller större	Centimeterfel	Modellens prestation
7	1 meter	Centimeterfel	Visuella kontroller

* På indata.

Visualisering av modellen är genomgående en viktig kontrollmetod för att identifiera systematiska och grova fel i modellerna. Det kan vara svårt att enbart genom statistiska mått avgöra om modellen är bra, framförallt huruvida viktiga områden är korrekt modellerade. Här

kan det ingående punktmolnet agera jämförelseobjekt för att säkerställa att modelleringen inte interpolerat bort viktiga formationer. I övrigt är tillförliten hög på indatans kvalitet i lägesosäkerhet. I vissa fall berättigas detta av högkvalitativa inmätningar som kvalitetsgaranteras av leverantören avseende exempelvis lägesosäkerheten såsom för intervjuperson 1, 3 och 5. I andra fall är lägeskraven så låga, alternativt upplösningen så låg, att lite större fel kan tillåtas. Beroende på syftet kan feltoleransen hanteras på olika sätt. Om modellen har ett visualiseringssyfte, såsom för intervjuperson 1 och 2, är feltoleransen högre. Visserligen har intervjuperson 1 en relativt låg feltolerans men det är snarare ett mått på vilken kvalitet som väntas än vad som kan tolereras för att datamängden ska vara användbar vilket går att spåra från den låga lägesosäkerheten på indatan. Att kraven för lägesosäkerhet är lägre för modeller som används i visualiseringssyfte är för att det ska se ut som det gör i verkligheten, men det finns inget behov av att det ska vara en riktig representation av verkligheten. Exempel på detta är sänkningen av gatunivån som görs i Malmö stads modeller. Det ger en mer korrekt känsla även om modellen blir en mindre korrekt representation av verkligheten.

8. Fallstudier

För att undersöka de kvalitetspåverkande faktorerna som finns i processen genomförs praktiska fallstudier. Syftet med dessa är att undersöka hur faktorerna påverkar relevanta kvalitetsteman. Vilka faktorer och kvalitetsteman som används baseras på litteraturöversikten och intervjustudien.

8.1 Erfarenhet från litteraturöversikt & intervjuer

8.1.1 Användning av TIN

TIN är ett praktiskt format för behandling och användning av höjddata. Även om det inte alltid är själva slutprodukten kan TIN-modeller användas för att skapa höjdmodeller i andra representationer. fördelar med att arbeta med TIN är interpoleringsegenskapen som innebär en kontinuerlig yta över hela området. Det är även ett effektivt sätt att modellera ytor eftersom plana ytor kan modelleras med låg upplösning och i samma modell kan komplicerad terräng modelleras med högre upplösning.

Höjddata är viktigt för flera olika aktörer vilket även visar sig i de skilda formaten och kraven. Alltifrån översiktliga visualiseringar där variationer i representationen skapas manuellt för att det ser mer rätt ut, till detaljerade modeller baserade på inmätningar med lägesosäkerhet på under en centimeter. Detta speglas även i hur modellerna skapas, hanteras och används vilket intervjuerna visar på.

8.1.2 Datakällor

Datakällor för att skapa TIN-modeller kan variera stort. I Sverige finns tillgång till Nationella Höjdmodellen och Laserdata Skog vilka ger enkel tillgång till öppna laserskannade data och höjdmodeller över stora delar av landet. Det är emellertid inte ovanligt att användare införskaffar

data genom egna mätningar, antingen genom att beställa från en extern aktör eller genomföra mätningar på egen hand.

Brytgeometrier kan även de insamlas på olika sätt. De kommer mer sällan från nationella, regionala eller kommunala databaser utan skapas i samband med egna projektet. Det vanligaste bland intervjupersonerna är att de samlas in genom mätningar men det finns även andra insamlingsätt såsom 2D-geometrier och kompletteringspunkter som sätts in manuellt (syntetiska brytgeometrier).

8.1.3 Kvalitet

Utifrån intervjuerna och litteraturöversikten framkommer en mängd viktiga parametrar i produktion av höjdmodeller från punktmoln. Kvaliteten på det ingående punktmolnet är viktig och produktionsaspekterna på kvaliteten på slutprodukten handlar till stor del om att reducera datamängden och optimera denna i förhållande till förmågan att uppfylla användarkraven. Flera av intervjupersonerna nämner att detta i någon utsträckning tas i beaktning. Ibland vägs datareduktion mot effekterna den får på modellen men ibland innebär även resurskraven som följer vid hantering av stora mängder höjddata en sådan begränsning att det snarare är fråga om att datareduktion måste ske för att överhuvudtaget klara av att slutföra åtaganden än att den ska ske på ett optimalt sätt.

Även om datareduktion är viktigt innebär det dock inte att övriga kvalitetsteman inte tas i beaktning. Upplösning är ett av de kvalitetsteman som är avgörande eftersom det styr detaljrikedomen i modellen. Upplösningen hänger dels ihop med datareduktion eftersom utförlig datareduktion leder till lägre upplösning, men flera av intervjupersonerna betonade även begränsningar i indata som en stor faktor. Flera använder sig av Nationella Höjdmodellen eller Laserdata Skog (punkttäthet på ca 1 punkt/m²). Det går att samla in mer detaljerade data men det är förenligt med höga kostnader och görs därför ofta bara i sådana områden som bedöms extra intressanta eller där den ursprungliga indatan är bristfällig.

Lägesosäkerheten i både plan och höjd är även det en av de absolut viktigaste kvalitetsteman som behandlas. Intervjupersonerna bevakar framförallt lägesosäkerheten i indatan som uppges av leverantören. Detta kompletteras sedan med visuella kontroller av modellen. Inom forskning och i viss utsträckning produktion, sker dock en del statistiska utvärderingar av lägesosäkerheten. Vanliga metoder som används för att utvärdera modeller är medelfelet (RMSE) och medelabsolutfelet (MAE). Lägesosäkerheten finns både i plan och höjd och att utvärdera respektive enskilt är svårt, särskilt i kuperad terräng, vilket leder till att lägesosäkerheten endast utvärderas i höjddled. Dessutom kan fel i plan ge utslag som fel i höjd såsom visas i figur 5.1, och om fel i plan inte ger utslag i fel i höjd på exempelvis plana ytor är effekten av felet obefintlig. Vidare så används punkter från punktmolnet som hörnpunkter i TIN-modeller vilket innebär att osäkerhet från punktens inmätning följer med i TIN-modellen. HMKs standardnivåer innehåller riktmärken och krav på bland annat lägesosäkerhet vilka kan användas beroende på modellens syfte.

8.2 Val av fallstudier

Det finns flertalet praktiska undersökningar som kan göras både avseende kvalitetspåverkande faktorer och olika kvalitetsteman. Eftersom kraven för TIN-modellen varierar avsevärt beroende på dess syfte är det lämpligt att genomföra fallstudier med mer än en datamängd, över olika områden och med olika syften för TIN-modellen.

Lägesosäkerhet framgick som nämnt som en av de viktigaste kvalitetsteman i arbetet med höjdmodellen för intervjupersonerna. Dock fanns det väldigt lite insyn i hur lägesosäkerhet påverkas i just produktionsprocessen. Detaljriktighet och optimering av datamängdens storlek för att göra den hanterbar, var även viktiga aspekter i bedömning av en höjdmodells kvalitet. Fallstudierna kommer därför undersöka hur lägesosäkerhet påverkas av datareduktion i produktionsprocessen.

Testerna genomförs med två datamängder, i form av laserskannade punktmoln och brytgeometrier, som testdata. Den ena datamängden är insamlad över bland annat bostadsområdet Lorensborg i stadsdelen Hyllie i Malmö, och den andra är insamlad över Lycksta äng i Örskälljunga. Datamängderna skiljer sig åt i egenskaper och syften. Även om båda datamängderna kompletteras av brytgeometrier skiljer sig även deras egenskaper åt vilket leder till olika hantering.

Då syftet med höjdmodellen är viktigt för att bedöma dess kvalitet och indatans lämplighet att användas för att producera höjdmodellen anpassas syftena till detta i testerna. För datamängden över Lorensborg, som täcker en hel stadsdel, är syftet att modellen ska användas i detaljplaneringssyfte vilket innebär en ungefärlig lägesosäkerhet om maximalt ca 0,1 meter i enlighet med HMK-standardnivå 2 (se tabell 5.3). För datamängden över Lycksta äng hade ett lämpligt syfte varit att höjdmodellen ska användas i projekteringssyfte och ha en maximal standardosäkerhet om 0,05 meter i enlighet med HMK-standardnivå 3 (se tabell 5.3). Dock begränsas testerna av lägesosäkerheten hos indatan som är 10 cm i höjd vilket ligger väl utanför intervallet för HMK-standardnivå 3. Därav bestäms även detta syfte som för detaljplan, om än för ett mindre område och med hårdare krav avseende avvikelse från lägesosäkerhet. Då är det alltså en maximal lägesosäkerhet i höjd på ca 0,1 meter även i denna fallstudie.

8.3 Data och studieområde

Både datamängderna och studieområdet de representerar har betydande likheter men även stora skillnader. En tillräckligt utförlig beskrivning av båda är essentiellt för att användare ska kunna göra kvalitetsbedömningar av följdprodukter såsom TIN-modeller.

8.3.1 Malmö

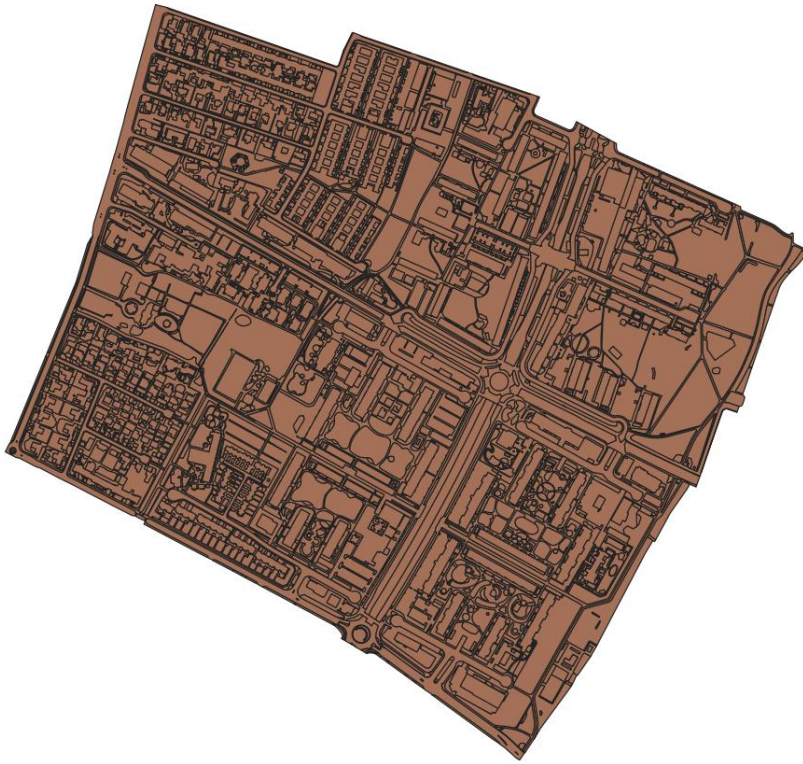
Datamängden Malmö, som innehåller delar av områdena Lorensborg, Solbacken och Bellevuegården, representerar ett område som är ca 90 hektar stort och innehåller flerbostadshus, enbostadshus, större vägar och grönytor (se figur 8.1). Datamängden består av punktmoln, GRID och brytgeometrier i 2D. Punktmolnet är samma data som intervjuperson 1 använder sig av och producerade av en extern leverantör av laserdata. Det har en beställd punkttäthet på ca 20 punkter/m² och en lägesosäkerhet på 5-10 cm i höjd. Den verkliga

punkttätheten är dock betydligt högre än den beställda punkttätheten i stora delar av området (35-40 punkter/m²). Höjddata finns även i ett höjdsatt GRID-format med 1x1 meters upplösning. Både punktmoln och GRID täcker en större yta än vad som undersöks vilket hanteras i förbearbetning genom att klippa ut arbetsområdet. Punktmolnet är klassificerat i markpunkter och övriga punkter.



Figur 8.1: Ungefärlig bild över testområdet Malmö med reservation för mindre avvikelser (Lantmäteriet u.å.b).

Brytgeometrierna är desamma som intervjuerson 1 använder och består av 2-dimensionella marktäckedata. De är polygoner i en shape-fil (se figur 8.2) där varje polygon består av ett specifikt marktäckeslag exempelvis gräsmark, asfalt och betong. Brytgeometrierna har levererats av Malmö stad och bearbetats av Lunds universitet.



Figur 8.2: Brytgeometrier över testområdet Malmö bestående av markanvändningsgränser.

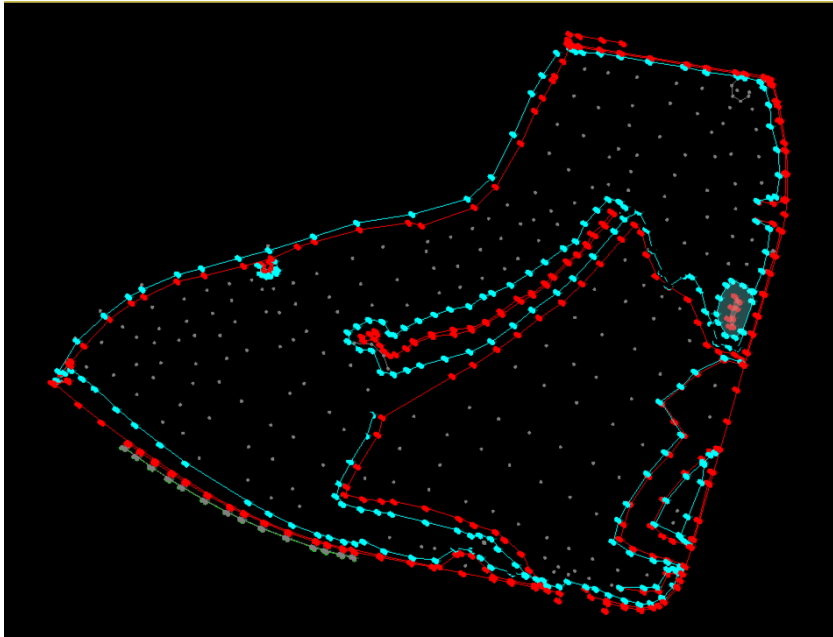
8.3.2 Örkejjunga

Området i Örkejjunga är ca 3 hektar stort och täcker framförallt det som kallas Lycksta äng (se figur 8.3). Punktmolnet kommer ursprungligen från den första nationella laserskanningen som genomfördes 2009 till 2017 av Lantmäteriet och har en punkttäthet på minst 0,5-1,0 punkter/m². Punktmolnet har en lägesosäkerhet lägre än 0,1 meter på plana, hårdgjorda ytor som är optimala ur ett datainsamlingsperspektiv. Även detta punktmoln har klassificerade markpunkter.



Figur 8.3: Ungefärlig bild över testområdet Örskelljunga med reservation för mindre avvikelser (Lantmäteriet u.å.b).

Brytgeometrierna (se figur 8.4) är insamlade med geodetisk detaljmätning och består av flertalet geometrier klassificerade enligt Trafikverkets (dåvarande Vägverkets) Rithandbok *Mät och Kartering*. Brytgeometrierna består av både brytlinjer och brytpunkter. Flera av brytpunkterna är allmänna höjdpunkter och representerar alltså inte ett specifikt objekt utan är en väl inmätt punkt i terrängen som ger god referens över plana ytor. Brytgeometrierna har en lägesosäkerhet i höjd på 3-4 cm.



Figur 8.4: Brytgeometrier över testområdet Örkelljunga med. Självständiga brytpunkter är grå, resterande bildar brytlinjer

Det är ett problem med aktualiteten i punktmolnet då det skett en del markarbeten vilket kommit med i brytgeometrierna men ej i punktmolnet. Det innebär systematiska höjdskillnader mellan punktmoln och brytgeometrier i delar av testområdet där terrängen ändrats av exempelvis markarbeten.

8.4 Metod

Utförandet av fallstudierna varierar något mellan testområdena på grund av de varierande egenskaperna i punktmoln och brytgeometrier. Det finns behov av förbearbetning av båda datamängderna. Exempelvis täcker punktmolnen ett större område än brytgeometrierna vilket kräver att arbetsområdet klipps ut. Därefter sker olika typer av datareduktion följt av att TIN-modellen genereras genom Delaunay-triangulering med olika parametervärden. Slutligen jämförs den producerade TIN-modellen med det ursprungliga punktmolnet.

Generering av TIN-modellerna och efterföljande utvärdering görs i verktyget FME. Valet av detta verktyg baseras delvis på att programvaran är tillgänglig. Det var även ett av de mer frekvent använda programmen bland intervjupersonerna.

8.4.1 Förklaringar - FME

FME (Feature Manipulator Engine) är ett rumsligt ETL-verktyg (Duggan 2020). ETL står för Extract, Transform & Load och är ett verktyg som tillåter användare att hämta data i ett format, bearbeta det och sedan ladda upp det i andra format om så önskas. Med FME finns möjligheten att med egna eller inbyggda funktioner kallade transformatorer, bygga långa automatiserande arbetsprocesser (Duggan 2020).

SurfaceModeller är en transformator in FME för att skapa höjdmodeller i olika format såsom TIN-modeller, raster och höjdkurvor (Safe Software u.å.d). Dessutom finns möjligheten att

drapera andra objekt på höjdmodellen. Höjdmodellerna skapas genom Delaunay-triangulering och kan sedan interpoleras vidare för att skapa höjdmodeller i andra format än TIN. Detta innebär att objektet som höjdsätts får samma höjd som TIN-modellen har på samma horisontella plats som objektet. De två viktigaste parametrarna i *SurfaceModeller* är *Drape Method* och *Surface Tolerance*.

Drape Method beskriver hur objekt ska draperas och har alternativen *Vertex* och *Model*. *Vertex* innebär att linjerna (som draperas i detta fall) endast får sina brytpunkter höjdsatta. En linje som går mellan ett antal punkter är alltså interpolerad mellan dessa punkter. *Model* innebär att det skapas nya punkter på linjerna när de korsar triangelkanter på TIN-modellen. Detta kan i teorin skapa bättre draperingar men det tar längre tid att genomföra och skapar även mer data. *Surface Tolerance* är den viktigaste parametern som styr hur själva TIN-modellen ser ut. Parametern fungerar som en metod för datareduktion och fungerar som så att den successivt lägger till punkter från punktmolnet till algoritmen. Om den punkten som behandlas ligger utanför det konvexa höljet som bildas av de punkter som lagts till algoritmen, läggs den till. Om punkten ligger innanför det konvexa höljet jämförs höjdskillnaden mellan punkten och den med den existerande triangelytan på samma horisontella koordinater som punkten. Om höjdskillnaden är större än det angivna värdet i *Surface Tolerance* behålls punkten, annars tas den bort. På detta sätt filtreras punkter som inte tillför mer än marginell förbättring av modellens kvalitet, exempelvis på plana ytor, bort (Safe Software u.å.d). *Interpolation Method* är även en viktig parameter för draperingen och har tre inställningar. *Planar* innebär att alla draperingar sker direkt på modellens interpolerade höjder. *Constant* innebär att drapering inte sker på interpolerade höjder utan endast på den närmaste höjdpunkten i modellen. Slutligen finns även *Auto* som draperar enligt *Planar* om det finns en yta att drapera på, annars om objektet som ska draperas ligger utanför modellen används *Constant* (Safe Software u.å.d). För draperingen i detta arbete används *Planar*.

PointCloudThinner tunnar ur punktmoln genom att filtrera punkter beroende på deras indexering. Det finns flera typer av filtreringar men den som används i dessa fallstudier filtrerar på ett intervall. Om *Intervall*-parametern är 5 innebär det att var femte punkt behålls och resterande fyra punkter filtreras bort (Safe Software u.å.b). Eftersom detta görs i stor skala leder det till en geografiskt sett jämn filtrering av punkter.

PointCloudSimplifier är en annan metod att tunna ur punktmoln. Men i denna metod behålls de punkter som är viktigast för att kunna återge höjddatan i den ursprungliga datamängden (Safe Software u.å.a). Algoritmen *Medial Axis Transform* används vilket innebär att algoritmen skapar normaler till alla punkter och därefter söker efter skärningspunkter mellan dessa normaler. Beroende på avståndet mellan punkten och skärningspunkten på normalen går det att avgöra om punkten är i varierande eller plan terräng. Ett kort avstånd indikerar varierande terräng vilket betyder att punkten troligen är bra att behålla. *Filter Ratio* är den viktigaste parametern och styr hur mycket punktmolnet ska tunnans ut. Ett högre värde innebär att fler punkter tas bort (Safe Software u.å.a).

TINGenerator skapar TIN-modeller genom Delaunay-triangulering, alternativt constrained Delaunay-triangulering om brytgeometrier används (Safe Software u.å.e). Metoden liknar den

som används i *Surfacemodeller* och även här är det *Surface Tolerance* som används för att filtrera bort punkter (Safe Software u.å.e).

SurfaceDraper har liknade funktion som *SurfaceModeller* men med färre funktioner (Safe Software u.å.c). I detta arbete används *SurfaceDraper* för att drapera punktmolnet på den genererade TIN-modellen. Istället för att skapa TIN-modellen hämtas den direkt från *TINGenerator*.

WorkspaceRunner tillåter användaren att komma åt och köra ett annat FME-skript. Detta lämpar sig när användaren vill genomföra flera körningar av det andra skriptet i följd eftersom den automatiskt läser av nästa uppsättning parametrar och genomför körningen tills dess att det inte finns fler parametrar att använda (Safe Software u.å.f).

8.4.2 Förbearbetning av data – Malmö

Då punktmolnet täcker betydligt större yta än testområdet klipps testområdet ut med brytgeometrierna som mall. För att undvika problemet med kanteffekter buffras området med 10 meter (se Appendix C.1).

Eftersom brytgeometrierna är 2-dimensionella behöver de höjdsättas för att fungera som brytlinjer. För detta används *SurfaceModeller* och brytlinjerna draperas på den skapade TIN-modellen. I förevarande fallstudier skapas två versioner av brytlinjerna höjdsatta på olika sätt (se Appendix C.2). Den ena skapas med *Vertex*-metoden med *Surface Tolerance* 0. Den andra skapas med *Model*-metoden med *Surface Tolerance* 0,01. Normalt är det önskvärt att ha en så högupplöst modell som möjligt för att kunna höjdsätta brytlinjerna så korrekt som möjligt. Tester visade dock att en för högupplöst modell leder till att väldigt många nya brytpunkter skapas längs med brytlinjerna vilket i sin tur leder till smala trianglar i den slutliga TIN-modellen, vilket inte är önskvärt. Att *Surface Tolerance* inte är 0 i detta fall är alltså för att balansera kvalitet av höjdsättningen med antalet punkter.

8.4.3 Förbearbetning av data – Örkelljunga

Först och främst måste punktmolnet konverteras till Sweref 99 13 30 som är det koordinatsystem som samtliga tester sker i (se Appendix C.3). Då punktmolnet kommer från en nationell datamängd är det ursprungligen i Sweref 99 TM.

Likt testområdet över Lorensborg täcker punktmolnet över Lycksta äng ett betydligt större område än det som ska undersökas och behöver klippas. Då brytgeometrierna i denna datamängd redan är i form av punkter och linjer till skillnad från Lorensborg-datamängden (som är polygoner) krävs ett annat tillvägagångssätt för att klippa ut arbetsområdet. Istället för att klippa direkt efter brytgeometrierna skapas ett polygonlager i QGIS, som är ett open source GIS-program, som täcker hela testområdet. Eftersom punktmolnet är inaktuellt i delar av testområdet på grund av påbörjade markarbeten skapas en polygon i QGIS som endast täcker de delar av testområdet som har aktuella data i punktmolnet.

Till skillnad från brytgeometrierna för Lorensborg är de för Lycksta äng redan höjdsatta vilket innebär att ingen höjdsättning krävs. Dock innehåller datamängden en del objekt som är

relevanta ur projekterings syfte men inte för generering av TIN-modeller och dessa sorteras således bort (se Appendix C.5).

8.4.4 Datareduktion – Malmö

I testerna med testdata över Lorensborg genomförs tester utan datareduktion, och *PointCloudThinner* med reduktionsintervall om 2 (varannan punkt tas bort). *PointCloudSimplifier* används även och trots att den algoritmen är mer resurskrävande är den även mer sofistikerad och ämnad att behålla viktiga punkter. Därför genomförs fler tester med *PointCloudSimplifier*. Det genomförs tester med fem olika värden på filtreringskvoten (0,01, 0,1, 0,2, 0,5 & 0,8).

8.4.5 Datareduktion - Örskelljunga

Lycksta äng har en betydligt mindre datamängd, dels med hänsyn till testområdets geografiska storlek men även till punkttätheten. Dock genomförs även datareduktion under testerna med denna datamängd. För jämförelse mellan testområdena genomförs samma tester med datamängden för Lycksta äng som för Lorensborg med avseende på datareduktion. Utöver det genomförs även ett test där inget punktmoln används som indata i produktionsprocessen. Detta är möjligt eftersom det finns brytpunkter någorlunda jämnt fördelade över hela testområdet som kan användas som substitut.

8.4.6 Triangulering

Generering av själva TIN-modellen sker med *TINGenerator* och värdena som *Surface Tolerance* tilldelas är 0 (ingen filtrering), 0,01, 0,1, 0,2, 0,5 & 0,8. På detta sätt kan även kombinationen av datareduktion genom *PointCloudThinner*, *PointCloudSimplifier* & *TINGenerator* studeras. FME-skript för datareduktionen och trianguleringen återfinns i Appendix C.6.

8.4.7 Genomförande av tester

För att genomföra testerna sätts ett Excel-ark upp med alla kombinationer av testparametrar som ska testas (se tabell 8.1 & 8.2). För detta skapas en separat arbetsyta (ett förälderskript) i FME (se Appendix C.8). Ett förälderskript kallar på och kör ett annat skript när det körs. I förevarande fall körs skriptet i Appendix C.6 & C.7 där datareduktion, triangulering och utvärdering genomförs. Med hjälp av *WorkspaceRunner* körs skriptet en gång för varje testrad i Excel-arket.

Tabell 8.1 Testparametrar som används i FME - Malmö

Brytgeometri	Datareduktion* (Interval/Filter Ratio)	TINGenerator Surface Tolerance
Ingen	Ingen**	0
VERTEX	PointCloudThinner (2)	0,01
MODEL	PointCloudSimplifier (0,01)	0,1
	PointCloudSimplifier (0,2)	0,2
	PointCloudSimplifier (0,5)	0,5
	PointCloudSimplifier (0,8)	0,8

**Med datareduktion i detta fall menas den som sker genom PointcloudThinner eller PointCloudSimplifier. Ytterligare datareduktion kan ske i TINGenerator.
**Om ingen datareduktion sker skapas ingen TIN-modell med Surface Tolerance 0 i TINGenerator.*

Dessutom genomförs även tre tester med GRID-filen som omvandlats till LAS-format. Ett test utan brytgeometrier, ett med *Vertex*-brytgeometrier och en med *Model*-brytgeometrier. För dessa tester sker ingen datareduktion.

Tabell 8.2 Testparametrar som används i FME - Örskelljunga

Indata	Datareduktion* (Interval/Filter Ratio)	TINGenerator Surface Tolerance
Punktmoln	Ingen**	0
Punktmoln & Brytgeometrier	PointCloudThinner (2)	0,01
Endast brytgeometrier***	PointCloudSimplifier (0,01)	0,1
	PointCloudSimplifier (0,2)	0,2
	PointCloudSimplifier (0,5)	0,5
	PointCloudSimplifier (0,8)	0,8

**Med datareduktion i detta fall menas den som sker genom PointcloudThinner eller PointCloudSimplifier. Ytterligare datareduktion kan ske i TINGenerator.
**Om ingen datareduktion sker skapas ingen TIN-modell med Surface Tolerance 0 i TINGenerator.*

****Om endast brytgeometrier används sker ingen datareduktion, inte heller i TINGenerator.*

8.4.8 Utvärderingsmetoder

I enlighet med *HMK-Höjdmodell 2023* bör kvalitetskontrollerna genomföras som visuella kontroller eller kontroller gentemot modeller med lägre osäkerhet. Eftersom bättre modeller saknas genomförs istället visuella kontroller samt kvantitativa utvärderingar gentemot det ursprungliga punktmolnet. För att utvärdera hur lägesosäkerheten påverkas genom interpoleringen mäts felet i modellen jämfört med indatan för alla punkter i punktmolnet som inte utgör hörnpunkter i TIN-modellen (Se Appendix C.7). Genom att drapera punktmolnet på höjdmodellen och beräkna differensen mellan den ursprungliga och den draperade höjden av punkten erhålls interpoleringsfelet för varje punkt och i förlängningen för höjdmodellen. Därefter beräknas interpoleringsfelet som medelfel och medelabsolutfel. Den totala lägesosäkerheten (i höjd) för TIN-modellen beräknas sedan genom att ta interpolationsfelet,

beräknat som medelfelet, och spridningsorsäkerheten i form av lägesosäkerheten från punktmolnet och använda felfortplantningsformeln (6.1). Utöver detta beräknas hur många punkter som använts för att producera höjdmodellen som ett mått på hur mycket av indatan som reducerats. Utifrån ovanstående lagras följande attribut för varje genomfört test:

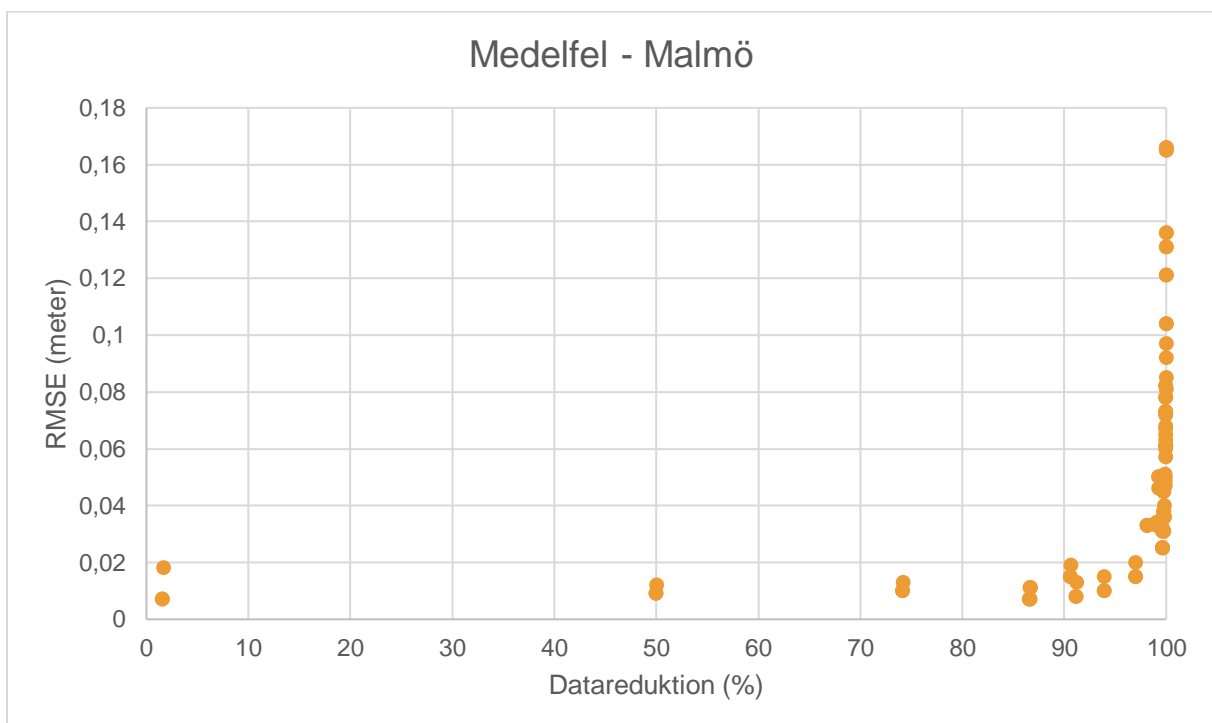
- RMSE
- MAE
- Lägesosäkerhet
- Hur många punkter som försvunnit i datareduktion och generering av TIN-modellen
- Största positiva och negativa avvikelser.

8.5 Resultat

Resultaten av fallstudierna visar att reduktionsmetoderna har påverkan på hur mycket data som används i höjdmodellen. Fullständiga resultat finns i Appendix D.

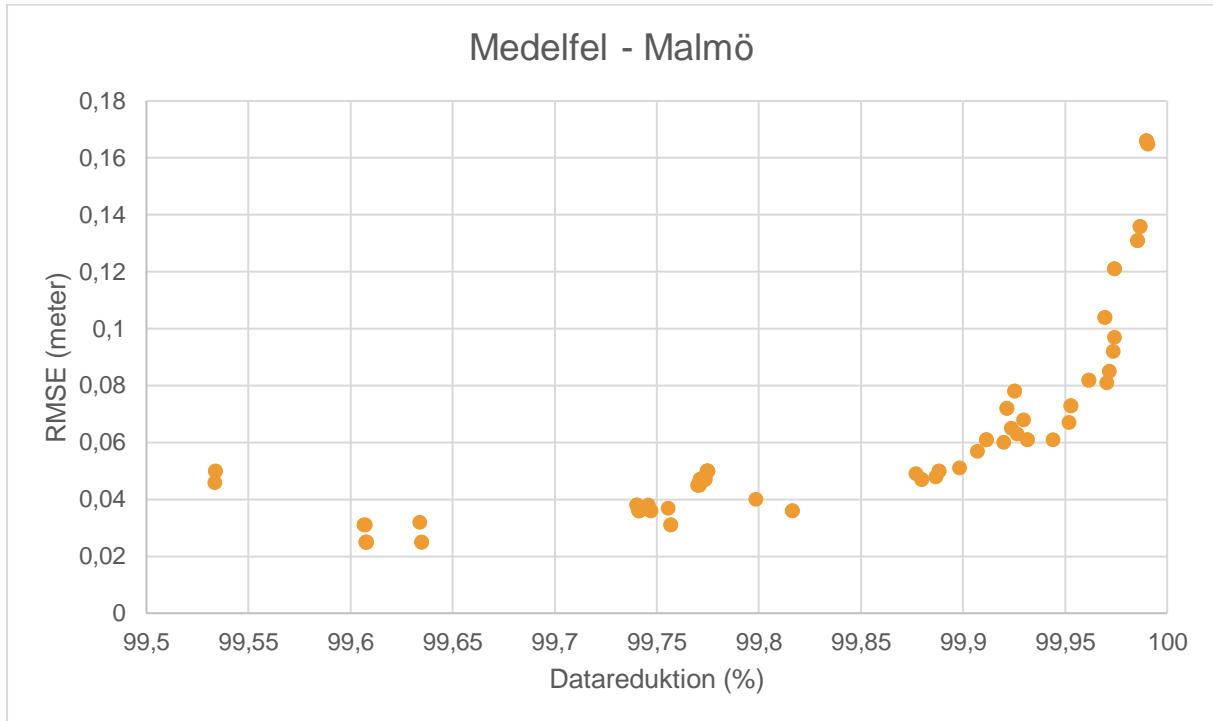
8.5.1 Resultat - Malmö

Fallstudietesterna med datamängderna över testområdet i Lorensborg visar att datareduktion i produktionsprocessen kan ha stor påverkan på kvaliteten i den efterföljande modellen med avseende på framförallt lägesosäkerheten (se figur 8.5). Dock kan stora mängder av ursprungsdatan reduceras bort i produktionsprocessen innan det påverkar den efterföljande modellen avsevärt. Även låga värden på reduktionsparametrarna leder till att stora mängder data sorteras bort.



Figur 8.5: Medelfel och datareduktion (hur många punkter som tagits bort) för samtliga tester med testområdet i Malmö.

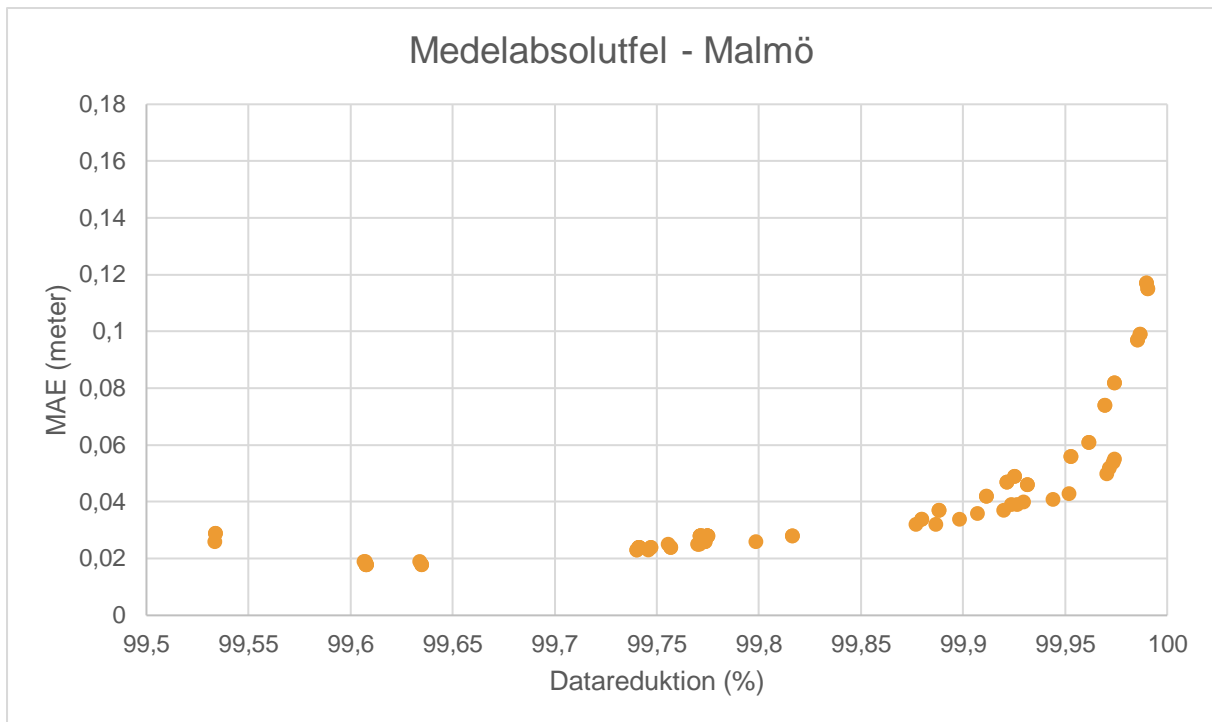
Medelfelet pendlar mellan 7 mm och 2 cm med datareduktion upp till 90%. Dock ska det noteras att det är väldigt få mätvärden inom intervallet. Vid ca 85% datareduktion kan en uppåtgående trend anas även om medelfelet fortfarande är litet. Denna trend fortsätter gradvis till dess att medelfelet ligger runt 3 cm vid en datareduktion om ca 99,5% (se figur 8.6).



Figur 8.6: Inzoomad version av figur 8.5 visande medelfel och datareduktion.

Efter ca 99,5% datareduktion börjar medelfelet öka markant. Medelfelet ligger på ca 5 cm vid 99,9% datareduktion och har ökat med hela 2 cm vid en reduktion med ytterligare 0,05 procentenheter vilket i detta fall innebär en halvering av datamängden som är kvar. Ytterligare datareduktion upp mot 99,99% innebär en stor ökning av medelfelet upp över 16 cm.

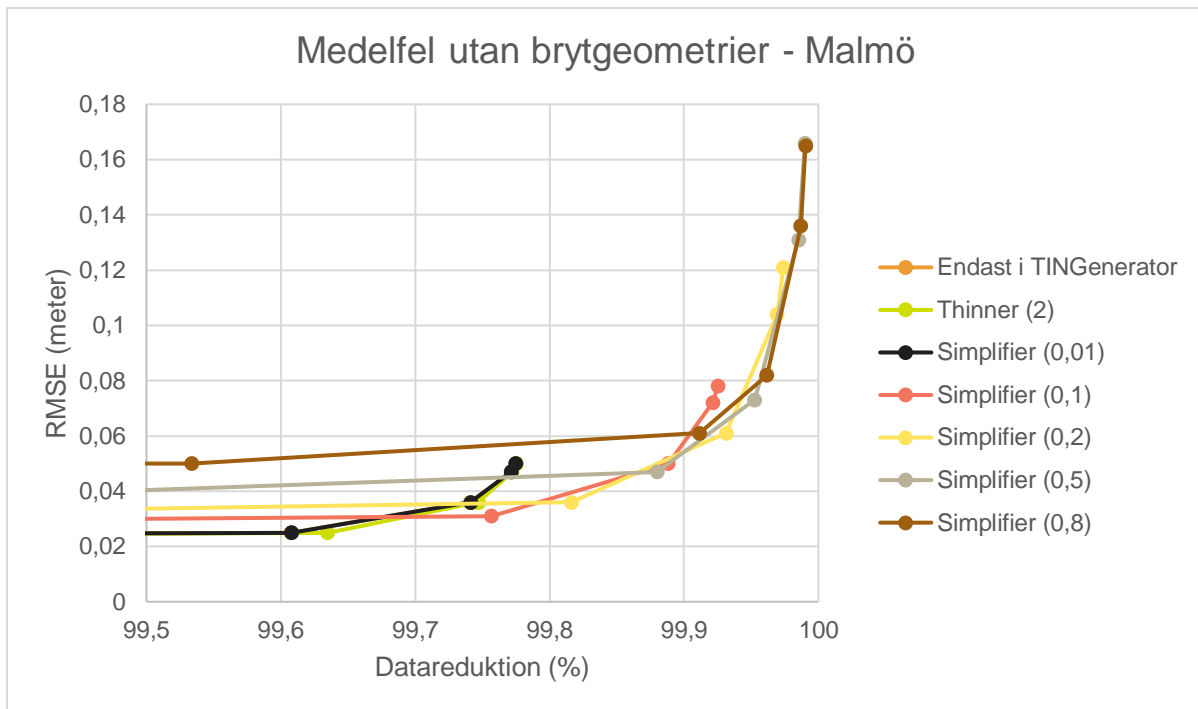
Medelabsolutfelen är generellt lägre än medelfelen. Dessutom är medelabsolutfelen mer samlade än medelfelen (se figur 8.7). Skillnaden mellan medelabsolutfel och medelfel indikerar dock att det finns en del stora fel vilket medelfelet ger större utslag för.



Figur 8.7: Medelabsolutfel och datareduktion för samtliga tester med testområdet i Malmö.

Med hänvisning till HMK-standardnivåer och den maximala lägesosäkerheten i höjd ska den sammanlagda osäkerheten inte överstiga ca 10 cm sett till syftet med att producera TIN-modellen. Eftersom punktmolnet har en egen lägesosäkerhet i höjd om 5-10 cm (vilket antas vara 10 cm för att inte underskattning av osäkerheten ska ske) lämnas till synes inget utrymme för interpoleringsfel. Dock visar resultaten att den sammanlagda lägesosäkerheten fortsätter vara runt 10 cm trots att medelfelet är flera centimeter. Exempelvis krävs ett medelfel på drygt 4,5 cm för att den sammanlagda lägesosäkerheten ska nå 11 cm.

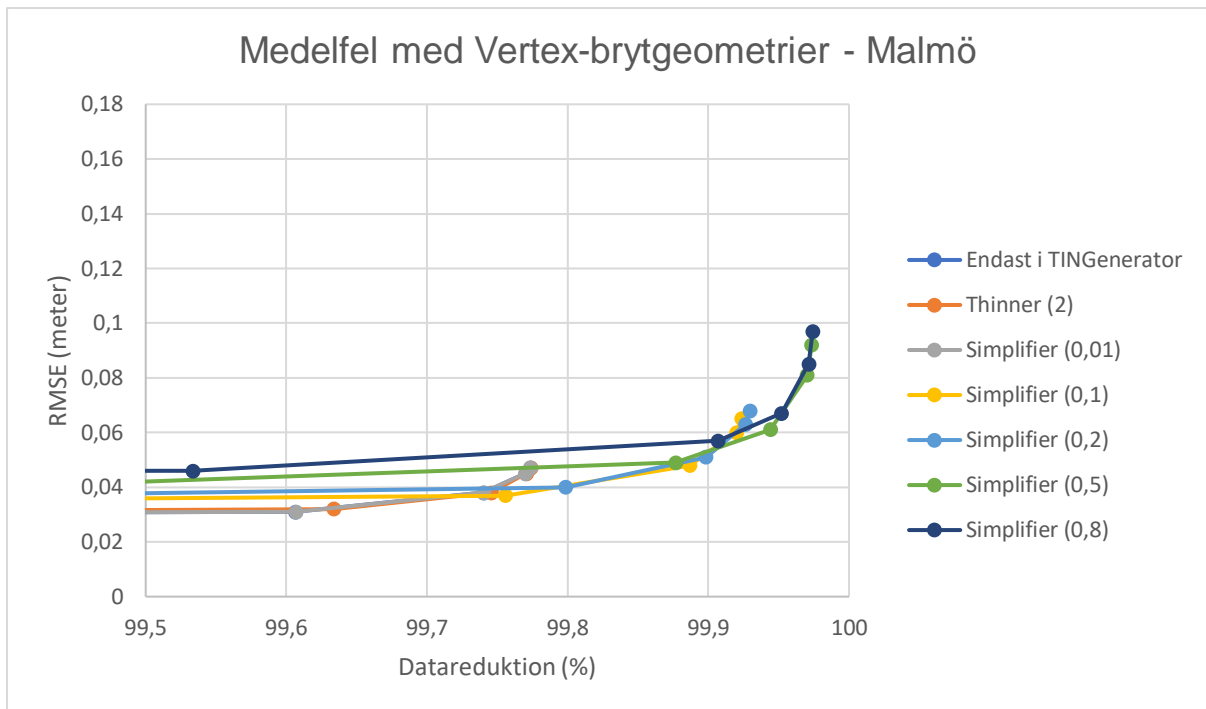
De två brytgeometrierna visade sig ha något olika påverkan på såväl datareduktionen som medelfelet (se figur 8.8 & 8.9). När brytgeometrier skapade med *Model*-metoden används har det nästintill ingen påverkan på medelfelet eller datareduktion jämfört med om inga brytgeometrier används vid trianguleringen, även vid utförlig datareduktion.



Figur 8.8: Medelfel med serier av olika datareduktionsmetoder utan brytgeometrier där det endast är *Surface Tolerance* i *TINGenerator* som påverkar resultaten inom varje serie.

Medelfelet är relativt grupperat och följer samma kurva oberoende av reduktionstyp med vissa avvikelser och undantag. När mycket datareduktion sker i reduktionsfasen men mindre sker i *TINGenerator* och vice versa, har den producerade modellen större medelfel i vissa intervall av datareduktion. Exempelvis är medelfelet som störst vid förhållandevis lägre datareduktion när *PointCloudSimplifier* används med *Filter Ratio* på 0,8 meter. Dock följer emellertid serien övriga kurvor vid höga reduktionsvärden. Med endast reduktion i *TINGenerator* och reduktion med *PointCloudSimplifier* med *Filter Ratio* på 0,01 meter är medelfelet lägst av serierna vid lägre datareduktion men kurvan har en tidigare brant jämfört med övriga serier.

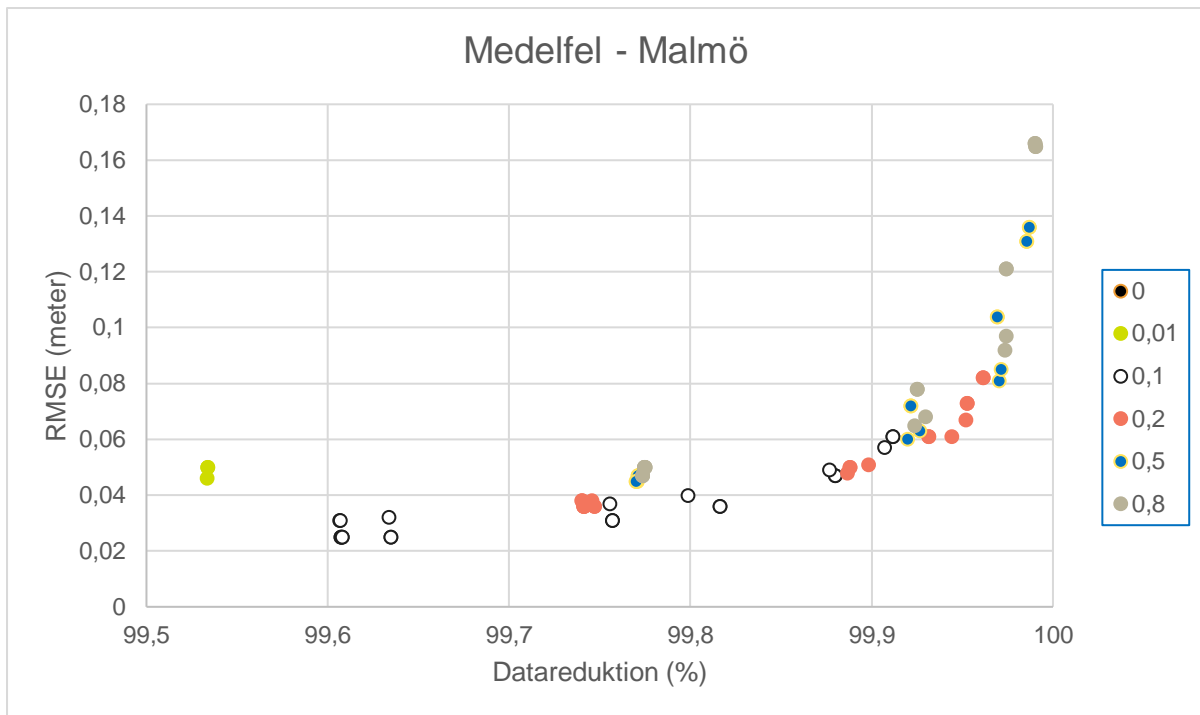
Vertex-brytgeometrier har en betydligt större påverkan på medelfelet men även datareduktionen jämfört med *Model*-brytgeometrier (se figur 8.9).



Figur 8.9: Medelfel med serier av olika datareduktionsmetoder med *Vertex*-brytgeometrier där det endast är *Surface Tolerance* i *TINGenerator* som påverkar resultaten inom varje serie.

Serierna med *Vertex*-brytgeometrier följer ungefär samma kurva som serierna med *Model*- och inga brytgeometrier. Dock är serierna något mer samlade än motsvarande serier med andra brytgeometrier med avseende på medelfelet vid ett visst mått av datareduktion. *Vertex*-brytgeometrierna innebär en något lägre datareduktion men även ett något lägre medelfel jämfört med motsvarande TIN-modeller skapade med samma parametrar men annan eller ingen brytgeometri.

När testerna grupperas avseende *Surface Tolerance* (se figur 8.10) visar resultaten att *Surface Tolerance* har stor inverkan på både datareduktion och medelfel. Även om det finns trender i dessa grupper med blir det tydligt att det inte är den enda parametern som påverkar medelfelet, då det finns punkter i samma grupper med ungefär samma mått på datareduktion med olika medelfel.



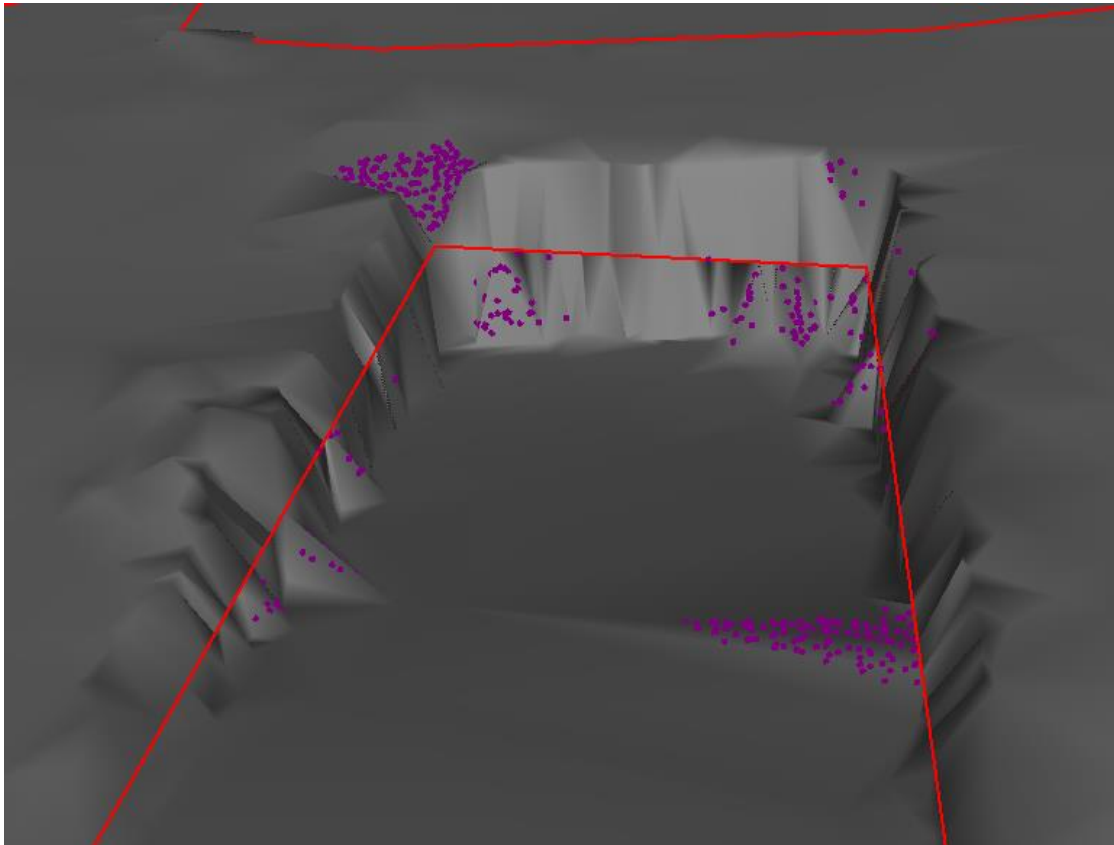
Figur 8.10: Medelfel och datareduktion grupperat på *Surface Tolerance* i *TINGenerator*.

Då flera av grupperna överlappar ger det en indikation att dessa följer samma kurva. Dock visar testerna att extremvärden på *Surface Tolerance* såsom 0 eller 0,8, innebär att det är svårare att uppnå både hög grad av datareduktion och lågt medelfel. När *Surface Tolerance* är 0 är datareduktionen lägre vilket är förväntat då det inte sker någon filtrering alls i det steget. När parametern har värdet 0,8 är resultaten de med högst medelfel men även med högst datareduktion. Dock är medelfelen i denna grupp höga vid låg datareduktion i förhållande till andra grupper.

När GRID, konverterat till punktmoln, används istället för det ursprungliga punktmolnet blir medelfelet 5,7, 5,5 och 5,7 cm respektive när ingen brytgeometri, *Vertex*- och *Model*-brytgeometrier används. Resultaten visar även på en datareduktion på 100% vilket blir missvisande eftersom de interpolerade punkterna från GRID:et inte finns i det ursprungliga punktmolnet. Ser man till antalet punkter från GRID:et innebär det en datareduktion på ca 97,3 %. Om denna metoden att skapa TIN-modell med GRID jämförs med övriga metoder använda i testerna innebär det att mer än 20 gånger mer data behövs för att ha ett så lågt värde på medelfelet jämfört med andra datareduktionsmetoder som används i kombination med det ursprungliga punktmolnet. Dock är GRID:et betydligt enklare att hantera och det går snabbare att producera TIN-modeller med hjälp av GRID istället för det ursprungliga punktmolnet, även om det reduceras i processen.

Även om TIN-modellerna överlag har lågt medelfel förekommer extremfel i samtliga tester. Detta är fel som avviker markant från övriga avvikelsevärden och inte följer distributionskurvan. Deras existens indikeras även av skillnaden mellan medelfelen och medelabsolutfelen. Visuell inspektion av TIN-modellerna visar att dessa grova fel är grupperade i områden med stora höjdvariationer (se figur 8.11). Detta förekommer i modeller skapade både med och utan brytgeometrier. På vissa av dessa platser där brytgeometrier finns

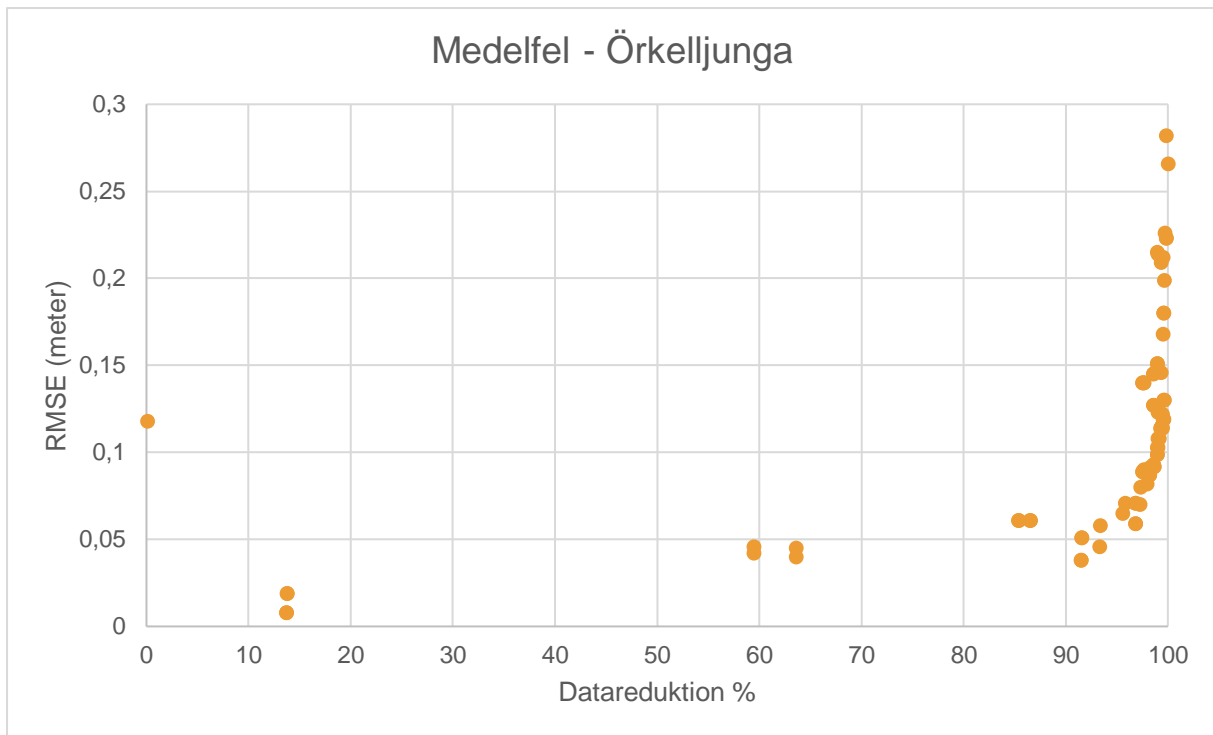
har deras höjdsättning fungerat sämre, framförallt runt exempelvis viadukter och ingångar till underjordiska garage som det finns några av inom testområdet. Störst problem med detta har *Model*-brytgeometrierna eftersom de följer en TIN-modell exakt. Dessutom finns extremfel i områden utan brytgeometrier. På flera ställen är detta områden som varierar mycket i höjdläsa som grönytor med kullar eller vallar.



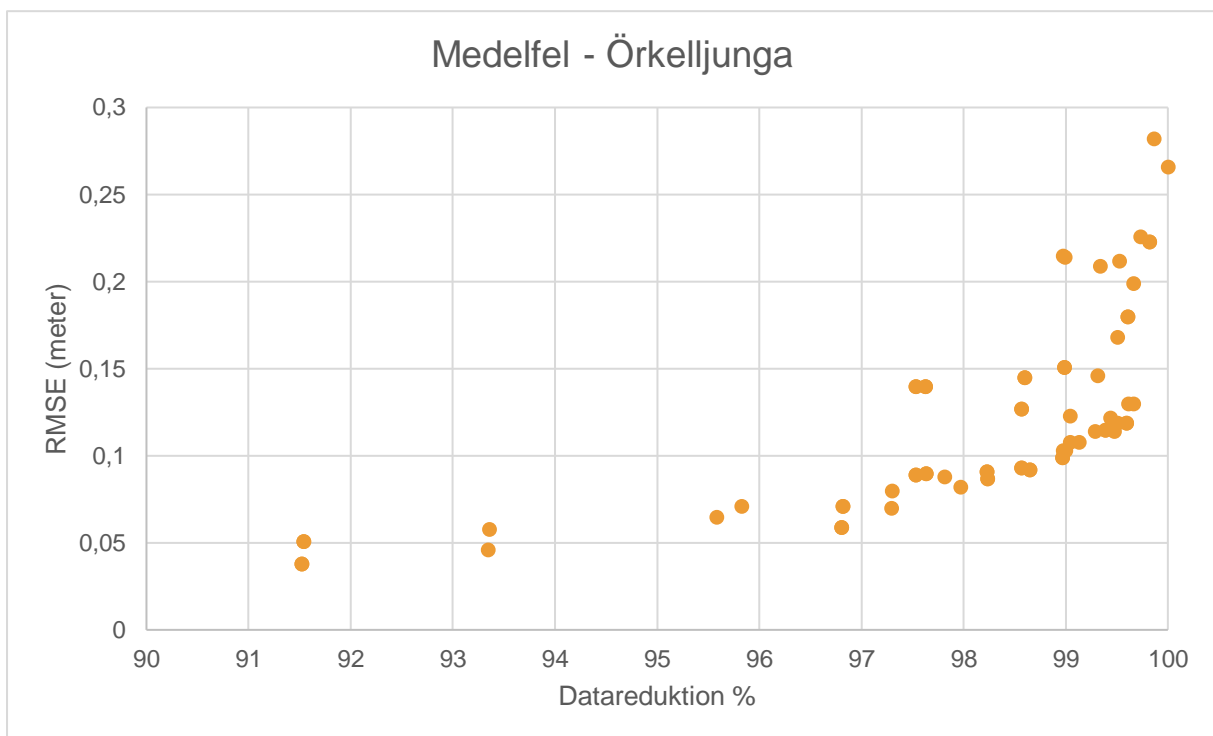
Figur 8.11: TIN-modell över en infart till underjordiskt parkeringshus. Brytgeometrierna i rött är höjdsatta enligt *Vertex*-metoden och punkterna representerar punkter med en avvikelse större än 20 cm i höjd från höjdmodellen.

8.5.2 Resultat – Örkelljunga

Precis som i testerna med datamängderna över Lorensborg visar testerna över Lycksta äng att datareduktion har visst samband med medelfelet mellan punktmoln och TIN-modell, i form av att medelfelet är större vid högre datareduktion (se figur 8.12 & 8.13). Även om vissa avvikelser förekommer även vid låg datareduktion sker en ökning av medelfelet successivt och framförallt när mer än 90 % av det ursprungliga punktmolnet reducerats bort.



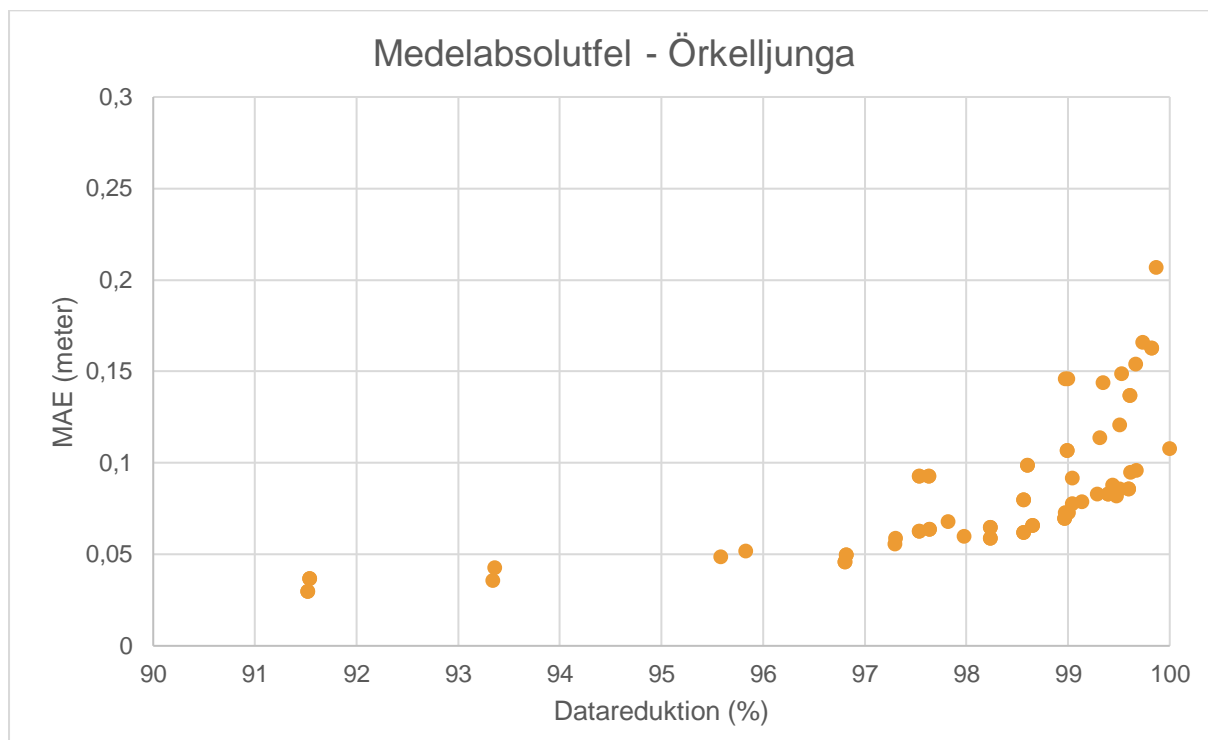
Figur 8.12: Medelfel och datareduktion för samtliga tester med testområdet i Örkelljunga.



Figur 8.13: Inzoomad version av figur 8.12 visande medelfel samt datareduktion.

Liknande testresultaten från Malmö visar det en uppåtgående trend av medelfel när datareduktionen ökar bortom en viss gräns. Dock ökar medelfelen vid betydligt lägre datareduktion än vid malmötesterna. Dessutom är det betydligt större spridning mellan resultaten vilket gör en tydlig kurva svårare att utläsa.

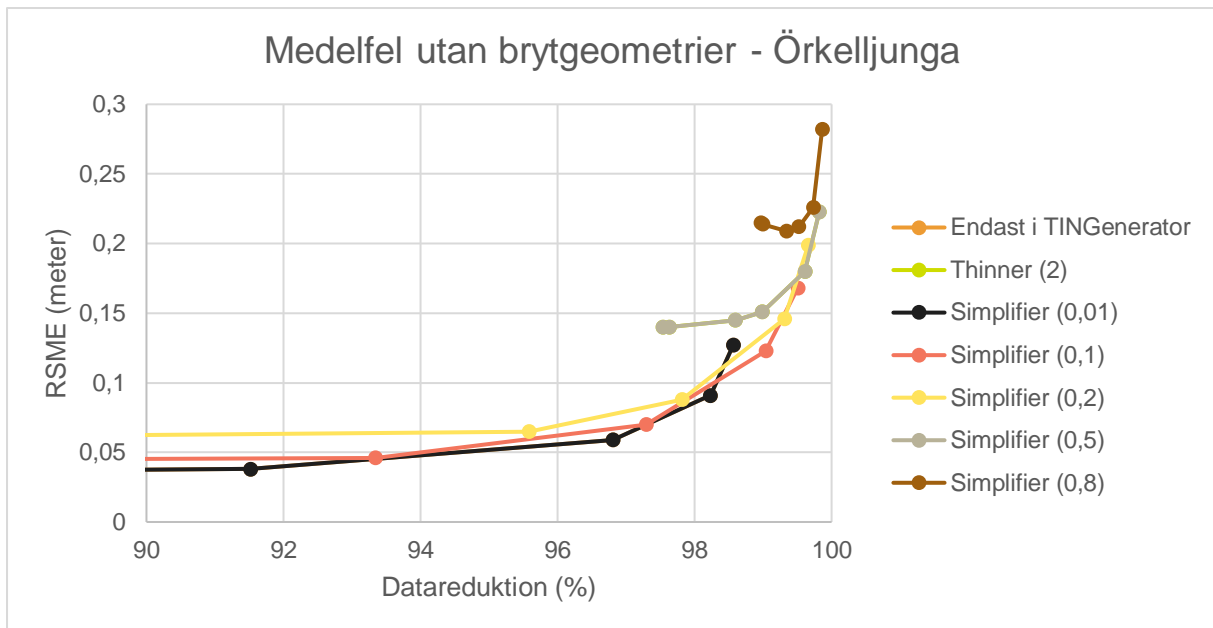
Även i Örskelljunga har medelabsolutfelen en mindre spridning och är överlag lägre än medelfelen (se figur 8.14) vilket indikerar att stora avvikelser finns avseende extremfel. Dessa är dock betydligt mindre i Örskelljunga än i Malmö vilket även indikeras i Appendix C där största positiva och negativa avvikelser redovisas för varje test.



Figur 8.14: Medelabsolutfel för samtliga tester med testområdet i Örskelljunga.

När serier för varje typ av datareduktionsmetod och parameter i dessa skapas visar de liknande trender som med malmötesterna om än med en del avvikelser. Vissa serier avviker exempelvis betydligt mer från kurvan, framförallt simplifier (0,5) och simplifier (0,8) (se figur 8.15). Dock följer de den gemensamma kurvan vid större datareduktion. Medelfelen är även överlag större i Örskelljunga än i Malmö trots mindre datareduktion, dock är det ursprungliga punktmolnet i Örskelljunga betydligt tunnare så en direkt procentuell jämförelse kan vara missvisande.

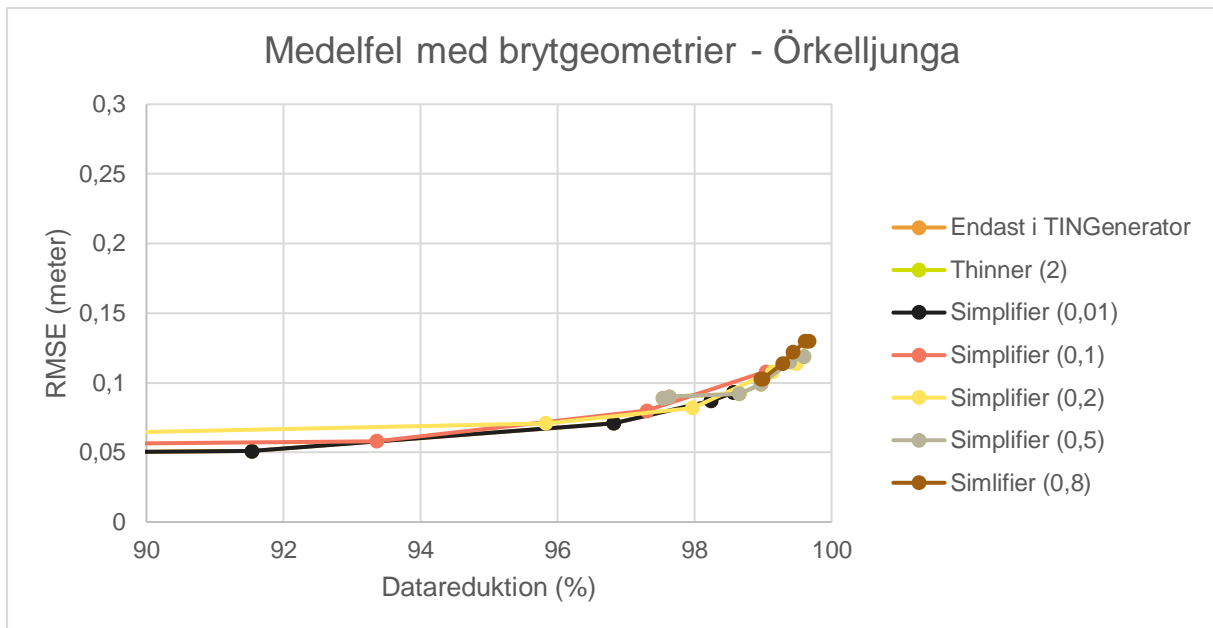
Sett till TIN-modellernas syfte som underlag för detaljplan, misslyckas fler tester med att klara kraven på total lägesosäkerhet. Dels på grund av att medelfelen är större överlag, dels på grund av att hårdare krav ställs på avvikelser i lägesosäkerhet i enlighet med valet av fallstudien.



Figur 8.15: Medelfel med serier av olika datareduktionsmetoder utan brytgeometrier där det endast är *Surface Tolerance* i *TINGenerator* som påverkar resultaten inom varje serie.

Serierna visar att vissa inställningar på datareduktionsmetod och parameter på denna kan begränsa hur mycket datareduktion som kan ske i andra steg såsom i *TINGenerator*. Används exempelvis *PointCloudSimplifier* med *Filter Ratio* på 0,8 är datareduktionen och medelfelet högt oavsett vilka värden som finns på andra parametrar. Värt att nämna är även att *simplifier* (0,01) inte producerar några mätvärden när inga brytgeometrier användes och *Surface Tolerance* är 0 vilket innebär att inga datapunkter reducerats.

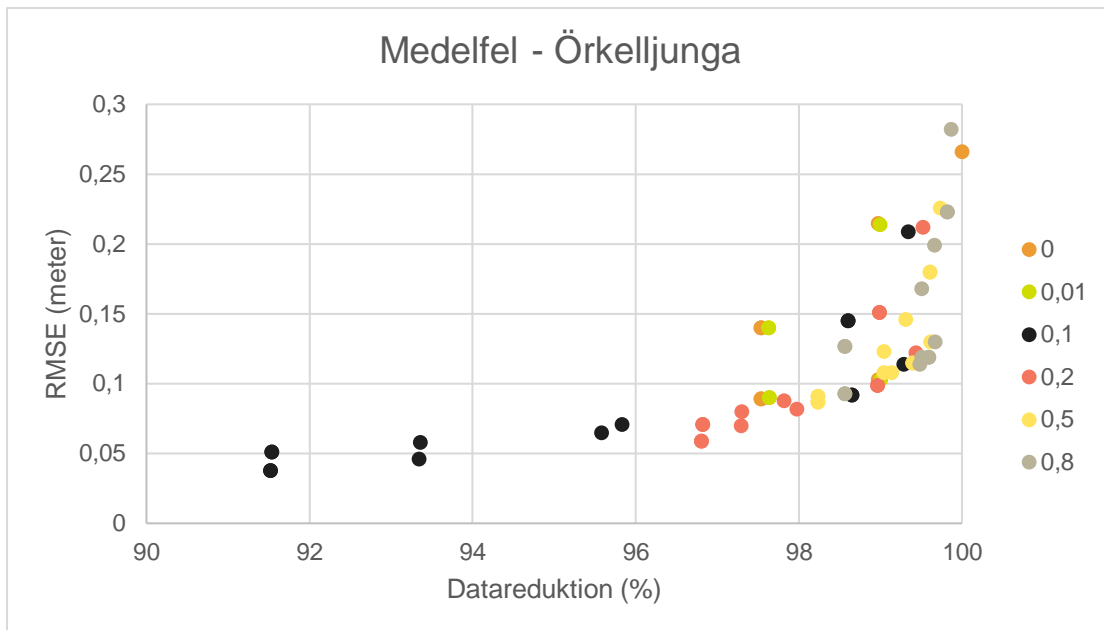
När brytgeometrier används kan betydligt större datareduktion tillåtas utan att medelfelet ökar avsevärt (se figur 8.16). Dessutom är serierna i örkelljungatexterna, likt dem i malmötexterna, mer grupperade när brytgeometrier används än när TIN-modeller genereras utan TIN-modeller.



Figur 8.16: Medelfel med serier av olika datareduktionsmetoder med brytgeometrier där det endast är *Surface Tolerance* i *TINGenerator* som påverkar resultaten inom varje serie.

När datareduktionen är begränsad har användningen av brytgeometrier en mindre, och till synes negativ inverkan på medelfelet. Effekten av deras användning är tydligast vid större datareduktion. Även om användandet av brytgeometrier medför mindre datareduktion än om TIN-modeller genereras med samma parametrar utan brytgeometrier, sänks medelfelet i betydligt större utsträckning.

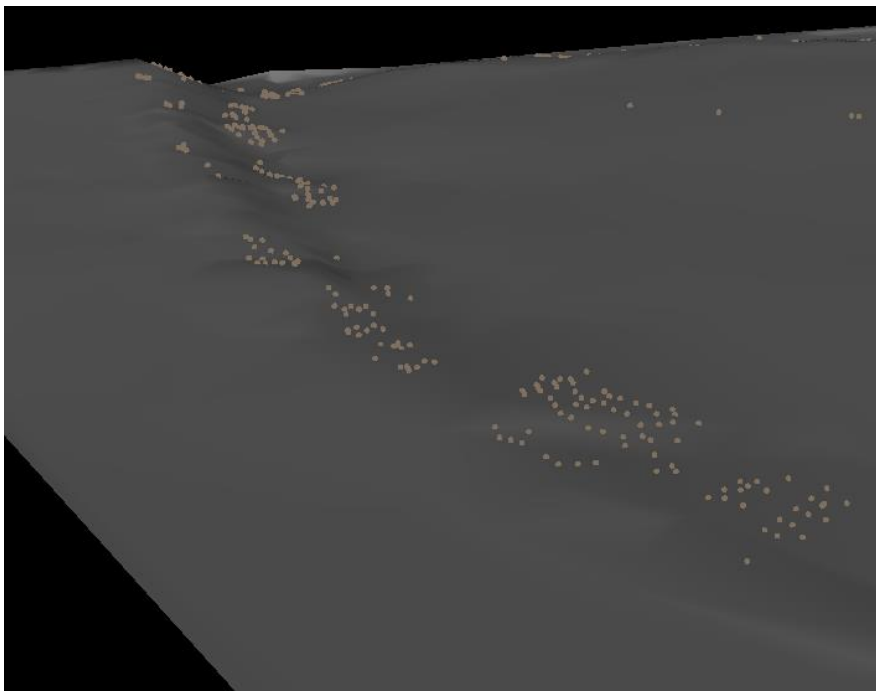
När testresultaten grupperas på värdet på *Surface Tolerance* i *TINGenerator* visar resultaten på en betydligt större spridning än i malmötesterna (se figur 8.17). Jämfört med malmötesterna överlappar grupperna varandra betydligt mer, en indikation på att *Surface Tolerance* har mindre inverkan på både datareduktion och medelfel.



Figur 8.17: Medelfel och datareduktion grupperat på *Surface Tolerance* i *TINGenerator*.

Triangulering med endast brytgeometrier skapar en modell med medelfel på 0,266 m inom utvärderingsområdet vilket är högt men ligger i nivå med övriga testresultat med hög datareduktion, framförallt de som inte använder brytgeometrier. Det är dock ett sämre testresultat jämfört med tester där både punktmoln och brytgeometrier används.

Vissa extremfel, om än mindre än i malmötesterna, finns även i örkelljungatesterna (se figur 8.18). Visuellt inspektion visar att dessa uppkommer främst i de delar av området där terrängen är mer varierande. När brytgeometrier används i trianguleringen minskar antalet grova fel stort.



Figur 8.18: Bild av kanten av testområdet som visar delar av en väg (vänster) samt åkermark (höger). Punkterna representerar de punkter som har en avvikelse större än 20 cm i höjd. Trianguleringen har skett utan brytgeometrier.

Del IV. Diskussion & Slutsatser

9. Diskussion

9.1 Kvalitetsbeskrivning av TIN-modeller

Centralt för beskrivning av TIN-modellers kvalitet är deras lämplighet att användas i ett specifikt syfte. Samtidigt förefaller lämplighetsbedömningar som subjektiva utifrån ett användarperspektiv. En av de vanligaste kontrollmetoderna bland intervjupersonerna är visuell kontroll. Visuella kontroller är problematiska då de förlitar sig på att användaren har kompetens att dels identifiera fel och osäkerheter, dels att kunna avgöra ifall de behöver åtgärdas. Kvalitetssäkringsarbete genom en utförlig beskrivning av datamängden kan underlätta bedömningsarbetet genom att ge ett tydligt bedömningsunderlag och ge indikationer på osäkerheter och fel.

Eftersom TIN-modeller ofta skapas inom samma organisation, ibland av samma person, som ska använda modellen eller görs om till exempelvis GRID innan överlämnande till annan aktör finns inte samma behov som för annan data. Exempelvis finns inte samma behov av enhetlig kvalitetsbeskrivning av TIN-modeller såsom för punktmoln, brytgeometrier eller GRID. Det innebär emellertid inte att behovet av en god kvalitetsbeskrivning inte finns. Det finns bland annat HMK-standardnivåer om höjdmodeller som alltså är tillämpliga. Att inte kunna beskriva kvaliteten i TIN-modeller som används i följdprodukter underminerar de följdprodukter som produceras med hjälp av TIN. Samtidigt betonar flera intervjupersoner att det snarare är en resursfråga som begränsar möjligheten att genomföra mer utförliga kvalitetskontroller snarare än att kompetens saknas. Därför blir egenskaper som spårbarhet, som är resursmässigt billigare, viktiga.

Spårbarhet är en egenskap som betonats i intervjuer och även en viktig del av NS-projektets specifikationer. Kombination av spårbarhet och beskrivning av andra kvalitetsparametrar i indata såsom punkttäthet och lägesosäkerhet innebär att användaren kan göra kontroller och bedömningar av TIN-modellers kvalitet gentemot verkligheten såsom gjorts i fallstudierna i detta arbete. Under förberedelserna till fallstudierna har en inte obetydlig mängd arbete lagts på att införskaffa information om datamängderna. Med förbättrad spårbarhet hade detta arbete effektiviserats och dessutom säkerställt att den information som införskaffats varit korrekt.

9.1.1 Diskussion om rekommendationer för beskrivning av TIN-modell

Det sker visserligen inget arbete med att ta fram specifikationer för att beskriva TIN-modellers egenskaper, på det sätt som NS-projektet arbetar med specifikationer för punktmoln, brytgeometrier och GRID. Trots det är det lämpligt att någon typ av standard kring produktbeskrivning finns. För att produktbeskrivningar ska kunna skapas någorlunda enkelt av skaparen av TIN-modellen och tolkas av andra personer bör de vara enkla att förstå. Utefter vad som framkommit i detta arbete skulle följande attribut vara lämpliga att inkludera som beskriver egenskaper hos indata, produktionsprocessen och den slutliga TIN-modellen:

Referens till indata är det enskilt viktigaste attributet var det gäller spårbarhet. Inom indataattributet faller dels punktmoln, dels brytgeometrier. Skulle TIN-modellen produceras med andra typer av indata exempelvis GRID, tillhör det *referens till indata*-attributet. Många andra attribut såsom punkttäthet, lägesosäkerhet och aktualitet kan hämtas direkt från indatans källa.

Geografisk täckning beskriver vilket geografiskt område TIN-modellen beskriver. Det kan skilja sig från det geografiska täckningsområdet på indatan vilket det gör i båda fallstudierna till exempel.

Koordinatsystem & Höjdsystem beskriver för andra potentiella användare om de behöver konvertera data för att kunna använda TIN-modellen i kombination med andra data.

Syfte är ett av de viktigaste attributen eftersom de sätter övriga attribut i ett sammanhang. Vissa aktörer kan tänkas vara reserverade för att dela med sig av specifik information om syften med modellen men en grundläggande beskrivning till exempel ”skyfallsanalys” är tillräcklig.

Trianguleringsmetod kan vara svår för användare att beskriva, främst eftersom alla användare inte har insikt i hur trianguleringen sker. I det optimala fallet skulle attributvärdet vara exv. ”Delaunay-triangulering” men en beskrivning av vilken funktion och programvara som använts kan även vara godtagbart.

Datareduktion är en viktig kvalitetspåverkande faktor i produktionsprocessen. Att i detalj beskriva hur datareduktion skett är inte lämpligt men det är alltså relevant att beskriva om det skett någon datareduktion av punktmolnet. Det kan även vara lämpligt att beskriva hur mycket av den ursprungliga datamängden som använts om förutsättningar finns för användaren att enkelt tillskaffa sig den informationen.

Handpåläggning kan vara exempelvis skapande av syntetiska brytgeometrier eller manuellt borttagande av punkter. En enkel beskrivning av åtgärder som utförts exempelvis ”Skapande av syntetiska brytpunkter under broar” vore tillräcklig. Det viktigaste är att redovisa om ändringar gjorts på den indata som redovisas i *referens till indata*.

Kvalitetskontroll beskriver om och hur kvalitetskontroller genomförts. Exempel på detta skulle kunna vara ”visuell kontroll” eller ”kontroll gentemot punktmoln”.

Lägesosäkerhet i både plan och höjd är som beskrivit viktiga kvalitetsteman. Dock är det inte säkert att de går att redovisa om rätt metod för kvalitetskontroll inte används. Om det går att redovisa bör den sammanlagda lägesosäkerheten för TIN-modellen jämfört med verkligheten redovisas.

9.1.2 Koppling till NS-projektet

NS-projektets specifikationer för punktmoln och brytgeometrier kan användas för att göra fullständiga kvalitetsbedömningar. Utan de attribut som finns i metadata i enlighet med specifikationerna blir kvalitetsbedömning av TIN-modeller betydligt svårare. Exempelvis har mycket tid i detta arbete lagts på att söka information om punktmoln och brytgeometrier i båda testområdena. Om specifikationer såsom de som arbetas fram i NS-projektet är tillgängliga i metadatan blir denna informationssökning både mer effektiv och säker.

9.2 Diskussion om resultat av fallstudie

Under fallstudierna undersöks främst hur datareduktion kan genomföras på olika sätt och hur detta påverkar lägesosäkerheten i höjd. Effekten av användandet av olika brytgeometrier och alternativa indatamängder utreds också. Fallstudierna visar att datareduktion har stor påverkan på lägesosäkerheten i höjdmodellerna. Användandet av brytgeometrier har blandad effekt på lägesosäkerheten beroende på ett antal faktorer.

9.2.1 Datareduktion

Resultaten av fallstudierna visar att det går att genomföra betydande datareduktion innan eller i samband med generering av TIN-modeller utan att modellen nödvändigtvis blir mindre lämplig för sitt syfte med avseende på lägesosäkerhet i höjd. Hur mycket data som kan reduceras bort varierar men det är ett rimligt antagande att ursprunglig punkttäthet och arbetsområdets komplexitet är två av de mest avgörande faktorerna för möjligheten att reducera indata. Punkttätheten är även tillsammans med arbetsområdets geografiska täckning viktiga faktorer för behovet av datareduktion från första början. Kraven på TIN-modellen som kommer av syftet samt begränsningar av TIN-modellens storlek som kommer av användarens tillgång till resurser för att producera och hantera TIN-modellen är även de avgörande faktorer.

Förekomsten av extremfel samt faktumet att de är grupperade inom vissa områden innebär att kravet som finns i *HMK-Höjdmodell 2023* och som nämns i 5.4.3 att samtliga trianglar som bildas ska uppfylla kraven på lägesosäkerhet inte uppfylls. Faktumet att de är grupperade innebär dock att detta torde vara förhållandevis enkelt att åtgärda med handpåläggning genom att bilda brytpunkter i områden med extremfel. Extremfelen uppstår i områden med varierande terräng där det i vissa fall finns mindre brytgeometrier att förlita sig på. I båda testområdena finns det brytgeometrier i närområdet men vanligtvis inte i den omedelbara närheten. Detta är inte särskilt förvånande i malmötesterna eftersom brytlinjerna följer gränser mellan markanvändning snarare än terrängformationer. Dock förekommer det även en del extremfel i örkelljungatesterna, om än mindre sett till storlek på avvikelserna. Dock ska utvärderingsmaterialet i form av punktmolnet inte tilldelas full tillit. Punktmolnet från Örkelljunga har en betydligt större lägesosäkerhet än brytgeometrierna och är mer än tio år gammalt. Föga förvånade är storleken på extremfelen större vid ökad datareduktion.

Båda fallstudierna visar att oavsett vilken metod och vilka parametervärden som används följer testresultaten ungefär samma kurva för respektive fallstudie. Denna kurva visar på en korrelation mellan datareduktion och medelfel där medelfelet ökade något upp till en viss gräns av datareduktionen där medelfelet ökade markant då datareduktionen fortsätter bortom denna gräns. Placeringen av denna gräns skiljer sig mycket åt mellan fallstudierna. I Malmö är denna gräns vid ungefär 99,5 % datareduktion medan i Örkelljunga är denna gräns ungefär vid 90%. Även om denna gräns kan ses som en typ av optimum av datareduktion innebär det inte att det är så mycket datareduktion som bör genomföras utan andra faktorer kan styra gränsen åt mer eller mindre datareduktion. Skulle det exempelvis bestämmas i malmötesterna att en total lägesosäkerhet på 11 cm är tillåtet innebär det som nämnt ett medelfel i TIN-modellen på 4,5 cm gentemot punktmolnet. Detta innebär att en datareduktion med åtminstone 99,75% skulle vara möjlig, en halvering av datamängden jämfört med optimum. Det kan även vara så att

kraven på lägesosäkerhet innebär att medelfelet måste vara under 1 cm och då är det bättre att ha en datareduktion på ungefär 85%.

Behovet av datareduktion är stort för arbete med datamängderna över Malmö. Den höga punkttätheten över ett stort område innebär att datamängderna blir väldigt svåra att hantera och visuella kontroller av TIN-modellen försvåras. Datareduktion är då ett bra verktyg för att förenkla framtida arbete med såväl punktmolnet som TIN-modellen. För datamängderna över Örkelljunga är behovet av datareduktion betydligt mindre. Punktmolnet över Malmö är drygt 2000 gånger större sett till antalet punkter än utvärderingsområdet över Örkelljunga. Att arbeta effektivt med datamängderna över Örkelljunga kräver inte nödvändigtvis datareduktion. Dock kan resultaten av testerna fortfarande studeras då det exempelvis skulle vara möjligt att liknande projekt ska bedrivas med liknande datamängder men i större skala vilket kan innebära att datareduktion är att föredra.

När datareduktionen genomförs kan det göras på flera sätt vilket visas i fallstudierna. Dessutom går det att kombinera olika sätt att genomföra datareduktion såsom gjorts i flera av testerna. Som nämnt följer de flesta av testserierna samma kurva men det finns en del avvikelser. Generellt verkar det som att en balans mellan datareduktionen som sker i *PointCloudThinner* eller *PointCloudSimplifier* och den som sker i *TINGenerator* är lämpligt för att uppnå hög datareduktion med begränsat medelfel. Datareduktionen fungerar som sämst med avseende på medelfelen när exempelvis det sker datareduktion genom *PointCloudSimplifier* med *Filter Ratio* på 0,01 och *Surface Tolerance* på 0,8 eller vice versa. Det verkar alltså inte vara bra att kombinera transformatorer som reducerar mycket med andra som reducerar lite. Det skulle kunna vara så att de olika filtreringsmetoderna har olika styrkor och svagheter när det gäller att filtrera bort punkter som är mindre viktiga i modelleringen. Svagheter skulle då kunna ha större inverkan på modelleringen vid höga parametervärden. När flera metoder används jämnt uppnås bättre resultat. Då mycket filtrering istället sker genom en av transformatorerna filtreras punkter bort som är användbara i trianguleringen eftersom höga parametervärden används. Även om låga parametervärden i sig indikerar ett lågt medelfel krävs höga parametervärden i det andra reduktionssteget för att uppnå högre datareduktion vilket medför större medelfel sett till mängden datareduktion.

Att använda *PointCloudThinner* är ett enkelt sätt att reducera datamängden men den verkar vara mycket bättre i malmötesterna där det är hög punkttäthet. I örkelljungatesterna presterar metoden betydligt sämre. Vill användaren genomföra utförlig datareduktion är det bra om höga parametervärden används och motsvarande om lite datareduktion ska genomföras men annars är det lämpligt att ha en kombination av medelhöga parametervärden i respektive del av datareduktionen.

9.2.2 Alternativ till punktmoln

Inom fallstudierna genomfördes även specialtester. I Malmö testades om GRID:et kan konverteras till punktmoln och användas i kombination med brytgeometrier. Det fungerar relativt bra även om lägesosäkerheten är betydligt högre jämfört med vad som kan förväntas av punktmolnet om det var reducerat i samma utsträckning som motsvarar GRID:ets storlek. Dock sparas mycket tid genom att använda ett redan existerande GRID jämfört med att tunna ur

punktmolnet vilket ändå tar relativt lång tid. Ett medelfel om 5-6 cm i höjdmodellen och en total lägesosäkerhet om 11-12 cm till skillnad från drygt 10 cm kan tänkas vara godtagbart.

Att endast använda sig av brytgeometrier som testas för Örskelljunga är även ett alternativ. Med tanke på att brytgeometrierna har en lägre lägesosäkerhet än punktmolnet samt att det finns brytpunkter utspridda över plan mark finns möjlighet att endast förlita sig på brytgeometrierna för att modellera terrängen. Medelfelet är bland det högsta bland testresultaten men inte överdrivet stort. Det går absolut att använda om lite större fel är godtagbara längre bort från brytpunkterna även om det positiva extremfelet är avvikande stort. Dock räcker det med att ett fåtal punkter från punktmolnet inkluderas i trianguleringen för att både medelfelet och extremfel ska vara betydligt mindre.

9.2.3 Effekter av användande av brytgeometrier

Den höga punkttätheten i punktmolnet kombinerat med faktumet att punktmolnet användes för att höjdsätta brytgeometrierna i Malmö är troligen de största anledningarna till att förekomsten av brytgeometrier inte avsevärt påverkar medelfelet i TIN-modellerna. När *Model*-brytgeometrier används är samtliga resultatvärden nästintill identiska med när inga brytgeometrier används. Med *Vertex*-brytgeometrier är lägesosäkerheten lägre än vid tester med samma parametrar när datareduktionen ökar. Dock är även datareduktionen på dessa tester mindre sett till antalet reducerade punkter och kurvorna visar inte att användandet av *Vertex*-brytgeometrier är bättre. Även om användandet av *Vertex*-brytgeometrier har effekter som till synes är positiva är de mycket små. Så pass att det inte går att fastställa att brytgeometrier har någon positiv effekt på resultaten sett till kvalitet på TIN-modellen. Inte ens när de används i samband med GRID:et har de en särskilt positiv effekt.

Användandet av brytgeometrier i Örskelljunga har däremot en tydlig positiv effekt. Förekomsten av brytgeometrier har effekten att kurvan mellan medelfel och datareduktion inte förskjuts utan snarare planar ut vilket ligger i linje med det som nämns i kapitel 6 och som Liu & Zhang (2011) visar. Användningen av väl inmätta brytgeometrier som beskriver formationer i terrängen kan alltså tillåta betydligt mer datareduktion än om inga brytgeometrier används. Dock hjälper det inte att använda brytgeometrierna om datareduktionen inte sker i sådan omfattning att medelfelet ”sticker i väg”.

De stora skillnaderna mellan brytgeometrierna i respektive fallstudie är hur de är skapade och vad de representerar. Det går därmed inte att utifrån dessa fallstudier konstatera vilken av dessa faktorer som är mest avgörande för deras effekt på TIN-modeller. Det mest troliga är att det är en kombination av dessa faktorer samt eventuellt andra faktorer som inte nämnts. Att skapa brytlinjer för viktiga formationer i terrängen förefaller dock spontant som mer viktigt än att en linje i plan terräng är inmätt med en mätosäkerhet om 3 cm.

9.2.4 Trianguleringsmetoder

I detta arbete nämns flera metoder för att genomföra triangulering (avsnitt 3.3). Dock används endast de formberoende trianguleringsmetoderna Delaunay- och constrained Delaunay-triangulering i fallstudierna. Trianguleringsmetoden är en avgörande del av produktionsprocessen och även om Delaunay-triangulering är den mest välkända, bör det inte

vara självklart att det är den mest lämpade metoden för att producera TIN-modeller. Databeroende triangulering som mäter det geometriska felet och triangulerar därefter skulle exempelvis vara en intressant metod. Faktumet att TIN-modeller skapade med Delaunay-triangulering egentligen är höjdsatta 2D-modeller är en potentiell svaghet i dessa modeller.

10. Slutsatser

Detta examensarbete syftar till att utreda hur några viktiga kvalitetspåverkande faktorer som finns i produktionsprocessen påverkar kvaliteten av TIN-modeller. För att göra detta krävs att det först etableras vilka kvalitetspåverkande faktorer som finns och hur kvalitet i TIN-modeller ska definieras. Dessutom utreds frågan hur NS-projektets specifikationer påverkar produktionsprocessen och kvalitetsfrågan. Detta har arbetet lyckats med även om frågornas komplexitet gör det svårt att komma med definitiva svar på frågeställningarna. Arbetets resultat baseras delvis på intervjusvar vilka i grunden är subjektiva. Med det sagt är konsekvensen i svaren från intervjupersonerna sådan att slutsatser alltså kan dras. Vidare ger fallstudierna svar på hur de kvalitetspåverkande faktorerna påverkar TIN-modellens kvalitet.

TIN-modellers kvalitet bör beskrivas som en kombination av flera kvalitetsattribut för att ge användaren av TIN-modellen tillräckligt underlag för att kunna bedöma dess kvalitet. Viktiga egenskaper och attribut som framkommit i detta arbete är spårbarhet och syfte samt andra mer generella attribut som lägesosäkerhet och aktualitet. Viktigt att ha i åtanke när dessa beskrivningar diskuteras är att de måste vara lätta för användare att förstå, tolka och producera. Anledningen att datareduktion blivit en så stor faktor i denna rapport är att det effektiviserar andra delar av processen. Att addera tidskrävande moment som i sig inte nödvändigtvis är värdeskapande bör undvikas.

NS-projektet berör visserligen inte specifikationer för TIN-modeller men specifikationerna för punktmoln och brytgeometrier ger underlag för hantering av TIN-modeller. Genom att spåra datamängderna, vilket NS-projektets föreslagna specifikationer kan underlätta, effektiviserar arbetet med kvalitet i TIN-modeller. Exempel på detta är beslut om datareduktion i samband med produktionen samt kvalitetsbedömningar av den slutliga modellen.

De kvalitetspåverkande faktorerna som utreds i fallstudierna är datareduktion och användandet av brytgeometrier och hur dessa faktorer påverkar kvalitetsattributet lägesosäkerhet i höjd. Fallstudierna visar att datareduktion kan ske på sådant sätt att majoriteten av punktmolnet kan reduceras bort innan det påverkar TIN-modellens kvalitet på ett märkbart negativt sätt. Dock nås en gräns där lägesosäkerheten ökar markant om punktmolnet reduceras mer. Användandet av brytgeometrier innebär inte nödvändigtvis en bättre produktion av TIN-modeller. Däremot kan användandet av väl inmätta brytgeometrier som representerar rätt saker tillåta mer utförlig datareduktion jämfört med produktion utan brytgeometrier.

Slutligen finns utrymme för fler utredningar kring datareduktion och andra produktionspåverkande faktorer såsom val av trianguleringsmetod. Mängden möjliga tekniska lösningar är stor och det finns fortsatta möjligheter att belysa och utveckla olika delar av produktionen av TIN- och andra höjdmodeller.

Litteraturförteckning

Axelsson, P. (1999) Processing of laser scanner data – algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, s.138-147. doi:10.1016/S0924-2716(99)00008-8

Beraldin, J.-A., Blais, F. & Lohr, U. (2010). Laser Scanning Technology. Vosselman, G. & Maas, H.-G. (red.) *Airborne and terrestrial laser scanning*. Whittles Publishing, s. 1-42.

Briese, C. (2004). Three-dimensional modelling of breaklines from airborne laser scanning data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 35, s.1097-112

Briese, C. (2010). Extraction of Digital Terrain Models. Vosselman, G. & Maas, H.-G. (red.) *Airborne and terrestrial laser scanning*. Whittles Publishing s. 135-167.

Chaubey, I., Cotter, A.S., Costello, T.A. & Soerens, T.S. (2005). Effect of DEM data resolution on SWAT output uncertainty, *Hydrological Processes*, 19, s.621-628. doi:10.1002/hyp.5607

Chen, C., Wang, M., Chang, B. & Li, Y. (2020). Multi-Level Interpolation-Based Filter for Airborne LiDAR Point Clouds in Forested Areas. *IEEE Access*. 8. s. 41000-41012. doi:10.1109/ACCESS.2020.2976848

Chen, Z., Gao, B. & Devereux, B. (2017). State-of-the-Art: DTM Generation Using Airborne LIDAR Data. *Sensors*. 17(1). doi: 10.3390/s17010150

Costantino, D. & Angelini, M. G. (2013). Production of DTM quality by TLS data, *European Journal of Remote Sensing*, 46(1), s.80-103. doi:10.5721/EuJRS20134606

de Berg, M., van Kreveld, M., Overmars, M. & Schwarzkopf, O. (1997). *Computational Geometry*. Springer.

De Floriani, L. (1989). A Pyramidal Data Structure for Triangle-Based Surface Description, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 9(2), s.67-78. doi:10.1109/38.19053

Domiter, V. & Zalik, B. (2008). Sweep-line algorithm for constrained Delaunay triangulation, *International Journal of Geographical Information Science*, 22(4), s.449-462. doi:10.1080/13658810701492241

Duggan, N. (2020). What is ETL.... *xyHt*, 4 juni. <https://www.xyht.com/spatial-itgis/what-is-etl-and-how-can-it-turn-you-into-a-geospatial-rock-star/>

Dyn, N. & Rippa, S. (1993). Data-dependent triangulations for scattered data interpolation and finite element approximation. *Applied Numerical Mathematics*, 12, s.89-105. doi:10.1016/0168-9274(93)90113-6

Eklundh, L., Ågren, J., Olsson, H., Harrie, L. & Klang, D. (2020). Insamling av geografiska data. Harrie, L. (red.) *Geografisk informationsbehandling*. Studentlitteratur, s.85-128.

Han, W., Li, Y. & Chen, L., (2012). High-precision DEM production in complex urban area using LiDAR data. *2021 20th International Conference on Geoinformatics*. doi: 10.1109/Geoinformatics.2012.627027

Harrie, L. (2020). *Lecture notes in GIS Algorithms*

Harrie, L., Eklundh, L., Pilesjö, P. & Svensson, P. (2020). Lagring av geografiska data. Harrie, L. (red.) *Geografisk informationsbehandling*. Studentlitteratur, s.131-167.

He, L., Zhang, J., Chen, S. Hou, M. & Chen, J. (2022). Three-dimensional Hydrogeological modeling method and a plocation based on TIN-GPT-TEN. *Earth Science Informatics*, 15(1), s.337-350. doi:10.1007/s12145-021-00727-x

International Organization for Standardization (ISO) (2016). *Selection and use of the ISO 9000 family of standards* [broschyr].

<https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/store/en/PUB100208.pdf>

International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) (2012). *XXII Congress of ISPRS Resolutions*.
https://www.isprs.org/documents/resolutions/resolutions_melbourne.pdf

Klein, R., Cohen-Or, D. & Huttner, T. (1998). Incremental View-dependent Multiresolution Triangulation of Terrain. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, 9(3), s.129-143. Doi: 10.1002/(SICI)1099-1778(199807/09)9:3<129::AID-VIS184>3.0.CO;2-J

Koch, A. & Heipke, C. Semantically correct 2.5D GIS data – The integration of a DTM and topographic vector data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61, s.23-32. doi:10.1016/j.isprsjprs.2006.07.005

Kutterer, H. (2010). Mobile Mapping. Vosselman, G. & Maas, H.-G. (red.) *Airborne and terrestrial laser scanning*. Whittles Publishing, s. 293-311.

Lantmäteriet (u.å.a). *HMK – Handbok i mät- och kartfrågor*.
<https://www.lantmateriet.se/sv/geodata/hmk---handbok-i-mat--och-kartfragor/> [2024-02-21]

Lantmäteriet (u.å.b.) *Min Karta* <https://minkarta.lantmateriet.se/> [2024-04-25]

Lantmäteriet (2015). *HMK – Fotogrammetrisk detaljmätning 2015*

Lantmäteriet (2017a). *HMK - Flygburen laserskanning 2017*

Lantmäteriet (2017b). *HMK – Geodatakvalitet 2017*

Lantmäteriet (2021) *HMK - GNSS-baserad detaljmätning 2021*

Lantmäteriet et al. (2021). *Geodetisk och fotogrammetrisk mättnings- och beräkningsteknik*

Lantmäteriet (2022). *Produktbeskrivning Laserdata Nedladdning, skog, V 1.5, 24 november 2022,*

https://www.lantmateriet.se/globalassets/geodata/geodataprodukter/hojddata/pb_laserdata_ne_dladdning_skog.pdf

Lantmateriet (2023). *HMK – Höjddmodell 2023*

Lantmateriet (2024a) *Nationell specifikation för brytgeometrier*. v.01. Arbetsversion

Lantmateriet (2024b) *Nationell specifikation för punktmoln*. v.01. Arbetsversion

Larrivé, S., Bédard, Y., Gervais, M. & Roy, T. (2011). New Horizons for Spatial Data Quality Research. *7th International Symposium on Spatial Quality (ISSDQ 2011)*. Coimbra, Portugal 12-14 oktober 2011

Li, S., Dragevic, S., Castro, F.A., Sester, M., Winter, S., Coltekin, A., Pettit, C., Jiang, B., Haworth, J., Stein, A. & Cheng, T. (2016). Geospatial big data handling theory and methods: A review and research challenges, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, s119-133. doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.12.012

Library of Congress (2022). *LAS (LASer)File Format, Version 1.4*.
<https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000418.shtml> [2024-01-05]

Little, J. J. & Shi, P. (2001). Structural Lines, TINs, and DEMs. *Algorithmica*, s. 243-263. doi: 10.1007/s00453-001-0015-9

Liu, X. (2008). Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. *Progress in Physical Geography*, 32(1), s.31-49. doi:10.1177/0309133308089496

Liu, X. & Zhang, Z. (2008). LIDAR data reduction for efficient and high quality DEM generation, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, s.173-178

- Liu, X. & Zhang, Z. (2011). Effects of LiDAR Data Reduction and Breaklines on the Accuracy of Digital Elevation Model, *Survey Review*, 43(323), s.614-628.
doi:10.1179/003962611X13117748892317
- Liu, XH., Hu, H. & Hu, P. (2015). Accuracy Assessment of LiDAR-Derived Digital Elevation Models Based on Approximation Theory, *Remote Sensing*, 7(6), s.7062-7079.
doi:10.3390/rs70607062
- Maas, H.-G. (2010). Forestry Applications. Vosselman, G. & Maas, H.-G. (red.) *Airborne and terrestrial laser scanning*. Whittles Publishing s. 213-235.
- Milky, Y., Kamel, A. & Alshouny, A. (2023). A Combined contour lines iteration algorithm and Delanuy triangulation for terrain modeling enhancement, *Geo-spatial Information Science*, 26(3), s.558-576. doi:10.1080/10095020.2022.2070553
- Nie, S., Wang, C., Dong, P., Xi, X., Lou, S. & Qin, H. (2017). A revised progressive TIN densification for filtering airborne LiDAR data. *Measurement*. 104, s.70-77.
doi:10.1016/j.measurement.2017.03.007
- Pajarola, R. & DeCoro, C. (2004). Efficient implementation of of real-time view-dependent multiresolution meshing. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 20(3), s.353-368. doi:10.1109/TVCG.2004.1272735
- Phan, A. T., T., Phan, Q. T. & Nguyen, A. K. V. (2021). Extracting Ground Points and Generating Digital Elevation Model (DEM) from Point Clouds from Point Clouds. Reddy, J., N., Wang, C., M., Luong, V., H. & Le, A., T (red.) *ICSCEA 2021. Proceedings of the Second International Conference on Sustainable Civil Engineering and Architecture*. Springer, s. 589-596
- Pilesjö, P., Eklundh, L., Lindberg, F., Larsson, L. & Guldåker, N. (2020). Analys av geografiska data. Harrie, L. (red.) *Geografisk informationsbehandling*. Studentlitteratur, s.215-272.
- Pirotti, F., Priagnolo, M., Vettore, A & Guarnieri, A. (2022) Comparing Accuracy of Ultra-Dense Laser Scanner and Photogrammetry Point Clouds. *XXIV ISPRS CONGRESS*

CONGRESS IMAGING TODAY, FORESEEING TOMORROW, COMMISSION I. 43(B1), s.353-359. doi:10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2022-353-2022

Safe Software (u.å.a). *PointCloudSimplifier*. <https://docs.safe.com/fme/html/FME-Form-Dokumentation/FME-Transformers/Transformers/pointcloudsimplifier.htm> [2024-05-02]

Safe Software (u.å.b). *PointCloudThinner*. <https://docs.safe.com/fme/html/FME-Form-Dokumentation/FME-Transformers/Transformers/pointcloudthinner.htm> [2024-05-02]

Safe Software (u.å.c). *SurfaceDraper*. <https://docs.safe.com/fme/html/FME-Form-Dokumentation/FME-Transformers/Transformers/surfacedraper.htm> [2024-05-02]

Safe Software (u.å.d). *SurfaceModeller*. <https://docs.safe.com/fme/html/FME-Form-Dokumentation/FME-Transformers/Transformers/surfacemodeller.htm> [2024-05-02]

Safe Software (u.å.e) *TINGenerator*. <https://docs.safe.com/fme/html/FME-Form-Dokumentation/FME-Transformers/Transformers/tingenerator.htm> [2024-05-02]

Safe Software (u.å.f). *WorkspaceRunner*. <https://docs.safe.com/fme/html/FME-Form-Dokumentation/FME-Transformers/Transformers/workspacerunner.htm> [2024-05-02]

Shute, G. M., Deneen, L. L. & Thomborson, C. D. (1991). An $O(n \log n)$ Plan-Sweep Algorithm for L_1 and L_∞ Delaunay Triangulations. *Algorithmica*.6, s.207-221. doi:10.1007/BF01759042

Smartbuilt (u.å.). *Nationella specifikationer för storskaliga geodata*. <https://www.smartbuilt.se/projekt/informationsinfrastruktur/nationella-geodata/> [2024-01-25]

Vivoni, E.R., Ivanov V.Y., Bras, R.L. & Entekhabi, D. (2004). Generation of Triangulated Irregular Networks Based on Hydrological Similarity. *Journal of Hydrologic Engineering*, 9(4), s.288-302

Vosselman, G. & Maas, H.-G. (2010). Preface. Vosselman, G. & Maas, H.-G. (red.) *Airborne and terrestrial laser scanning*. Whittles Publishing s. IX-XII.

Vosselman, G. & Klein, R. (2010). Visualisation and Structuring of Point Clouds. Vosselman, G. & Maas, H.-G. (red.) *Airborne and terrestrial laser scanning*. Whittles Publishing, s. 45-81.

Wang, K., Lo, C.-P., Brook, G. A. & Arabnia, H. R. (2001). Comparison of existing triangulation methods for regularly spaced height fields. *International Journal of Geographical Information Science*. 15(8), s.743-762. doi:10.1080/13658810110074492

Wasström, C., Lönnberg, G. & Harrie, L. (2020). Kvalitetsaspekter. Harrie, L. (red.) *Geografisk informationsbehandling*. Studentlitteratur, s.275-295.

Werbrouck, I., Antrop, M., Van Eetvelde, V., Stal, C., De Mayer, P., Bats, M., Bourgeois, J., Cout-Picon, M., Crombé, P., De Reu, J., De Smedt, P., Finke, P.A., Van Meirvenne, M., Verniers, J. & Zwertvaegher, A. (2011). Digital Elevation Model generation for historical landscape analysis based on Lidar data, a case study in Flanders (Belgium). *Expert Systems with Applications*. 38(7), s. 8178-8185. doi:10.1016/j.eswa.2010.12.162

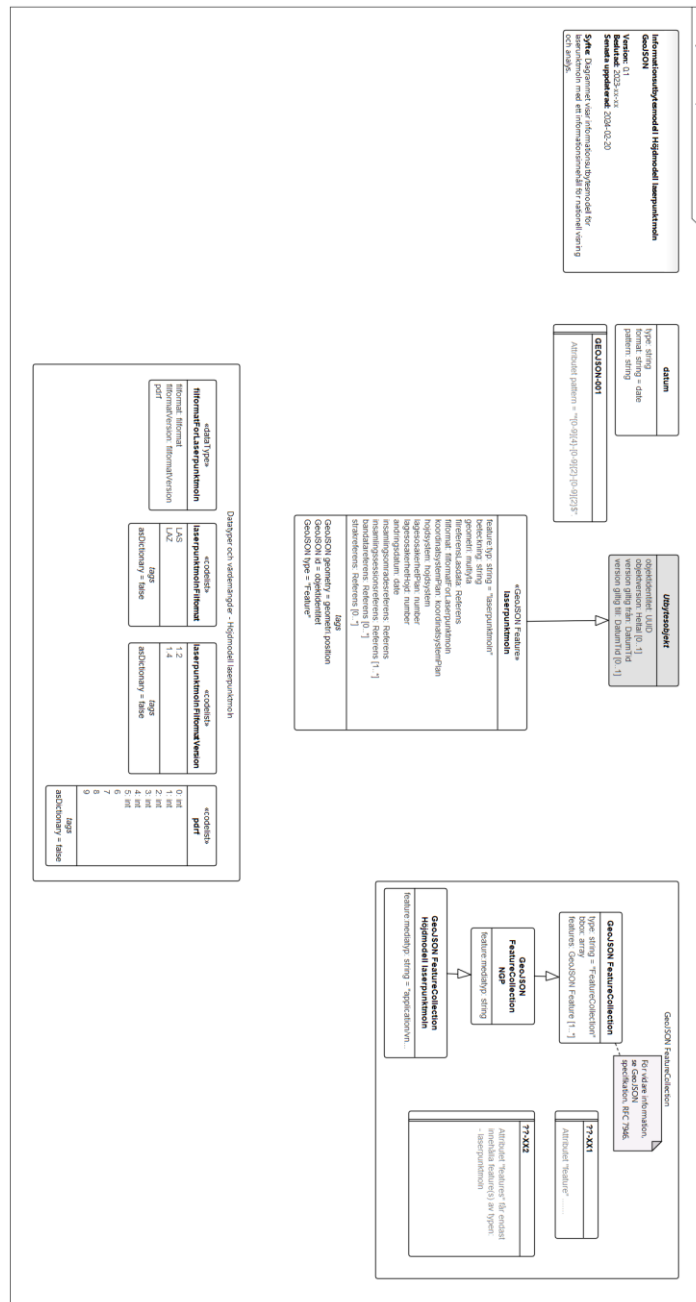
Yang S.-W., Choi, Y. & Jung, C.-K. (2011). A Divide-and-conquer Delaunay Triangulation Algorithm with a Vertex Array and Flip Operations in Two-dimensional Space. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 12(3), s. 435-442. doi:10.1007/s12541-011-0056-1

Appendix

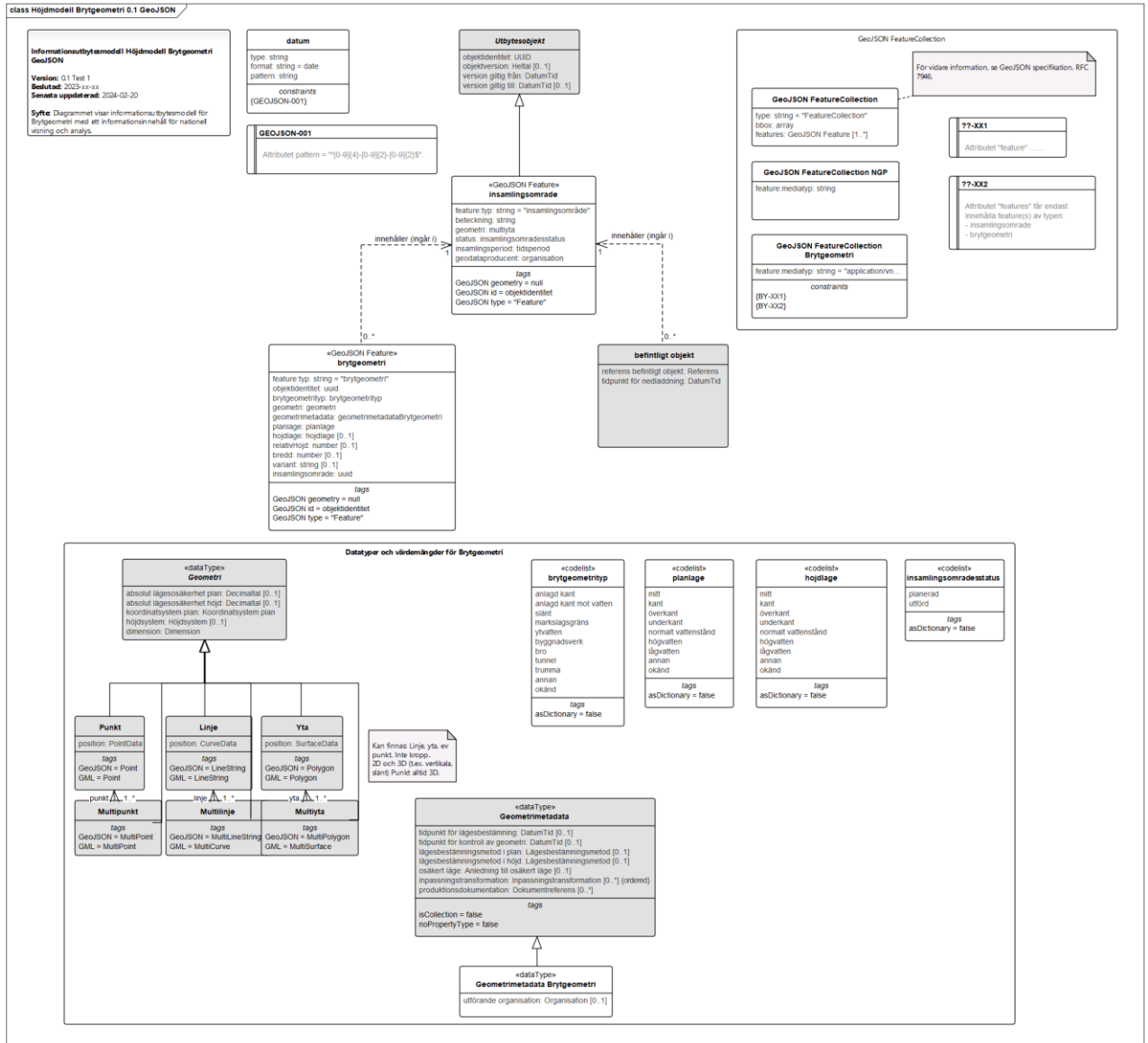
Appendix A. Informationsutbytesmodeller

Nedan visas informationsutbytesmodeller från projektet Nationella specifikationer för storskaliga geodata. Modellerna visar vilken information som kan/ska lagras med respektive datamängd.

A.1 Punktmoln



A.2 Brytlinjer



Appendix B. Intervjusammanfattningar

Nedan följer sammanfattningar av de intervjuer som genomförts under arbetets gång. Varje intervjuperson har granskat och godkänt respektive sammanfattning samt att de medverkar med namn yrkestitel m.m.

B.1 3D-utvecklare, Malmö Stad

Intervju med Axel Loreman, 3D-Utvecklare, Malmö Stad

Som 3D-utvecklare utvecklar Axel rutiner för att producera 3D-modeller som sedan används av andra medarbetare i Malmö Stad i olika syften såsom visualisering av stadsdelar och framtida detaljplaner. Det sker även utveckling i andra syften såsom att höjdsätta basen av trädstammar i staden för att slippa mäta i fält. En avgörande faktor i arbetet är att höjdmodellen ska gå att visualisera fysiskt med hjälp av 3D-skrivare vilket ställer andra krav på modelleringen än vid andra användningsområden. Höjdmodellen visualiseras i en spelmotor och det gör det möjligt att visualisera hela Malmö på en gång.

För att kunna producera TIN som både raster- och mesh-produkt har Malmö Stad egna skript för behandling av laserdata. Datan som erhålls levereras av en extern aktör med en lägesosäkerhet om <5 cm i plan, 5-10 cm i höjd och en beställd punkttäthet på ca 20 punkter/m². För att begränsa mängden data sorteras den i GRID-format med en cell-storlek om 1, 5, 10 och 50 meter och levereras i samband med leveransen av laserdata från leverantören. Grid har sedan en redovisad lägesosäkerhet om 5-10 cm.

Brytgeometrier används här på ett annorlunda sätt än som höjdsättningsreferens. Istället för att verka som ett skelett vid triangulering används det i två separata steg i produktionsprocessen. Brytgeometrierna utgörs av gränser för markanvändningsytor. Informationen för dessa kommer i sin tur från kartor från fastighets- och gatukontoret, stadsbyggnadskontoret samt serviceförvaltningen. Kartorna har slagits ihop och korrigerats för att undvika överlappningar och hål. Resultatet är en karta som bestående av polygoner för olika markanvändningar. Detta innebär att brytgeometrierna endast kommer i 2D. Att brytgeometrierna inte faktiskt agerar som brytgeometrier i trianguleringen kan leda till vissa problem i visualiseringen eftersom skarpa kanter kan missas. För att möta detta kan gatytor helt enkelt sänkas med 10cm vilket visserligen leder till systematiska fel i gatområden men ger en visuellt mer trovärdig modell. Detta är dock bara en visuell förskjutning och inget som påverkar själva originalmodellen.

Angreppssättet för att producera TIN är något speciell. Med GRID och brytgeometrierna som indata skapas en triangulerad 2D-modell och en TIN-modell. Den triangulerade 2D-modellen klipps upp enligt brytgeometrierna och draperas senare på TIN-modellen för att höjdsätta trianguleringen. Resultatet blir en triangulerad, höjdsatt modell där varje triangel har attributinformation från brytgeometrierna. Utifrån detta skapas en TIN-mesh som genom aggregering uppdelas utefter brytgeometrierna. För att kunna skriva ut en fysisk modell med 3D-skrivare krävs det även att modellen har sidor och botten samt att modellen inte har några hål vilka leder till problem för 3D-skrivaren. Dessa fysiska modeller kan sedan användas som exempelvis utställningsmaterial under detaljplaneprocessen.

B.2 3D-visualiserare, Tyréns

Intervju med Anders Nilsson, Visualiserare, Tyréns

I rollen som visualiserare på Tyréns deltar Anders sällan i projekteringsfasen av projekt. Anders arbetar istället med att ta fram presentationsmodeller för situationer där samordningsmodeller inte lämpar sig för att presentera arbetet utan det är bättre med visuellt tilltalande modeller utan viktig projekteringsinformation.

Höjddata används för att ta fram grundmodeller som kan användas till presentationsmodeller, fotomontage eller modelleringsunderlag. Syftet med att arbeta med höjddata är dels att det används som referens vid produktion av visualiseringsprodukter. TIN-modeller är vanligt format för dessa höjdmodeller och används i de flesta projekten om än i begränsad skala. Ett vanligt användningssätt är att ett ortofoto draperas över terrängen. Sedan går det att klippa i modellen och fylla på med mer information eller göra vissa områden mer realistiska. Det kan till exempel vara för att föra in projekterade objekt eller skapa realistiska vattenytor. Det är sedan vanligt att TIN-modellen tas bort när den har fullföljt sitt syfte som grundmodell eller referensmaterial.

TIN skapas genom att laser-punktmoln meshas och grid-filer skapas. Detta görs i programmet Global mapper och indatan för punktmolnet är ofta lantmäteriets skogsLAS (laserdata skog) men kan även vara inköpt data eller internt införskaffat från Tyréns kart- och mätavdelning. Höjdmodellen konverteras till DWG- eller DXF-format och exporteras senare till Studio max där den optimeras så att mängden data begränsas utan att modellen ger felaktig bild av området. Det viktiga är att modellen ser ut som verkligheten, inte att det är precis som verkligheten. Därför är feltoleransen ofta på decimeternivå. Kan den som studerar modellen känna igen sig är syftet med modellen uppfyllt och att inkludera data utöver det leder bara till att modellerna blir onödigt tunga att producera och visualisera. Den slutliga visualiseringen görs senare i en spelmotor. Brytgeometrier är inget som används speciellt för att generera modellerna. Utan punktmoln räcker gott att producera modeller för 3D-refenser.

B.3 Mättekniker, Tyréns

Intervju med Clas Rosenberg, Mättekniker, Tyréns

Som mättekniker arbetar Clas med arbetsflöden, bearbetningar kring arbetsflöden och bearbetning av mätdata. Med menas att han är högst delaktig i processen att ta fram höjdmodeller, däribland TIN som ofta används för mängdberäkningar av schaktmassor. I sin arbetsroll är kvalitetsarbete och kvalitetskontroller en stor del av arbetet med höjdmodeller.

För att behålla flexibilitet och enhetlighet i processen oavsett vad höjdmodellen ska användas till är arbetsflöden uppsatta så att alla höjdmodeller, så långt som möjligt, skapas på samma sätt. För TIN innebär det att de lagras i LandXML. Detta används som överföringsformat till projekteringssystemen som till största del utgörs av Autodesk och Bentleys CAD-system. Tyngd läggs på att produktionsprocessen ska vara fri, när det gäller vilken programvara som

används, men spårbar för att kunna redovisa kvalitetsaspekter. LAS-datan som används för att producera modeller kommer ofta från Lantmäteriet eller samlas in via interna resurser på Tyréns men externa leverantörer finns också. Vid leverans av LAS-data till Tyréns ska en mottagningskontroll genomföras som kontrollerar spårbarhet, referenssystem samt rimligheten och noggrannheten i datan.

Idag saknas utförliga krav på kvalitetskontroller av höjdmodeller vad gäller detaljeringsgrad och planläge. De kontroller som ofta genomförs är stickprover av avvikelser i höjdled som görs mellan höjdmodellen och externt inmätta kontrollpunkter med lägre mätosäkerhet. Dessa kontrollpunkter mäts generellt in med geodetisk detaljmätning. Det görs även kontroller av modellen gentemot ingående LAS-data om sådan använts.

De statistiska kvalitetskontroller som idag krävs görs endast i höjdled men det finns enligt Clas stort utrymme för fler typer av kvalitetskontroller. Ett exempel som föreslås är att jämföra ytor med avseende på volymdifferenser. Genom att mäta in en volym med tydliga brytlinjer, till exempel en stödmur eller trappa och jämföra denna yta med markmodellen så skulle man få ett mått där både plan och höjdläge ingår. Det skulle dock vara en kontrollmetod som skulle vara resursintensiv och svår att strömlinjeforma.

Ett problem som nämns är ”linjäriseringsproblemet” som innebär att en linje eller yta som interpoleras mellan trianguleringsnoder kan avvika avsevärt från indatan långt ifrån noderna vilket kan innebära att topografiska karaktärsdrag missas. Ett annat problem som nämns är hanteringen av kantstenar. Önskemålet är att ha en modellerad kantsten med överkant, yttre och inre kant samt underkant. Eftersom trianguleringen sker i 2D där höjd kommer till i efterhand blir trianguleringen odistinkt om endast LAS-data används. Detta kan till viss del lösas genom att mäta in kantstenen som brytlinjer men man nöjer sig då med två brytlinjer, överkant och underkant. Resultatet blir alltså en ”lutande” kantsten

Viktiga kvalitetsaspekter som Clas nämner är detaljeringsgrad och hanteringen av brus i indatan men även vikten av att hitta eller själv producera bra jämförande data som sedan kan användas för att identifiera och spåra systematiska fel. Att jämföra med extern data är också ett sätt att inkludera en geodetisk garanti i samband med leverans av produkter.

För att beskriva kvaliteten vid leverans finns två sätt som kan tillämpas. Antingen en beskrivning av ”mätkedjan” som ger inblick i processen från mätinsamling till leverans eller som nämnt, kontroll gentemot extern, bättre inmätt data. Det är även viktigt att alltid göra visuella kontroller av datan för upptäcka grova fel.

B.4 Produktionsutvecklare, Lantmäteriet

Intervju med Andreas Rönnberg, Produktionsutvecklare, Lantmäteriet

Andreas använder höjddata för produktion och uppdatering av ortofoton och framförallt Nationella Höjdmodellen. Datan samlas främst in med flygburen laserskanning men bilddata kan även användas över mindre områden. TIN-modeller är i sig ingen produkt som släpps utan produkterna släpps i rasterformat. TIN är dock viktiga funktioner i två steg. Först och främst är att Progressive TIN Densification (PTD) används vid markklassning av punktmolnet. Andra är

att TIN används vid interpolering av punktmolnet för att sedan kunna konvertera till raster med cellstorlek om 1 m²

Den insamlade datan hanteras i programmet TerraScan där markpunkter filtreras genom klassificering av punktmolnet. Sedan interpoleras punktmolnet i FME. Anledningen till att TIN används som mellansteg är att det är enkelt att utföra beräkningar samt att det bevarar terrängformationer.

Den ursprungliga klassningen av punkter insamlade med laser görs i ett område som är 25 x 50 km stort. Datan delas sedan upp och den slutliga uppdateringen av Nationella Höjdmodellen görs i rutor om 2.5 x 2.5 km

Brytgeometrier används i två fall vid produktion av Nationella Höjdmodellen. För att kunna modellera marken runt vattendrag används brytgeometrier vid vattenkanten. Eftersom vattenhöjden kan variera av olika anledningar såsom nederbörd, tidvatten, osv. kan även korrektheten av vattennivån i modellen variera. Det går därför inte att förlita sig på befintlig kartdata utan brytlinjerna måste matcha vattenytan såsom den var vid insamling av övrig indata. Dock är det fortfarande en korrekt modellering av marken som är eftertraktad. Den andra viktiga brytgeometrin är i form av punkter som placeras under broar. Eftersom laserskanningen är flygburen saknas data under konstruktioner såsom broar. För att kompensera för detta placeras syntetiska brytpunkter under broarna som algoritmen kan triangulera för att få en kontinuerlig och någorlunda korrekt modellering under bron. Metoden används främst vid broar över mark eftersom brytlinjen vid vattenkanten annars kan användas. Metoden kan oftast utföras automatiskt men det kan krävas manuellt insättning av punkter.

De viktigaste kvalitetsaspekterna vid arbetet med den Nationella Höjdmodellen är aktualitet, lägesosäkerhet och detaljrikedom i den ordningen. Lägesosäkerheten för den insamlade punktdatan är ca 5 cm i höjd och ca 20 cm i det horisontella planet under optimala förhållanden, alltså plana ytor och minimal vegetation. Detaljrikedomen är viktig men också beroende av upplösningen. Med ca 1 punkt/m² vilket också är cellstorleken krävs att datainsamling sker med högre upplösning vilket också kräver mer arbete i databehandlingen. Det är alltså en resursfråga och trots att högre detaljeringsgrad är något som efterfrågas av användare finns inte resurser att tillhandahålla en mer högupplöst modell i dagsläget

B.5 Projektör, Väg, Gata & Mark, Tyréns

Intervju med Axel Persson, Projektör Väg, Gata och Mark, Tyréns

Axel använder höjddata som en central del av sitt arbete som projektör. I rollen ingår att projektera vägar, ta fram utformningar av gatumiljöer och att utreda olika typer av markfrågor såsom massberäkningar, masshantering och dagvattenhantering. Höjddata används ständigt i dessa områden. Användningen av höjddata är viktigt vid hantering dagvatten i kombination med andra krav på utformning såsom tillgänglighet, bekvämlighet och funktion. Höjddata spelar även in andra delar i projektering av gaturummet såsom VA, gestaltning, etc. För detta är TIN praktiskt eftersom ytorna kan användas av projektören för att skapa sig en bild av och arbeta med höjdsättning i miljön. Den stora anledningen till detta är att allt som mäts in, projekteras och till slut byggs kommer luta i någon utsträckning.

Indatan för modelleringen kan komma från flera ställen beroende på syfte och omfattning av projektet. Laserdata används ofta för att beskriva nuvarande förhållanden där geodetisk detaljmätning bedöms vara för svårt eller tidskrävande relativt till behov av detaljnivå. Det är emellertid vanligt att brytgeometrier används i så pass stor utsträckning att laserdata inte är av lika stort behov. Brytgeometrierna mäts ofta in med geodetisk detaljmätning på grund av de höga kraven på lägesosäkerhet. Ytterligare brytgeometrier som genereras genom projekteringen kan sedan introduceras och kombineras med inmätt data för att skapa höjdmodeller som visar hur det kommer se ut efter slutförande av projektet. Indata från laserskanning sorteras program såsom i Autodesk Recap och själva projekteringen samt modelleringen görs i AutoCAD/Civil 3D.

Laserdata kan även enskilt utgöra underlag för beskrivning av befintliga förhållanden för exempelvis grova massberäkningar. Vid utförande av detta över stora områden är precisionen i modellen inte nödvändigtvis den viktigaste kvalitetsfaktorn men noggrannheten desto viktigare. Detta eftersom det är okej om det blir lite fel vid varje mätning sålänge som det är slumpmässiga fel. Systematiska fel kan dock leda till att exempelvis schaktmassor om flera tusen kubikmeter feluppskattas.

Vilka kvalitetskrav som ställs på TIN-modellen varierar från projekt till projekt. Vid större vägprojekt över sträckor där det befintliga inte påverkar eller påverkas av nybyggnationen i stor grad är kraven generellt lägre på lägesosäkerhet och detaljrikedom. Modellerna med de högsta kraven på lägesosäkerhet är i millimeter- till centimeterfel. Det är emellertid ofta vid projektering av detaljerade lösningar såsom anslutningar till befintliga vägar och inom befintliga gatumiljöer, som kraven på lägesosäkerhet och detaljrikedom ökar. Kontroller av ingående höjddata och höjdmodeller görs visuellt.

B.6 Vattenutredare 1, Tyréns

Intervju med Filip Faust, Utredare, Vatten, Tyréns

Som utredare i vattenfrågor använder Filip höjddata för att genomföra skyfallsmodelleringar. Både hur vatten rinner på över marken och i ledningar under mark. Syftet med arbetet är att utreda och beskriva hur vatten i olika mängder rinner i miljöer, vilket kan användas för att planera stadsmiljöer och förutse behovet av exempelvis dagvattenhanteringslösningar.

Som indata till höjdmodelleringen används ofta punktmoln i form av lantmäteriets laserdata skog. Det händer även att kunderna själva förser höjddatan exempelvis vanligt när kunderna är kommuner. Höjdmodellerna som genereras är antingen i GRID-format eller en TIN (av vattenutredare kallad *flexible mesh*). GRID är mer lätthanterligt men då utredningarna ibland täcker stora områden blir GRID-formatets brist på flexibilitet ett problem. Att TIN-modeller kan innehålla både stora och små trianglar gör det lämpligt för modellering av stora områden med skiftande vikt för modellens prestanda. En modell över Lunds tätort (som visades under intervjun) kan till exempel vara väldigt detaljerad vid vattendrag som Höje Å, ganska detaljerad i centrum men mindre detaljerad över åkrarna utanför staden där högupplösning inte är nödvändig. Egenskaperna hos TIN gör det möjligt att lokalt optimera datamängden i modellerna.

TIN-modellerna skapas i modelleringsprogrammet Mike. LAS-datan har en punkttäthet på 2-3 punkter/m² och utifrån dessa skapas ett rutnät om 1x1 meter. Därifrån går det att skapa antingen ett GRID eller TIN. I dagsläget används endast LAS-data och inga brytgeometrier används i genereringsprocessen. Upplösningen på indatan är så pass grov att detaljerade brytgeometrier inte lämpar sig. Ofta modelleras större områden såsom städer eller stadsdelar. Dock nämner Filip att det hade varit bra att få med exempelvis trottoarkanter vid modellering där man önskar en högre detaljeringsgrad, i dagsläget fångas de i rutnätet om än grovt.

På grund av den låga upplösningen är kvalitetsfaktorer såsom lägesosäkerhet av mindre vikt. Kvaliteten får inte vara för låg men den låga detaljeringsgraden på indatan gör att variationer i terrängen ändå inte fångas. Dock kan det finnas behov av att till exempel skicka ut någon att genomföra en extra mätning på plats om det exempelvis behövs en bättre inmätning av trottoarkanters höjd. Felmarginalen i höjddled är vanligtvis på centimeternivå men kan förbättras vid behov genom en detaljmätning.

B.7 Vattenutredare 2, Tyréns

Intervju med Jimmy Olsson, Vattenutredare, Tyréns

Jimmy använder höjddata för att modellera hur ytvatten rör sig inom modelleringsområden. TIN är i sig inte något som används ofta utan GRID-formatet är vanligare för modellen. Däremot används TIN indirekt som ett interpoleringssteg i FME som skapar ett GRID från punktmoln.

Syftet med modelleringen är att mäta hur marken under och ovan vattenytan i exempelvis sjöar och vattendrag ser ut (batymetri respektive topografi) för att kunna förutse hur vatten kommer röra sig vid olika vattenstånd. Exempelvis var det finns risk för översvämningar eller var låga vattenstånd kan påverka markförhållanden.

Indatan som används för att producera höjdmodellerna är ofta Lantmäteriets skogsLAS (laserdata skog) vilket kan kompletteras med egna mätningar. De egna mätningarna är antingen för att mäta in viktiga formationer i både topografien och batymetrien som inte fångas i skogsLAS och som är avgörande för arbetet med modellerna. Höjdmodellerna är som nämnt i GRID-format med en upplösning på ca 1 meter.

Brytgeometrier skapas vanligen genom geodetiska detaljmätning vilket kan användas både ovan och under vattenytan. Ibland används även ekolod för att mäta under vattenytan. Behovet av brytgeometrier varierar där vissa områden kräver mer brytgeometrier än andra. Specifikt är kraven på modellerna högre inom områden som är viktiga vid låga vattenstånd såsom trånga sektioner i vattendrag.

Ur kvalitetssynpunkt är det viktigaste att få rätt inom så kallade bestämmande sektioner där genomsläppet av vatten styr flöden i övriga systemet. Där är det viktigaste att tvärsnittssaran blir rätt snarare än att modellen blir så rätt som möjligt. Med tillräckliga datamängder kan alltså större lägesosäkerhet tillåtas eftersom det jämnas ut över hela modellen. Viktiga formationer såsom trösklar har dock högre krav på sig eftersom de är styrande för flöden och de har ofta en

lägesosäkerhet på cm-nivå på indatan. Kvalitetskontrollerna av modellerna görs dock rent visuellt och andra, numeriska kvalitetsmått för att redovisa fel saknas.

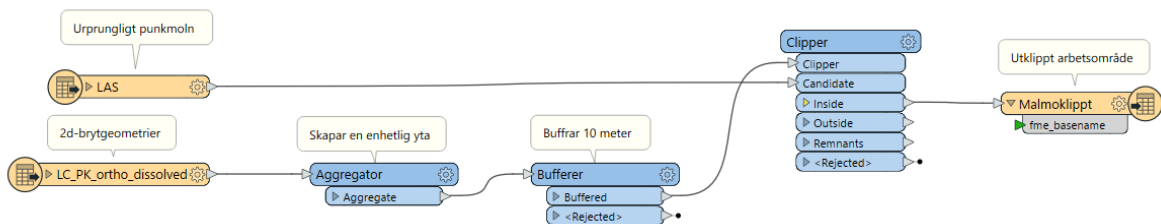
Data på andra platser har inte likvärdiga krav utan där kan större lägesosäkerhet tolereras. Eftersom det krävs extra resurser att göra extra mätningar för att samla in data till viktiga formationer är det viktigt att detta görs på rätt ställen. Jimmy säger att det är viktigare att det blir bra på rätt ställe än att modellen blir bättre generellt.

Ett annat problem är att skogsLAS är tungt att använda för generering av modellen. För att kunna modellera stora områden behövs därför antingen en datareduktion över hela området eller att området modelleras i mindre bitar som gör dem mer lätthanterliga.

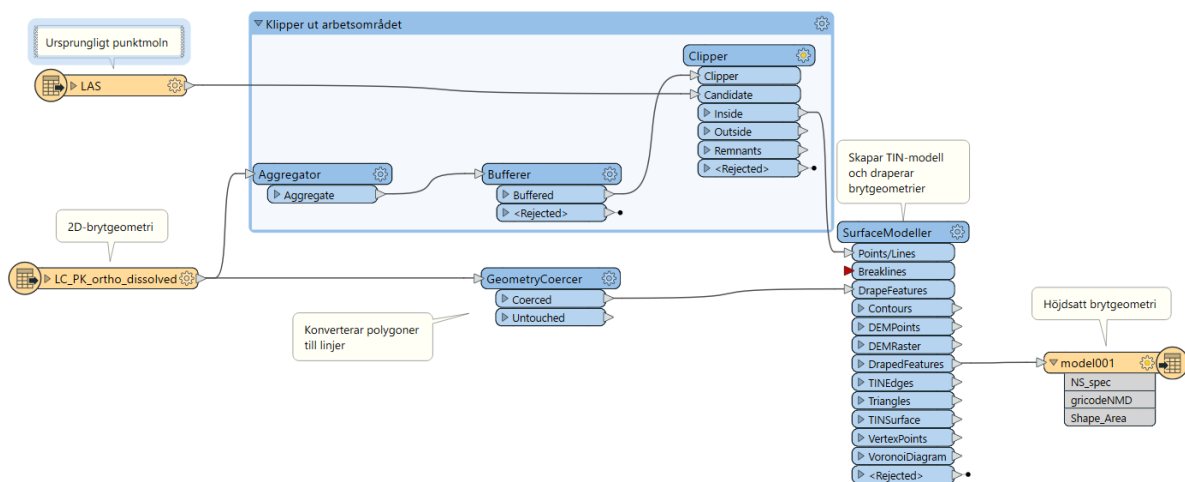
Appendix C. FME-Skript

Nedan visas de FME-skript som användes för att genomföra de tester vars resultat återfinns i Appendix D. Appendix C.1-5 är bearbetning av data som sedan används i skriptet där testerna utförs och som visas i Appendix C.6-7. Appendix C.8 visar förälderskriptet som användes för att genomföra flera tester på löpande band utan att de manuellt behövde startas.

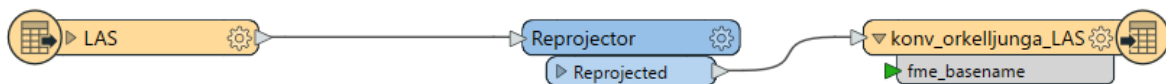
C.1 Klipper ut punktmolnet – Malmö



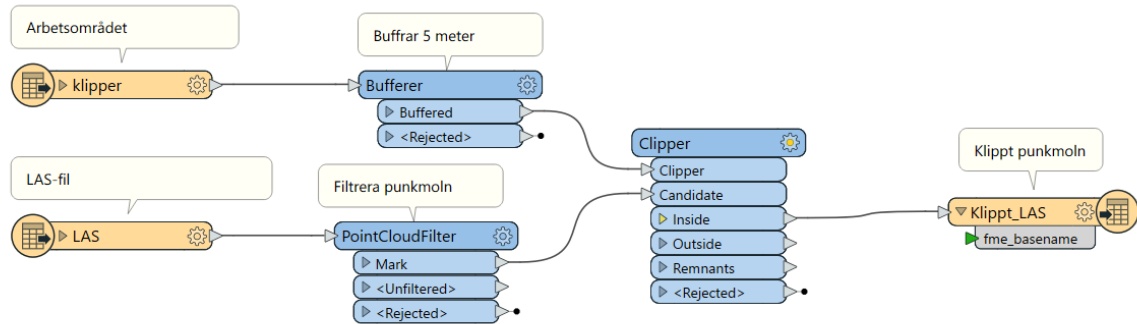
C.2 Höjdsättning av brytgeometrier – Malmö



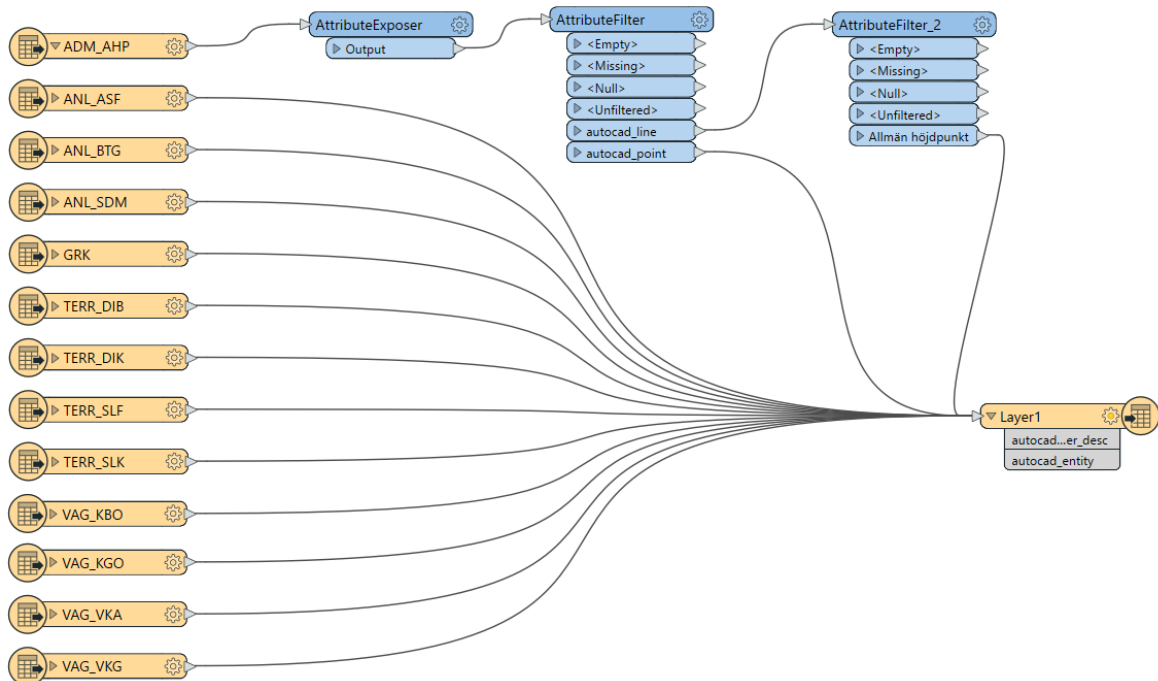
C.3 Koordinatkonvertering – Örskelljunga



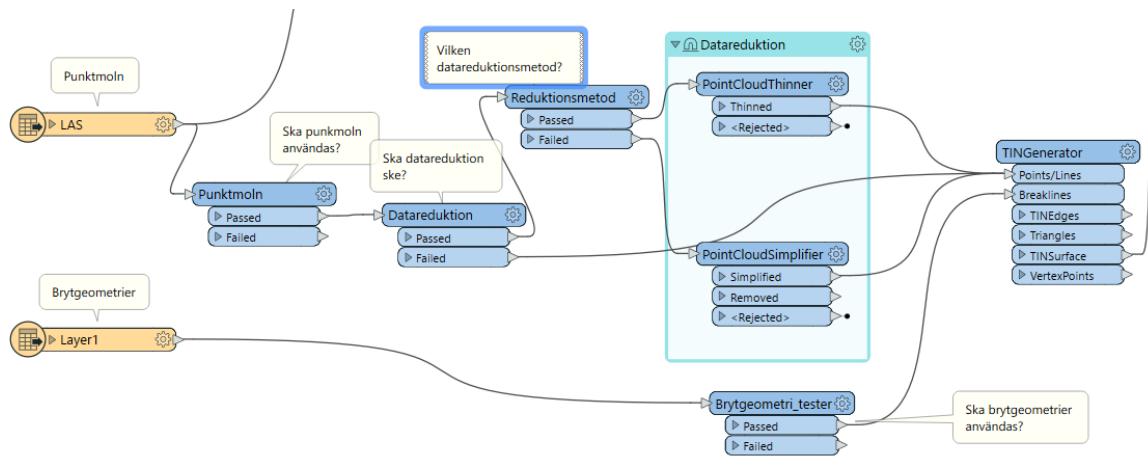
C.4 Klipper ut punktmolnet - Örskelljunga



C.5 Filtrera brytgeometrier - Örskelljunga



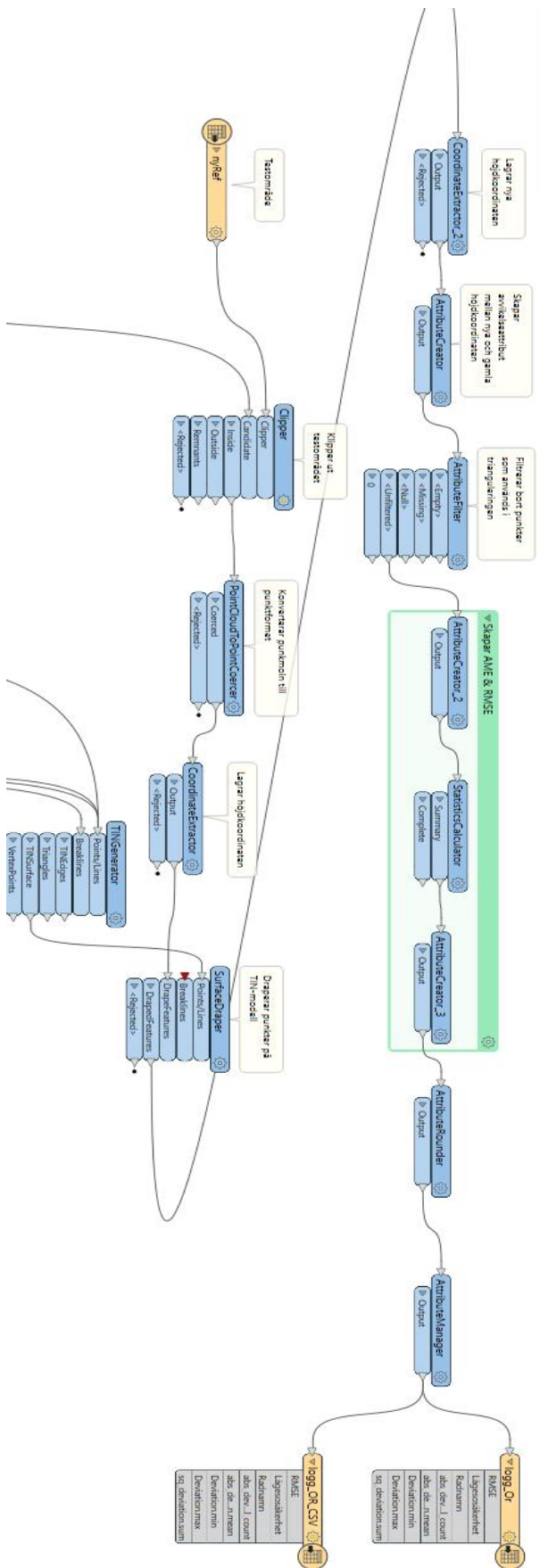
C.6 Generera TIN-modellen



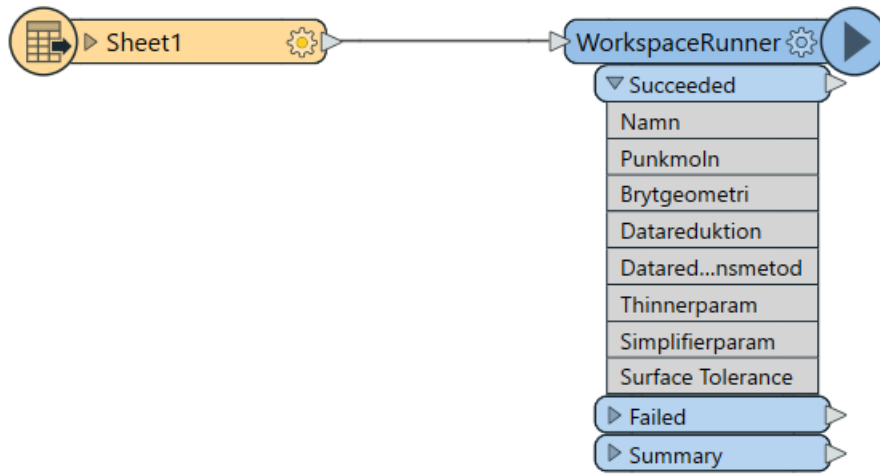
Fortsättning av arbetsytan finns i Appendix C.7

**Transformatorn Punktmoln finns inte i produktionsprocessen för Malmö*

C.7 Utvärdering av TIN-modellen och skriva resultat



C.8 Förälderkrift



Appendix D. Fallstudieresultat

Resultat av fallstudien inklusive bl.a. medelfel (RMSE) och medelabsolutfel (MAE). Vilka parametrar som användes i det specifika testet visas även.

D.1 Resultat – Malmö

RMSE (meter)	Lägesosäkerhet (meter)	MAE (meter)	Borttagna punkter	Reduktion (%)	Största negativa avvikelse (meter)	Största positiva avvikelse (meter)	Parametrar
0,007	0,1	0,005	30472861	86,58	-0,73	1,5	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: , Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,01
0,025	0,103	0,018	35059960	99,61	-1,25	2,965	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: , Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,1
0,036	0,106	0,024	35107025	99,74	-1,351	3,217	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: , Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,2
0,047	0,11	0,028	35117659	99,77	-1,517	3,217	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: , Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,5
0,05	0,112	0,028	35118813	99,77	-2,449	3,216	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: , Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,8
0,009	0,1	0,005	17589304	49,97	-2,067	1,566	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0
0,008	0,1	0,005	32090256	91,17	-2,193	2,306	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,01
0,025	0,103	0,018	35069567	99,63	-2,478	2,306	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,1
0,036	0,106	0,024	35109072	99,75	-2,903	2,306	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,2
0,047	0,11	0,028	35117909	99,77	-2,846	2,408	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,5
0,05	0,112	0,028	35118959	99,77	-2,591	3,115	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,8
0,007	0,1	0,005	548332	1,56	-0,07	0,059	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0
0,007	0,1	0,005	30495931	86,64	-0,392	1,5	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,01
0,025	0,103	0,018	35060105	99,61	-0,554	3,06	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,1
0,036	0,106	0,024	35107084	99,74	-1,249	3,217	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,2
0,047	0,11	0,028	35117618	99,77	-2,509	3,217	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,5
0,05	0,112	0,028	35118876	99,77	-1,748	3,216	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,8

0,01	0,1	0,006	26100226	74,15	-0,672	1,919	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0
0,01	0,1	0,007	33054233	93,91	-0,683	1,919	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,01
0,031	0,105	0,024	35112562	99,76	-0,895	3,217	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,1
0,05	0,112	0,037	35158784	99,89	-1,631	3,216	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,2
0,072	0,123	0,047	35170503	99,92	-2,14	3,216	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,5
0,078	0,127	0,049	35171826	99,93	-2,335	3,27	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,8
0,015	0,101	0,009	31889470	90,6	-2,077	3,289	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0
0,015	0,101	0,01	34137103	96,99	-2,005	3,373	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,01
0,036	0,106	0,028	35133485	99,82	-2,065	2,814	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,1
0,061	0,117	0,046	35173984	99,93	-3,046	3,216	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,2
0,104	0,144	0,074	35187374	99,97	-3,046	3,216	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,5
0,121	0,157	0,082	35189006	99,97	-3,067	3,271	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,8
0,033	0,105	0,019	34537233	98,12	-3,276	3,238	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0
0,033	0,105	0,019	34870476	99,07	-3,276	3,171	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,01
0,047	0,111	0,034	35155866	99,88	-3,668	3,171	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,1
0,073	0,124	0,056	35181501	99,95	-3,668	3,171	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,2
0,131	0,165	0,097	35192990	99,99	-3,625	2,912	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,5
0,166	0,194	0,117	35194622	99,99	-3,625	3,524	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,8
0,05	0,112	0,029	34932634	99,25	-3,955	3,313	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0
0,05	0,112	0,029	35034008	99,53	-3,906	3,427	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,01
0,061	0,117	0,042	35167005	99,91	-3,952	3,032	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,1
0,082	0,129	0,061	35184652	99,96	-3,801	3,032	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,2
0,136	0,169	0,099	35193506	99,99	-3,952	3,25	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,5
0,165	0,193	0,115	35194783	99,99	-3,952	3,482	Brytgeometri: Ingen, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,8
0,007	0,1	0,005	30472861	86,58	-0,73	1,5	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: , Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,01
0,025	0,103	0,018	35059960	99,61	-1,25	2,965	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: , Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,1
0,036	0,106	0,024	35107025	99,74	-1,351	3,217	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: , Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,2
0,047	0,11	0,028	35117659	99,77	-1,517	3,217	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: , Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,5
0,05	0,112	0,028	35118813	99,77	-2,449	3,216	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: , Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,8
0,009	0,1	0,005	17589304	49,97	-2,067	1,566	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0

0,008	0,1	0,005	32090256	91,17	-2,193	2,306	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,01
0,025	0,103	0,018	35069567	99,63	-2,478	2,306	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,1
0,036	0,106	0,024	35109072	99,75	-2,903	2,306	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,2
0,047	0,11	0,028	35117909	99,77	-2,846	2,408	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,5
0,05	0,112	0,028	35118959	99,77	-2,591	3,115	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,8
0,007	0,1	0,005	548332	1,56	-0,07	0,059	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0
0,007	0,1	0,005	30495931	86,64	-0,392	1,5	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,01
0,025	0,103	0,018	35060105	99,61	-0,554	3,06	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,1
0,036	0,106	0,024	35107084	99,74	-1,249	3,217	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,2
0,047	0,11	0,028	35117618	99,77	-2,509	3,217	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,5
0,05	0,112	0,028	35118876	99,77	-1,748	3,216	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,8
0,01	0,1	0,006	26100226	74,15	-0,672	1,919	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0
0,01	0,1	0,007	33054233	93,91	-0,683	1,919	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,01
0,031	0,105	0,024	35112562	99,76	-0,895	3,217	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,1
0,05	0,112	0,037	35158784	99,89	-1,631	3,216	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,2
0,072	0,123	0,047	35170503	99,92	-2,14	3,216	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,5
0,078	0,127	0,049	35171826	99,93	-2,335	3,27	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,8
0,015	0,101	0,009	31889470	90,6	-2,077	3,289	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0
0,015	0,101	0,01	34137103	96,99	-2,005	3,373	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,01
0,036	0,106	0,028	35133485	99,82	-2,065	2,814	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,1
0,061	0,117	0,046	35173984	99,93	-3,046	3,216	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,2
0,104	0,144	0,074	35187374	99,97	-3,046	3,216	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,5
0,121	0,157	0,082	35189006	99,97	-3,067	3,271	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,8
0,033	0,105	0,019	34537233	98,12	-3,276	3,238	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0
0,033	0,105	0,019	34870476	99,07	-3,276	3,171	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,01
0,047	0,111	0,034	35155866	99,88	-3,668	3,171	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,1
0,073	0,124	0,056	35181501	99,95	-3,668	3,171	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,2
0,131	0,165	0,097	35192990	99,99	-3,625	2,912	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,5
0,166	0,194	0,117	35194622	99,99	-3,625	3,524	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,8
0,05	0,112	0,029	34932634	99,25	-3,955	3,313	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0

0,05	0,112	0,029	35034008	99,53	-3,906	3,427	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,01
0,061	0,117	0,042	35167005	99,91	-3,952	3,032	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,1
0,082	0,129	0,061	35184652	99,96	-3,801	3,032	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,2
0,136	0,169	0,099	35193506	99,99	-3,952	3,25	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,5
0,165	0,193	0,115	35194783	99,99	-3,952	3,482	Brytgeometri: MODEL, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,8
0,011	0,101	0,006	30481385	86,6	-1,904	2,918	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: , Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,01
0,031	0,105	0,019	35059659	99,61	-2,12	2,965	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: , Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,1
0,038	0,107	0,023	35106650	99,74	-2,063	3,217	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: , Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,2
0,045	0,11	0,025	35117254	99,77	-2,035	3,217	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: , Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,5
0,047	0,11	0,026	35118409	99,77	-2,289	3,216	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: , Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,8
0,012	0,101	0,006	17608800	50,03	-2,648	2,742	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0
0,013	0,101	0,006	32095520	91,19	-2,648	2,997	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,01
0,032	0,105	0,019	35069222	99,63	-2,65	2,856	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,1
0,038	0,107	0,023	35108642	99,75	-2,903	2,948	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,2
0,045	0,11	0,025	35117460	99,77	-2,846	2,948	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,5
0,047	0,111	0,026	35118509	99,77	-2,658	3,115	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,8
0,018	0,102	0,007	586895	1,67	-1,736	2,859	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0
0,011	0,101	0,006	30504415	86,66	-1,904	2,856	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,01
0,031	0,105	0,019	35059838	99,61	-2,035	3,06	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,1
0,038	0,107	0,023	35106724	99,74	-1,934	3,217	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,2
0,045	0,11	0,025	35117193	99,77	-2,528	3,217	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,5
0,047	0,111	0,026	35118445	99,77	-2,084	3,216	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,8
0,013	0,101	0,007	26112731	74,19	-1,736	2,859	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0
0,015	0,101	0,008	33058164	93,92	-1,904	2,856	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,01
0,037	0,107	0,025	35112147	99,76	-2,047	3,217	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,1
0,048	0,111	0,032	35158264	99,89	-2,048	3,216	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,2
0,06	0,117	0,037	35169951	99,92	-2,622	3,216	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,5
0,065	0,119	0,039	35171273	99,92	-2,689	3,27	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,8
0,019	0,102	0,01	31894134	90,61	-2,24	3,234	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0
0,02	0,102	0,011	34139685	96,99	-2,127	2,992	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,01

0,04	0,108	0,026	35127246	99,8	-2,127	3,029	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,1
0,051	0,112	0,034	35162384	99,9	-2,127	3,216	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,2
0,063	0,118	0,039	35172292	99,93	-2,197	3,216	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,5
0,068	0,121	0,04	35173414	99,93	-2,766	3,206	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,8
0,033	0,105	0,019	34537688	98,12	-3,275	3,14	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0
0,034	0,106	0,019	34870542	99,07	-3,275	3,14	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,01
0,049	0,111	0,032	35154781	99,88	-3,275	3,021	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,1
0,061	0,117	0,041	35178446	99,94	-3,275	3,08	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,2
0,081	0,129	0,05	35187686	99,97	-3,275	3,021	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,5
0,092	0,136	0,054	35188826	99,97	-3,277	2,99	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,8
0,046	0,11	0,025	34932475	99,25	-2,927	3,049	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0
0,046	0,11	0,026	35033979	99,53	-2,927	3,091	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,01
0,057	0,115	0,036	35165400	99,91	-3,04	3,032	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,1
0,067	0,12	0,043	35181246	99,95	-2,984	3,032	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,2
0,085	0,131	0,052	35188118	99,97	-2,927	3,032	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,5
0,097	0,139	0,055	35189082	99,97	-2,927	2,993	Brytgeometri: VERTEX, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,8
0,057	0,115	0,031	35198162	100	-3,195	4,137	GRID-INGEN
0,055	0,114	0,03	35198162	100	-2,9	4,074	GRID-VERTEX
0,057	0,115	0,031	35198162	100	-3,195	4.137	GRID-MODEL

D.2 Resultat – Örkejljunga

RMSE (meter)	Läges-osäkerhet (meter)	MAE (meter)	Borttagna punkter	Reduktion (%)	Största negativa avvikelse (meter)	Största positiv avvikelse (meter)	Parametrar
0,019	0,102	0,009	2397	13,77	-0,244	0,210	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Ingen, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,01
0,051	0,112	0,037	15935	91,54	-0,521	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Ingen, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,1
0,071	0,122	0,05	16854	96,82	-0,789	1,342	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Ingen, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,2
0,087	0,132	0,059	17101	98,24	-0,789	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Ingen, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,5
0,093	0,136	0,062	17158	98,56	-0,548	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Ingen, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,8
0,089	0,134	0,063	16979	97,54	-0,807	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0
0,09	0,135	0,064	16996	97,63	-0,807	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,01
0,092	0,136	0,066	17173	98,65	-0,807	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,1
0,099	0,141	0,07	17228	98,97	-0,807	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,2
0,115	0,152	0,083	17302	99,39	-0,789	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,5
0,119	0,155	0,086	17337	99,59	-0,514	1,280	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,8
0,118	0,155	0,098	12	0,07	-0,211	0,210	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0
0,019	0,102	0,009	2397	13,77	-0,244	0,210	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,01
0,051	0,112	0,037	15935	91,54	-0,521	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,1
0,071	0,122	0,05	16854	96,82	-0,789	1,342	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,2
0,087	0,132	0,059	17101	98,24	-0,789	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,5
0,093	0,136	0,062	17158	98,56	-0,548	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,8
0,046	0,11	0,034	10353	59,47	-0,503	0,215	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0
0,045	0,11	0,032	11077	63,63	-0,503	0,215	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,01
0,058	0,116	0,043	16252	93,36	-0,449	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,1
0,08	0,128	0,059	16938	97,30	-0,789	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,2
0,108	0,147	0,078	17241	99,04	-0,755	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,5
0,119	0,155	0,086	17322	99,51	-0,581	1,280	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,8
0,061	0,117	0,043	14866	85,40	-0,510	0,632	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0

0,061	0,117	0,043	15069	86,56	-0,510	0,632	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,01
0,071	0,123	0,052	16682	95,83	-0,521	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,1
0,082	0,129	0,06	17055	97,97	-0,789	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,2
0,108	0,147	0,079	17257	99,13	-0,573	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,5
0,114	0,152	0,082	17317	99,48	-0,581	1,280	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,8
0,089	0,134	0,063	16979	97,54	-0,807	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0
0,09	0,135	0,064	16996	97,63	-0,807	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,01
0,092	0,136	0,066	17173	98,65	-0,807	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,1
0,099	0,141	0,07	17228	98,97	-0,807	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,2
0,115	0,152	0,083	17302	99,39	-0,789	1,136	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,5
0,119	0,155	0,086	17337	99,59	-0,514	1,280	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,8
0,103	0,143	0,073	17229	98,97	-0,807	1,372	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0
0,103	0,143	0,073	17234	99,00	-0,807	1,372	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,01
0,114	0,152	0,083	17284	99,29	-0,807	1,372	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,1
0,122	0,158	0,088	17310	99,44	-0,807	1,372	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,2
0,13	0,164	0,095	17341	99,62	-0,789	1,372	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,5
0,13	0,164	0,096	17350	99,67	-0,514	1,280	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,8
0,008	0,1	0,006	2384	13,69	-0,045	0,068	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Ingen, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,01
0,038	0,107	0,03	15932	91,52	-0,174	0,211	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Ingen, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,1
0,059	0,116	0,046	16852	96,81	-0,423	0,213	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Ingen, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,2
0,091	0,135	0,065	17100	98,23	-0,493	0,492	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Ingen, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,5
0,127	0,161	0,08	17158	98,56	-0,797	0,797	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Ingen, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,8
0,14	0,172	0,093	16979	97,54	-1,082	1,212	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0
0,14	0,172	0,093	16995	97,63	-1,082	1,212	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,01
0,145	0,176	0,099	17164	98,60	-1,082	1,212	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,1
0,151	0,181	0,107	17232	98,99	-1,082	1,200	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,2
0,18	0,206	0,137	17340	99,61	-1,014	1,200	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,5
0,223	0,244	0,163	17377	99,82	-1,205	1,200	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Thinner, Parameter: 2/0,5, SurfaceTolerance: 0,8
0,008	0,1	0,006	2384	13,69	-0,045	0,068	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,01
0,038	0,107	0,03	15932	91,52	-0,174	0,211	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,1

0,059	0,116	0,046	16852	96,81	-0,423	0,213	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,2
0,091	0,135	0,065	17100	98,23	-0,493	0,492	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,5
0,127	0,161	0,08	17158	98,56	-0,797	0,797	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,01, SurfaceTolerance: 0,8
0,042	0,108	0,031	10348	59,44	-0,252	0,209	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0
0,04	0,108	0,03	11073	63,61	-0,252	0,209	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,01
0,046	0,11	0,036	16249	93,34	-0,233	0,226	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,1
0,07	0,122	0,056	16937	97,29	-0,300	0,267	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,2
0,123	0,159	0,092	17241	99,04	-0,659	0,665	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,5
0,168	0,196	0,121	17322	99,51	-0,761	0,783	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,1, SurfaceTolerance: 0,8
0,061	0,117	0,043	14862	85,37	-0,703	0,439	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0
0,061	0,117	0,043	15058	86,50	-0,703	0,439	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,01
0,065	0,119	0,049	16639	95,58	-0,571	0,506	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,1
0,088	0,133	0,068	17028	97,82	-0,454	0,506	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,2
0,146	0,177	0,114	17288	99,31	-0,695	0,696	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,5
0,199	0,223	0,154	17349	99,66	-0,838	0,816	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,2, SurfaceTolerance: 0,8
0,14	0,172	0,093	16979	97,54	-1,082	1,212	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0
0,14	0,172	0,093	16995	97,63	-1,082	1,212	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,01
0,145	0,176	0,099	17164	98,60	-1,082	1,212	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,1
0,151	0,181	0,107	17232	98,99	-1,082	1,200	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,2
0,18	0,206	0,137	17340	99,61	-1,014	1,200	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,5
0,223	0,244	0,163	17377	99,82	-1,205	1,200	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0,8
0,215	0,237	0,146	17229	98,97	-1,335	1,691	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0
0,214	0,236	0,146	17233	98,99	-1,335	1,691	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,01
0,209	0,232	0,144	17293	99,34	-1,335	1,691	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,1
0,212	0,235	0,149	17325	99,52	-1,335	1,691	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,2
0,226	0,247	0,166	17361	99,73	-1,335	1,691	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,5
0,282	0,299	0,207	17384	99,86	-1,793	1,658	Punktmoln: Ja, Brytgeometri: Nej, Datareduktionsmetod: Simplifier, Parameter: 1/0,8, SurfaceTolerance: 0,8
0,266	0,284	0,108	17408	100,00	-0,807	3,585	Punktmoln: Nej, Brytgeometri: Ja, Datareduktionsmetod: Ingen, Parameter: 1/0,5, SurfaceTolerance: 0

Institutionen av naturgeografi och ekosystemvetenskap, Lunds Universitet

Student-examensarbete (seminarieuppsatser) i geografisk informationsteknik.

Uppsatserna finns tillgängliga på institutionens geobibliotek, Sölvegatan 12, 223 62 LUND. Serien startade 2010. Hela listan och själva uppsatserna är även tillgängliga på LUP student papers och via Geobiblioteket (www.geobib.lu.se).

Serie examensarbete i geografisk informationsteknik

1. Patrik Carlsson och Ulrik Nilsson (2010) Tredimensionella GIS vid fastighetsförvaltning
2. Karin Ekman och Anna Felleson (2010) Att välja grundläggande karttjänst - Utveckling av jämförelsemodell och testverktyg för utvärdering
3. Jakob Mattsson (2011) Synkronisering av vägdata-baser med KML och GeoRSS - En fallstudie i Trafikverkets verksamhet
4. Patrik Andersson and Anders Jürisoo (2011) Effective use of open source GIS in rural planning in South Africa
5. Nariman Emamian och Martin Fredriksson (2012) Visualisering av bygglovsärenden med hjälp av Open Source-verktyg - En undersökning kring hur man kan effektivisera ärendehantering med hjälp av en webbapplikation
6. Gustav Ekstedt and Torkel Endoff (2012) Design and Development of a Mobile GIS Application for Municipal FieldWork
7. Karl Söderberg (2012) Smartphones and 3D Augmented Reality for disaster management - A study of smartphones ability to visualise 3D objects in augmented reality to aid emergency workers in disaster management
8. Viktoria Strömberg (2012) Volymberäkning i samhällsbyggnadsprojekt
9. Daniel Persson (2013) Lagring och webbaserad visualisering av 3D stadsmodeller - En pilotstudie i Kristianstad kommun
10. Lisette Danebjer och Magdalena Nyberg (2013) Utbyte av geodata - studie av leveransstrukturer enligt Sveriges kommuner och landstings objekttypskatalog

11. Alexander Quist (2013) Undersökning och utveckling av ett mobilt GISsystem för kommunal verksamhet
12. Nariman Emamian (2014) Visning av geotekniska provborrningar i en webbmiljö
13. Martin Fredriksson (2014) Integrering av BIM och GIS med spatiala databaser – En prestandaanalys
14. Niklas Krave (2014) Utveckling av en visualiseringsapplikation för solinstrålningsdata
15. Magdalena Nyberg (2015) Designing a generic user interface for distribution of open geodata: based on FME server technology
16. Anna Larsson (2015) Samredovisning av BIM- och GIS-data
17. Anton Lundkvist (2015) Development of a WEB GI System for Disaster Management
18. Ellen Walleij (2015) Mapping in Agricultural Development – Introducing GIS at a smallholders farmers' cooperative in Malawi
19. Frida Christiansson (2016) Lagring av 3D - geodata - en fallstudie i Malmö Stad
20. Lisette Danebjer (2016) Methodology for creating and modifying distributed topologically structured geographical datasets
21. Jeanette Dunn Ekelund (2016) En jämförelse av algoritmer och resultat för flödesberäkning i QGIS/GRASS och ArcGIS
22. Ebba Gröndahl och Frida Thorman (2016) Verksamheters optimala läge i staden och hur de är lokaliserade idag
23. Gunnar Rolander (2017) Data transformation using linked data ontologies
24. Måns Andersson och Moa Eklöf (2017) Stilsättning av geografiska data
25. Josefine Axelsson (2018) Automatisering av bygglovsansökningsprocessen med stöd av BIM och GIS
26. Leonard B. O. Berge (2018) Uppdatering och visualisering av stadsmodell med stöd av konverterade BIM-modeller
27. Rickard Ingesson & Gabriella Olsson (2019) Publicering av geografiska data på webben : En utvärdering av programsystem med fokus på öppen källkod

28. Alfred Hildingson & Patrik Sylve (2020) Visualisering av stadsmodeller på webben : Jämförande studie mellan CityGML och CityJSON
29. Isabelle Andersson (2020) Indoor positioning systems in office environments : a study of standards, techniques and implementation processes for indoor maps
30. Sebastian Roos & August Cnattingius (2021) Covid-19-pandemins konsekvenser på svenskt näringsliv - en Space Syntax analys : Hur har konkursutsattheten och arbetslösheten förändrats för detaljhandel, hotell och restauranger till följd av restriktioner som begränsar besöksnäring?
31. Emelie Ulin (2021) Simuleringar i planeringsprocessen med 3D-stadsmodeller
32. Alfred Hirschfeld & Christoffer Karlsson (2022) Designing and implementing a geospatial mobile application
33. Andreas Ahlström (2022) 3D-stadsmodeller för mindre kommuner - vad är behoven och vilka standarder krävs?
34. Jorun Westman (2022) Looking for shrubs in an alvar - Investigating classification of orthophotos as a way of mapping shrub species *Juniperus communis* and *Dasiphora fruticosa* on Stora Alvaret, Öland
35. Sophia Bladh & Ylva Kjellberg (2023) Enhetlig visualisering av geotekniska data och geokonstruktioner - En intervju- och implementeringsstudie
36. David Andersson & Beatrice Ekström (2023) Scenariohantering med parametrisk design i planeringsprocessen
37. Alexander Brynolf (2023) Undersökning av tillgänglighetsmått
38. Axel Andersson (2024) Kvalitetsbeskrivning och kvalitetspåverkande faktorer vid produktion av TIN-modeller