



# Metodik för riskbedömning - naturliga bergslänter

---

Påverkan på anläggning vid blockutfall från omgivande fastighet

---

Johan Berglund och Åke Magnusson, SGI

Uppdragsgivare: Trafikverket

mars 2025

Uppdragsledare: Johan Berglund  
Granskare: Karl-Johan Loorents och Linnéa Hedenberg-Muje  
Handläggare: Åke Magnusson  
Diariernr: SGI: 2208-0785, Trafikverket Dnr: 2022/60575  
Uppdragsnr: SGI: 50056  
Totalt antal sidor: 61

Hänvisa till detta dokument på följande sätt:

Berglund, J och Magnusson, Å 2025, Metodik för riskbedömning - naturliga bergslänter, Påverkan på anläggning vid blockutfall från omgivande fastighet, Statens geotekniska institut, SGI, Linköping, 2025-03-05.

Foto på omslag: Hans Hargelius, Trafikverket

## Förord

Längs branta slänter vid Trafikverkets väg och järnvägar förekommer ras och skred. Trafikverket har rutiner för att underhålla bergskärningar och att minimera denna typ av risker. Till exempel risken att block faller ut, skadar anläggningen, och utgör en säkerhetsrisk. Trafikverket önskar ett verktyg som stöd i riskbedömning med hänsyn till naturliga bergslänter – inför nybyggnation och i underhållet av vägar och järnvägar. Uppdraget ”Metodik för riskbedömning – naturliga bergslänter, Påverkan på anläggning vid blockutfall från omgivande fastighet” har utförts av Statens geotekniska institut (SGI). Uppdraget har genomförts med stort engagemang. Arbetet redovisar metoder för att skapa underlag som kan användas som stöd vid riskbedömning av blockutfall mot anläggning, liksom ett verktyg för att bedöma effekten av skydd mot sådana block. Arbetsgruppen har bestått av Johan Berglund, Åke Magnusson och Mats Öberg vid SGI. Trafikverket har bistått i arbetet genom Eva Gustavsson samt med Linnéa Hedenberg-Muje och Karl-Johan Loorents i referensgruppen. SGI har under projektet varit bidragande till workshops och temamöten internt inom Trafikverket. Arbetet har finansierats av Trafikverket.

Johan Berglund  
Uppdragsledare

Karl-Johan Loorents och Linnéa  
Hedenberg-Muje  
Beställare



# Innehållsförteckning

|  |    |
|--|----|
| Sammanfattning .....   | 7  |
| 1 Bakgrund.....  | 8  |
| 2 Projektets genomförande.....                               | 9  |
| 2.1 Inledning .....  | 9  |
| 2.2 Översiktlig riskbedömning.....                           | 9  |
| 2.3 Detaljerad riskbedömning .....                           | 9  |
| 2.4 Rapportens upplägg .....                                 | 10 |
| 2.5 Kort om riskbedömning och avgränsningar.....             | 10 |
| 3 Huvudprocesser.....  | 11 |
| 4 Översiktlig riskbedömning.....                             | 12 |
| 4.1 Inledning .....  | 12 |
| 4.2 Karttjänst och GIS-lager .....                           | 12 |
| 4.2.1 Allmänt om QGIS och dess tilläggfunktioner.....        | 12 |
| 4.2.2 Branta slänter i GIS.....                              | 14 |
| 4.3 Verktyg för att bedöma utfallsområde i QGIS .....        | 15 |
| 4.3.1 Indata - Lantmäteriets terränglutningsdata .....       | 15 |
| 4.3.2 Potentiella utfallsområden .....                       | 16 |
| 4.4 Råd för användande .....                                 | 17 |
| 5 Detaljerad riskbedömning .....                             | 19 |
| 5.1 Inledning .....  | 19 |
| 5.2 Höjdmodellering från LiDAR.....                          | 20 |
| 5.3 Från LiDAR till modeller .....                           | 20 |
| 5.4 Bearbetning av LIDAR .....                               | 21 |
| 5.4.1 Detaljerade modeller från LIDAR.....                   | 21 |
| 5.4.2 QGIS och tilläggfunktioner.....                        | 22 |
| 5.5 Simuleringar med Rockyfor3D .....                        | 22 |
| 5.5.1 Underlag för simulering (till RockyfoRf3D).....        | 25 |
| 5.5.2 Resultatfiler från Rf3D .....                          | 26 |
| 5.6 Råd och beskrivning av parametrar inför simulering ..... | 26 |
| 5.7 Verktyg i QGIS för att skapa underlagsfiler i ASCII..... | 30 |
| 6 Verifiering av simuleringsresultat.....                    | 30 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 7      | Riskreducering .....  | 32 |
| 8      | Resultat och leverans .....   | 33 |
| 8.1    | Sammanfattande schema för detaljerad riskbedömning .....              | 33 |
| 9      | När kan simuleringar vara användbara?.....                            | 35 |
| 9.1    | Exempel på behov .....  | 35 |
| 10     | Diskussion och några exempel.....                                     | 36 |
| 10.1   | Lackarebäck .....   | 38 |
| 10.2   | Norrahammar.....  | 39 |
| 10.3   | Kisa .....  | 39 |
| 10.4   | Höjdmodellernas kvalitet .....  | 41 |
| 10.4.1 | Erfarenheter från utförd LiDAR via drönare.....                       | 41 |
| 11     | Avslutande kommentarer.....   | 43 |
|        | Referenser.....   | 44 |
|        | Bilagor .....   | 45 |
|        | Bilaga 1 – Beskrivning av verktyg för potentiellt utfallsområde ..... | 46 |
|        | Bilaga 2 - Upplägg LiDAR-projekt.....                                 | 49 |
|        | Bilaga 3 - Rekommendationer för bearbetning av LiDAR-data.....        | 52 |
|        | Bilaga 4 – Rekommendation för fältdatainsamling.....                  | 59 |

## Sammanfattning

Denna rapport redovisar metoder för att skapa underlag som stöd för att bedöma risker som kan uppstå på grund av blockutfall mot anläggning, liksom ett verktyg för att bedöma effekten av skydd mot sådana utfall.

En metod har tagits fram för att sälla bort risker för att enbart fokusera på bedömning av de slänter som har potential att utgöra risk. Detta kallar vi översiktlig riskbedömning. Därtill har en mer avancerad metod tagits fram för en detaljerad riskbedömning, vilken inkluderar numerisk datorsimulering av blockutfall. Den senare metoden är befogad i fall där det finns tydliga kvarstående osäkerheter i bedömda risknivåer och vilka åtgärder som kan krävas för att nå en acceptabel risknivå.

Blockutfall sker mer eller mindre kontinuerligt från slänter innanför och utanför Trafikverkets anläggningsområden och orsakar årligen många plötsliga, oförutsedda händelser. Allvarliga olyckor har dock varit ovanliga. Föreslagen metodik vill bidra till att det fortsätter att vara så och även till att generellt minska risker för oförutsedda skadehändelser vid anläggningar.

I dagsläget sker riskbedömning normalt enbart med stöd av okulära besiktningar och enklare beräkningar och bedömningar av möjliga utfallsscenarier. Den befintliga processen bygger på delvis subjektiva bedömningar, men kommer troligen ändå fortsatt att utgöra det normala sättet för riskbedömning av detta slag, men den nu föreslagna metodiken bidrar till en mer objektiv analys av risker i tidiga skeden, samt i fall där osäkerheterna i subjektiva bedömningar är oacceptabelt stora.

# 1 Bakgrund

Branta slänter i berg och morän behöver riskbedömas med hänsyn till möjliga ras och blockutfall, för att minimera sannolikhet för olyckor och för att förhindra eller begränsa driftstörningar och skador på anläggning och egendom. Risker av detta slag "ägs" normalt av fastighetsägaren/anläggningsägaren. Trafikverkets har en omfattande verksamhet för att utreda och minska risker i anslutning till väg och järnväg. Där sker blockutfall vanligen från konstruerade bergslänter, där berg schaktats bort. Sådana slänter har olika ålder och är utformade, förstärka och underhållna på varierande sätt, och är endast i viss utsträckning utformade med hänsyn till de lokala geologiska förhållandena. I framför allt äldre, konstruerade slänter kan enskilda block eller större partier i slänten sakna tillräckligt stöd (dvs. naturligt laststöd av något slag eller förstärkning) och därmed riskera att falla ut mot anläggning. Trafikverket har rutiner för att underhålla bergskärningar för att minimera denna typ av risker. Liknande problem finns i anslutning till kommunala (och privata) anläggningar, men där ser rutinerna för kontinuerligt underhåll olika ut runt om i landet. Motsvarande risker finns även för naturliga slänter, utanför Trafikverkets ansvarområde, men där saknas ett systematiskt arbete för att hantera dessa. Pågående klimatförändringar kan komma att påverka frekvensen av ras och blockutfall, vilket gör att behovet av mer systematisk hantering av problematiken ökar.

Med naturliga slänter avses i denna rapport slänter som är formade av naturens egna processer och inte schaktade av människan.

Kommuner ska vid planläggning utreda och minimera risker kring block- och bergstabilitet. Detta innefattar vanligen också många naturliga bergslänter. Utanför planlagt område och i äldre planerade områden saknas dock vanligen sådan utredning, varför det finns många "dolda" risker. På liknande sätt har Trafikverket naturliga bergslänter utanför sitt anläggningsområde, som kan utgöra risk. Det finns många fall där olyckor eller incidenter skett på grund av blockutfall. Några exempel finns i SGI:s publikation 44 (2018). Målet med detta projekt är att systematisera och skapa verktyg som stöd i riskbedömning med hänsyn till naturliga bergslänter - inför nybyggnation, eller runt befintliga anläggningar.

Projektet har föregåtts av en förstudie där parterna Trafikverket, SGI och tidigare också Göteborgs stad, diskuterat lämpligt upplägg för det nu aktuella projektet. Förstudien innefattade också en masterstudie vid Lunds universitet (Agudelo Motta, 2020). De lokala områden som studerades i förstudien var Utby, i Göteborgs utkant, samt Norrahammar söder om Jönköping. Den senare ingick därefter som en av tre fallstudier i det nu aktuella projektet.



## 2 Projektets genomförande

### 2.1 Inledning

Projektet (Trafikverket 2022/60525; ”Riskbedömning - Blockutfall från naturliga bergslänter”) initierades 2022 efter avslutade pilotprojekt, vilka skapat underlag för upplägget på forskningsprojektet.

Projektet har haft som mål att utveckla metodiken för riskbedömning med hjälp av följande aktiviteter:

1. Optimering av markmodeller med hjälp av drönarteknik (LiDAR och fotogrammetri)
2. Utvärdering och vidareutveckling av aktuell programvara för simulering av bergutfall
3. Utvärdering av skyddseffekt från vegetation och topografiska hinder

Utöver dettas så har ett syfte varit att ta fram en översiktlig metod för sålla bort slänter som kan anses vara problemfria med hänsyn till skyddsobjekten, det vill säga de anläggningar som behöver skyddas.

Fotogrammetri för att skapa höjdmodeller uteslöts i projektet, då LiDAR-tekniken (Light Detection And Ranging) visat sig vara överlägsen för att få den upplösning av markinformation som metodiken i riskbedömningen kräver. Projektet har genomförts stegvis, där metod och underlag för översiktlig riskbedömning utvecklats separat, medan metodiken för detaljerad riskbedömning arbetats fram genom att i flera steg analysera och bearbeta LiDAR-data som projektet låtit ta fram från tre mindre delområden med historisk riskproblematik. Inledande steg i metod för detaljerad riskbedömning innebar analys av kravbild för LiDAR-data och lämpliga metoder att använda för att uppnå denna kravbild. Efterföljande steg innebar analys av påverkande parametrar vid simulering av blockutfall, vilket är en central del i den detaljerade riskbedömningen. Det simuleringsverktyg/program som valdes för att simulera blockutfall innefattar även metodik för utvärdering av skyddseffekt från vegetation eller skyddsnet (eller annan konstruerad barriär).

### 2.2 Översiktlig riskbedömning

För den översiktliga riskbedömningen har underlag tagits fram i samverkan mellan SGI och Lantmäteriet. Verktøy i GIS har tagits fram av SGI.

### 2.3 Detaljerad riskbedömning

För att göra en detaljerad riskbedömning av blockutfall i den metod som föreslås, behövs olika typer av modeller som kan efterlikna ett naturligt utfall. I projektet har vi valt att utnyttja befintliga matematiska modeller och programvara för detta. En utvärdering av lämplig programvara skedde inledningsvis i projektet. Validering av olika programs modeller är enbart gjord översiktligt, då projektet inte haft utrymme att utvärdera de algoritmer som i detalj styr blocks komplexa kinematik (rörelse) ner för en sluttning. Projektet har vid val av program främst utgått från (i nämnd ordning):

- Erfarenhetsbaserad bedömning av tillförlitligheten i utfallsförlopp i modelleringen, inklusive dess påverkande parametrar.

- Oberoende granskning av denna typ av programvaror
- Programmets tillgänglighet och kostnad

## 2.4 Rapportens upplägg

Rapporten beskriver genomförandet av projektet i en någorlunda kronologisk ordning, vilket ganska väl överensstämmer med den ordning en riskbedömning bör utföras. Beroende på vilken typ av projekt eller liknande där risk ska bedömas, eller beroende på vilket objekt som behöver skyddas, så kan hela processen se något olika ut, vilket innebär att användare av systemet inte nödvändigtvis behöver utföra alla delprocesser som beskrivs. I avsnitt 3 beskrivs övergripande de huvudprocesser som behandlas i rapporten. Dessa och de delprocesser som är aktuella beskrivs i tur och ordning. Rapporten är därför skriven som en kombination av genomförandebeskrivning för projektet och en utförandebeskrivning för riskbedömning.

För varje process finns råd och rekommendationer för processens genomförande.

Detaljerade beskrivningar av underlag som analyserats och tagits fram i uppdraget ligger företrädesvis i bilagor.

## 2.5 Kort om riskbedömning och avgränsningar

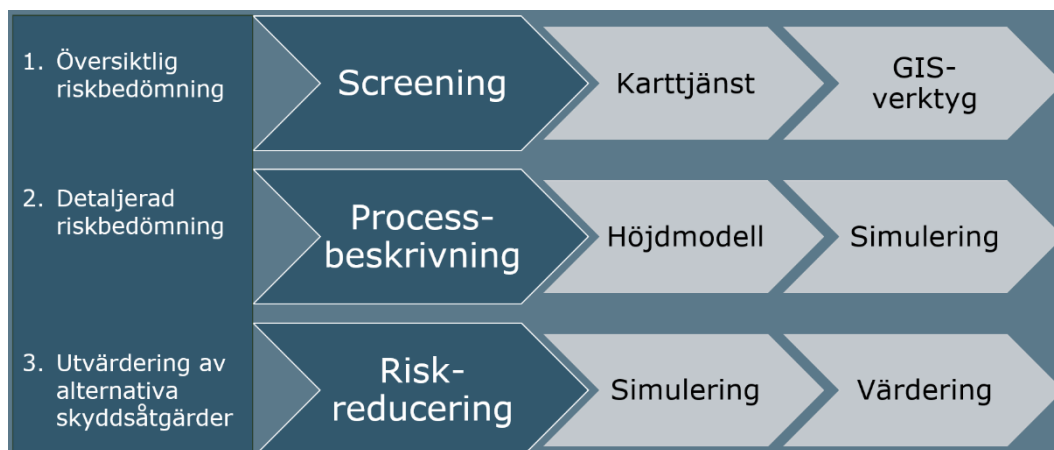
I projektet och rapporten har vi använt vedertagna begrepp inom området riskanalys. Se exempelvis [MSB:s handbok](#) i ämnet (Räddningsverket, 2003). Terminologin kring ”risk” kan vara något förvirrande i Sverige eftersom begreppet används i olika betydelse. Engelskans ”natural hazards” eller ”geological hazards” borde närmast motsvara naturfara eller geologisk fara, vilket är begrepp som generellt inte används i Sverige, utan här används begrepp som ”rasrisk” och liknande. En fara är bara en potentiell risk, medan risken har en gradering, från låg till hög, baserat på en rad sannolikheter för händelser och dess konsekvenser.

Studien fokuserar på kända eller potentiella riskkällor (förekomst av lösa block och liknande) och dess teoretiska möjlighet att nå skyddsobjekt (väg, järnväg eller andra objekt som kan skadas – ”riskobjekt”). Att på ett *realistiskt* sätt förutsäga vilka utfallsvägar ner för en slänt ett block kan ta från att det kommer i rörelse i slänten, har varit ett viktigt mål för projektet. De olika ingående parametrar som styr ett blocks fysiska möjligheter att påverka en anläggning är indata till simuleringsverktyg vi arbetat med och har därför varit viktigt att analysera för projektets måluppfyllnad.

Kvantifiering av risker har inte varit en del av uppdraget. Sannolikheten för att blockutfall sker, lokalt eller i ett större område, liksom analys av de konsekvenser eventuella blockutfall kan få, bör förstås vara kvantifierat inför en behovsanalys kring skyddsåtgärder.

### 3 Huvudprocesser

Systematik i processen för riskbedömningen har delats in i tre huvudprocesser enligt Figur 1. Respektive huvudprocess beskrivs i underkapitel i rapporten, där även ingående delprocesser redogörs för mer i detalj.



Figur 1 Schematisk illustration över de tre huvudprocesserna som valts i projektet.

Översiktlig riskbedömning är i projektet en benämning som omfattar en bortsällning, ”screening”, vilket i detta fall innebär en någorlunda snabb och översiktlig metod för att avgöra vilka bergslänter som kan bortses från med hänsyn till eventuella blockutfall. Underlagen och verktygen som tagits fram för detta ändamål inom ramen för projektet bygger på empirisk forskning och topografiska förhållanden.

En mer detaljerad riskbedömning kan vara aktuell där naturliga slänter antingen utgör en risk (där verifierade tillbud existerar) eller kan tänkas utgöra en risk för ny eller befintlig anläggning. En detaljerad riskbedömning görs med stöd av en detaljerad höjdmodell från LiDAR-data från UAS (”Unmanned aerial system”, dvs obemannat luftburet system) och datorbaserade simuleringsverktyg.

Verifiering av resultat från simuleringar och bedömningar av hur realistiska resultaten och de ingående parametervärdena är, har ingått som en del i projektet. En slutsats som dragits är att det är relativt lätt att skapa simulerade blockutfall som är ”på den försiktiga sidan”, medan det är svårare att utvärdera hur nära verkliga utfall man kan komma vid jämförelse med faktiskt inträffade sådana. Underlagsdata från sådana kan vara svåra att få, eller återskapa, även för kända inträffade fall. Det har ändå varit av betydelse i projektet att de simuleringar som genomförts har bedömts vara relevanta med hänsyn till slantgeometri och att de, så långt det varit möjligt att bedöma, inte blir ”för konservativa” för att utgöra ett bra underlag för risk- och åtgärdsbedömningar. För den översiktliga riskbedömningen bygger det verktyg som skapats på vetenskapliga, empiriska studier och verktyget ger av säkerhetsskäl en mer försiktig bedömning än den detaljerade bedömningen för att kunna fungera som en trygg bortsällning av slänter som inte kan utgöra risk.

I den programvara projektet använt kan även en utvärdering av skyddseffekt och omfattningen av fysiska terrängskydd (diken, vallar, nät etc.) göras.

## 4 Översiktlig riskbedömning

### 4.1 Inledning

Det finns en rad tillgängliga produkter idag som utgår från Lantmäteriets höjddata. En hel del av dessa är skapade av Lantmäteriet själva och många finns tillgängliga via [Geodataportalen](#). Inom ramen för projektet har SGI tillsammans med Lantmäteriet vidareutvecklat det terränglutningslager i gråton som redan fanns framtaget, i avsikt att anpassa det till riskbedömningar inom SGI:s teknikansvarsområden. Det nya kartlagret kallas "Terränglutning brunton" på geodataportalen.

### 4.2 Karttjänst och GIS-lager

SGI har i dagsläget ett antal allmänt tillgängliga [kartvisningstjänster](#). Av dessa är "Vägledning ras, skred och erosion" ett resultat av samverkan mellan sex olika myndigheter. Tjänsten är endast ämnad att ge översiktlig information och det går därför inte att zooma in till mer än 1:10 000. I tjänsten kan man bland annat översiktligt se de terränglutningslager som beskrevs ovan, under "Grundläggande topografisk information" i menyn till höger. SGI har för avsikt att ta fram en ny, allmänt tillgänglig vägledning för utredning av stabilitet i branta slänter och till den kommer en högre upplöst karttjänst erbjudas där "Terränglutning brunton" ska finnas tillgänglig. I nuläget är det lämpligt att i stället beställa lagret från Lantmäteriet och hantera det via den egna organisationens GIS.

#### 4.2.1 Allmänt om QGIS och dess tilläggsfunktioner

Vi har i projektet valt att använda GIS-programvaran QGIS med stöd av ett antal "plugins", dvs insticksprogram eller som tilläggsfunktioner. En huvudanledning till detta är att mycket av det som kan användas där är öppet och tillgängligt för alla som behöver utföra riskbedömning av det aktuella slaget. Många insticksprogram är skapade för att underlätta analyser av exempelvis den typ som varit aktuella i detta projekt, och gör det även möjligt att vidareutveckla. Användare är inte i behov av att köpa licenser för programvara för QGIS eller dess insticksprogram, men det medför förstås att funktionalitet mm används på eget ansvar. Det har varit ett medvetet val att nyttja QGIS + plugins för att öka tillgängligheten för de processer vi tagit fram och beskriver i rapporten. Många av de aktiva insticksprogram, eller funktioner i dessa, som finns i vår installation enligt Tabell 1 är inte kritiska för de aktuella processerna och QGIS v3.28 bör fungera oavsett underversioner.

För att arbete med framtagning av de verktyg som projektet beskriver, vilka är ämnade att ta fram underlag för riskbedömning eller för input till simulering av blockutfall, så behövs grundläggande kunskaper i QGIS. Den installation av QGIS och insticksprogram vi arbetat med ser ut så här:

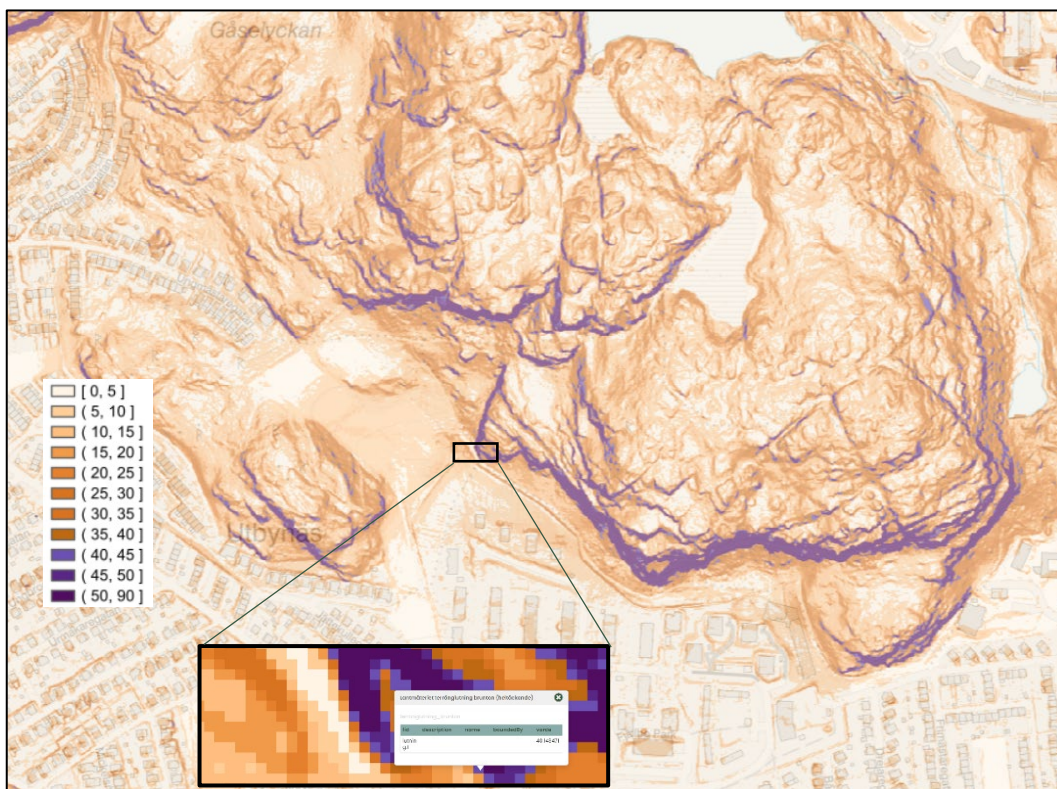
Tabell 1 Den installation i QGIS som projektet har arbetat med

|                                |                      |
|--------------------------------|----------------------|
| QGIS-version                   | 3.28.13-Firenze      |
| Qt version                     | 5.15.3               |
| Python version                 | 3.9.5                |
| GDAL/OGR version               | 3.8.1                |
| PROJ version                   | 9.3.1                |
| EPSG Registry database version | v10.098 (2023-11-24) |
| GEOS version                   | 3.12.1-CAPI-1.18.1   |
| SQLite version                 | 3.41.1               |
| PDAL version                   | 2.6.0                |
| PostgreSQL client version      | unknown              |
| SpatiaLite version             | 5.1.0                |
| QWT version                    | 6.1.6                |
| QScintilla2 version            | 2.13.4               |
| <b>Aktiva python plugin</b>    |                      |
| LAStools                       | 2.1.0                |
| OSMDownloader                  | 1.0.3                |
| processing_fusion              | 3.5                  |
| processing_r                   | 4.1.0                |
| qgis_resource_sharing          | 1.1.0                |
| QuickOSM                       | 2.2.3                |
| Serval                         | 3.32.0               |
| tufLOW                         | 3.11.1               |
| db_manager                     | 0.1.20               |
| grassprovider                  | 2.12.99              |
| MetaSearch                     | 0.3.6                |
| processing                     | 2.12.99              |
| sagaprovider                   | 2.12.99              |

#### 4.2.2 Branta slänter i GIS

Rasterdata i det framtagna rasterdataunderlaget Terränglutning, brunton, är uppbyggt av 1-meterspixlar som syns tydligt om man zoomar in till 1:1000, eller mer. Man kan då ”informationsklicka” i respektive pixel för att få den beräknade lutningen i grader för denna kvadratmeter. Pixlar brantare än 40 grader har lila färgton, medan <40 grader har bruna färgtoner, ju flackare desto ljusare. Vid <5 graders lutning är pixlarna vita. Vid utzoomning sker en interpolering som gör att man fortfarande kan ana branter vid skala 1:100 000 eller mindre – se det lilla kartklippet i Figur 2.

Att ta fram lutningsraster av det här slaget är standardförfarande i GIS, det finns dock lite olika sätt att i detalj beräkna lutningen. Lutningen i sig mäts inte i höjddata, utan man utgår från den höjd per kvadratmeter som LiDAR-data gett underlag till, antingen genom direkta laserträffar på aktuella ytor, eller genom interpolering mellan sådana ytor där laserträffar saknas.



Figur 2 Exempel från rasterlagret Terränglutning, brunbild. Skalan är ca 1:5000. Färgskalan till vänster anger vilka slänlutningar färgerna representerar. Uppförstoringen illustrerar de enskilda pixlarna (1x1 m<sup>2</sup>) där lutningen för varje kvadratmeter kan erhållas som information genom att klicka på pixeln.

Slänlutningarna i Terränglutning, brunbild, har beräknats på följande sätt. Lutningen i varje pixel, dvs varje kvadratmeter, beräknas baserat på höjdskillnaden i omgivande 8 pixlar, enligt illustrationen i Figur 3 och efterföljande beskrivning.

|   |   |   |
|---|---|---|
| a | b | c |
| d | e | f |
| g | h | i |

Figur 3 För att beräkna lutningen i pixel e utgår man från omgivande pixlars höjdvärden och viktat dessa enligt formeln i texten.

Lutningen räknas ut enligt formeln

$$\text{Lutning i pixel e (grader)} = \arctan(\sqrt{[dz/dx]^2 + [dz/dy]^2}) * 57.29578$$

där  $dz/dx$  är (viktad) höjdskillnaden i ost-västled och  $dz/dy$  är höjdskillnaden i nord-sydled. Då pixelstorleken är 1 m beräknas dessa viktade höjdskillnader enligt:

$$[dz/dx] = ((c + 2f + i) - (a + 2d + g)) / 8$$

$$[dz/dy] = ((g + 2h + i) - (a + 2b + c)) / 8$$

De fyra mest närliggande pixlarna viktas genom att dessa multipliceras med 2 i formeln. Beräkningsmetoden kallas Horn's algoritim (1981) och är allmänt använd i GIS-applikationer.

Det finns ytterligare en ganska vanligt använd algoritim för att beräkna släntlutning ("slope") i GIS-världen som är skapad av Zevenbergen & Thorne (1987), vilken utnyttjas av Rf3D. Det brukar sägas att den senare är bättre för jämna ytor, medan Horn är bättre för ojämna ytor, något som inte har utvärderats i projektet.

### 4.3 Verktyg för att bedöma utfallsområde i QGIS

#### 4.3.1 Indata - Lantmäteriets terränglutningsdata

Lantmäteriet har låtit flygburen (airborne laserscanning, ALS) LiDAR (Light detection and ranging) skanna landet vid två tillfällen. Ingen av dessa är heltäckande, men den senaste datafångsten täcker för närvarande **en stor del av landets yta, och är allmänt åtkomligt för nedladdning**. Med höjddata som grund har Lantmäteriet tagit fram produkter som kan användas för olika typer av analys, av vilka några finns tillgängliga för visning på exempelvis SGI:s karttjänst "**Ras, skred och erosion**". Denna karttjänst är för närvarande begränsad ner till en minsta skala 1:10 000, men visar vilka lager som Lantmäteriet tillgängliggjort. Utöver traditionell terrängskuggning ("belyst" höjdmödel) finns även två varianter av terränglutning, en i gråton och en i brun/lila ton. Dessa två är framtagna på något olika sätt, där den senare tagits fram inom ramen för nu aktuellt projekt.

Detaljer kring funktionalitet och färgval i relation till terränglutning (för lagret "Terränglutning Brunton") togs fram i ett samarbete mellan SGI och Lantmäteriet under 2023. Produkter som utvecklats av Lantmäteriet från LiDAR finns (när detta skrivs) presenterad på "[Geodataportalen](#)" under det som benämns "Datamängd grid 1 m".

Bruntonslagret skiljer sig från de normala terrängskuggningar och gråtonslager som Lantmäteriet producerat främst i just färgval och interpolering av färger, med hänsyn till lutningsintervall och zoom-nivå. Bruntonslagret är indelat i 5-gradersintervall för lutning från 0 till 50 graders marklutning (från horisontalplanet) och för marklutning brantare än 50 grader en och samma mörklila färgton. Vid lutning >50 grader är felen i markmodeller för stora för att data ska vara meningsfullt att presentera, beroende på den minskade mängden markträfsreturer från LiDAR och de efterföljande svårigheterna vid bearbetning av data på grund av det.

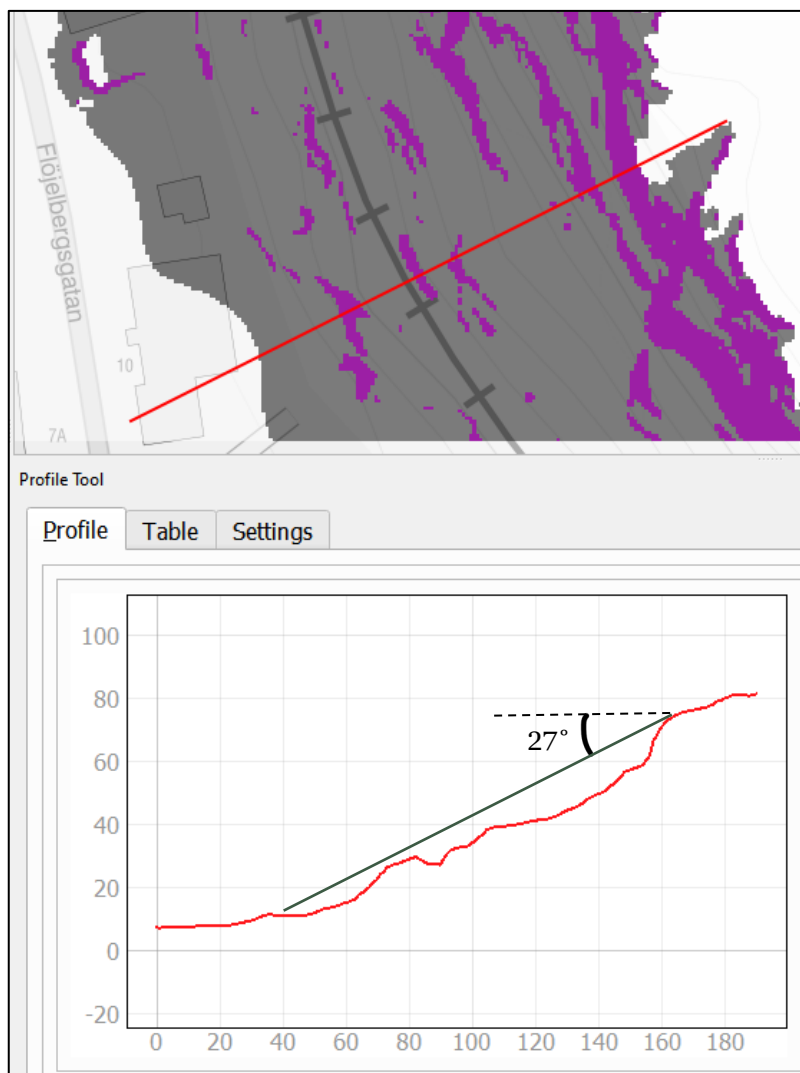
För att kunna zooma in i bruntonslagret till högre upplösning än skala 1:10 000 så behöver man antingen använda tjänsten i Geodataportalen eller ladda ner datamängden och visualisera i egen GIS.

#### **4.3.2 Potentiella utfallsområden**

Med utgångspunkt från terräng brantare än 40 graders lutning skapar verktyget en chimär skugga i lutningsriktningen från respektive brant slänt. Skuggan representerar ett teoretiskt maximalt område dit blockutfall skulle kunna nå under mest gynnsamma utfallsförhållanden. Ett sådant scenario innebär att slänten nedanför blockutfallet är tillräckligt brant och jämn för att blocket inte ska tappa rörelseenergi, utan snarare öka sin rörelseenergi inledningsvis. I scenariet saknas också vegetation och andra hinder som kan bromsa blocket och blockformen är rundad, vilket gynnar utfallslängden.

Inbyggda skuggtjänster finns i de flesta GIS-system, men dessa bygger normalt på en ljusbelysning från en specifikt angiven vinkel i fjärran och ger inte resultat som kan användas i detta fall. Verktyget är rasterbaserat och ger en uppskattning av hur långt ett block potentiellt kan falla ut och nå nedför en slänt. Området markeras som potentiellt utfallsområde nedanför vald slänt. Analysen kan liknas vid den skugga man får om man föreställer sig en belysande källa, till exempel solen, som lyser bakom den plats blocket i slänten befinner sig. Slänter kastar då en skugga ner i slänten. "Skuggan" är i detta fall i stället det område blocket potentiellt kan nå om det skulle lossna och få rörelseenergi nedför slänten. Kriterierna för utfallsområdets storlek bygger på empirisk forskning (se sammanställning i Jaboyedoff & Labiouse, 2011) som visar att block ytterst sällan når längre än en vinkel på 27° ned från horisontallinjen från det utfallande blockets läge. I forskning kring ämnet har vinkeln fått lite olika benämningar, men här har vi valt att kalla den utfallsvinkel. Vinkeln illustreras i Figur 4, där ett utsnitt med slänter brantare än 40 grader är de lila pixlarna, hämtade från brunbildskartan ovan. Det potentiella utfallsområdet som skapas av algoritmen är grått i figuren. Hur algoritmen är uppbyggd mer i detalj framgår i Bilaga 1.



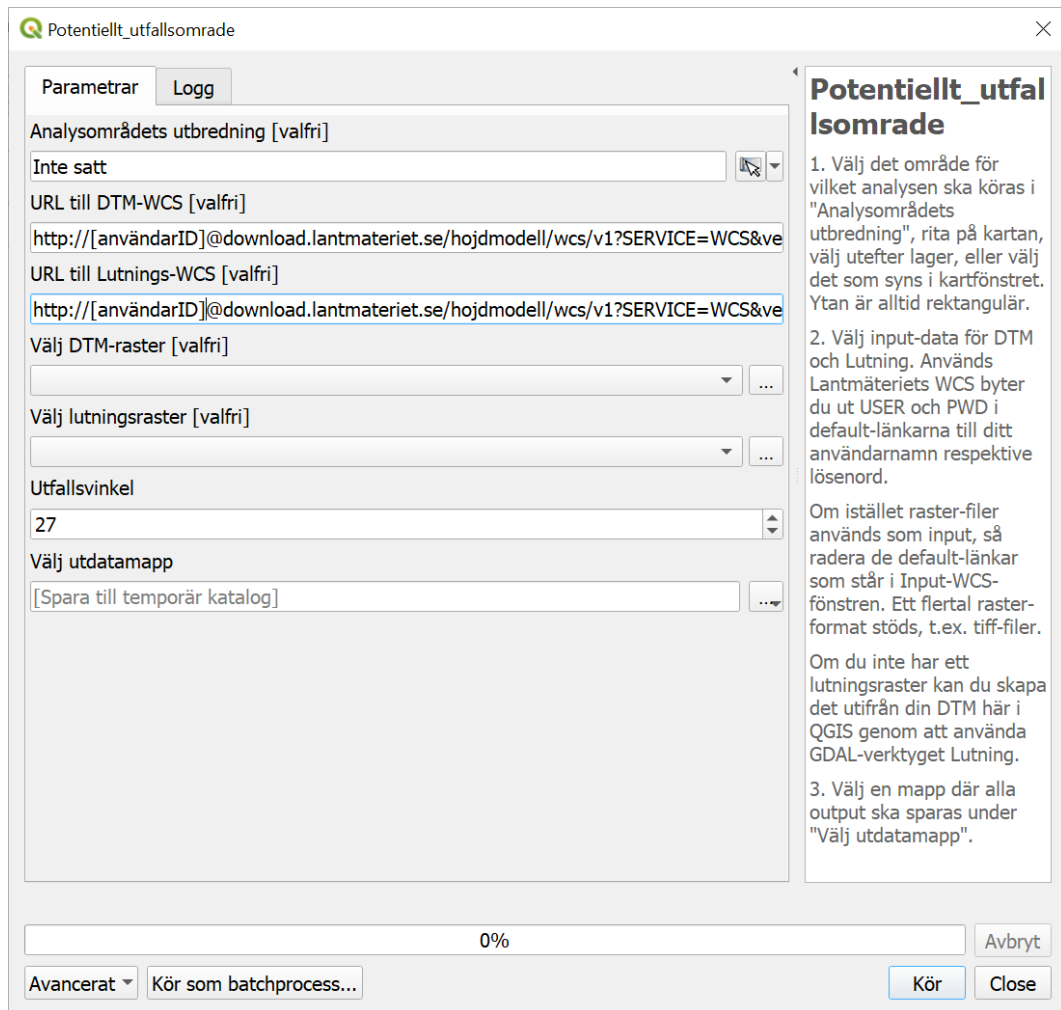


Figur 4 Bilden ovan visar ett utsnitt ur en höjdmodell där lila färg markerar slänter brantare än  $40^\circ$  och svarta områden ligger nedanför slänterna under den vinkel på  $27^\circ$  som illustreras i den röda höjdprofilen i den undre bilden. Vinkeln kan väljas av användaren i verktyget. Vi rekommenderar en vinkel på  $27^\circ$ , baserat på forskning som refereras till i rapporten. Axlarnas skalor i tvärsnittet är i meter.

#### 4.4 Råd för användande

Både kartunderlagen för terränglutning och verktyget för potentiellt utfallsområde kan laddas ner till användares lokala datormiljö. Lutningslagret finns tillgängligt hos Lantmäteriet som WMS och WCS, medan verktyget följer med i leverans från projektet. Verktyget levereras i "befintligt skick" och används med dessa råd efter egen värdering.

Visualisering av branta slänter i brunbildsunderlaget kan ske med valfritt område och skala över landet. Normalt vill man zooma in till det anläggningsområde som ska studeras för att få en känsla för hur branta slänter förhåller sig till anläggningen. I GIS-miljö kan man då lämpligen ha annat topografiskt underlag, eller "gröna kartan" från Lantmäteriet, samt välja att göra brunbildsunderlaget något transparent.



Figur 5 Menydialog för att köra verktyget för att visualisera potentiellt utfallsområde

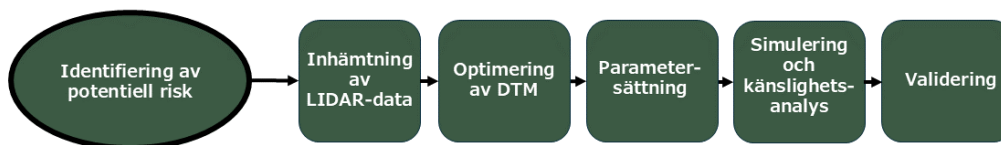
För att visualisera potentiella utfallsområden bör man enbart ha en begränsad yta i brunbildsunderlaget att utgå från för att inte körningen av verktyget ska bli för beräkningstung för datorn. Som framgår av Figur 5 finns en instruktion i fönstret till höger i menyn. Det framgår i punkt 2 att man kan använda lokalt nedladdat rasterunderlag, alternativt använda data direkt från Lantmäteriet. Beroende på valet här fylls de fyra menyraderna i på lämpligt sätt. Lutningsraster som skapas på egen hand enligt punkt 2 i dialogen, sker via plugin GDAL – Rasteranalys/Lutning där selektering vid sådant val kommer att överensstämna med bruntonslagrets "lila" lutningsceller, dvs de brantare än 40°. Utfallsvinkeln rekommenderar vi att sätta till 27 grader, vilket ger en konservativ bild över potentiellt utfallsområde.

## 5 Detaljerad riskbedömning

### 5.1 Inledning

När riskdömningar behöver vara mer precisa krävs en annan metodik än den som enbart bygger på Lantmäteriets höjddata och generell terränglutning, som beskrivits i den översiktliga riskbedömningen under avsnitt 4. Varken Lantmäteriets höjddata eller den generella metodiken för potentiella utfallsområden baserat på denna höjddata är tillräckliga för att nå rätt kvalitet i underlag för detaljerad riskbedömning.

Detaljerad riskbedömning med hänsyn till potentiella risker från branta slänter kan göras på olika sätt. I sin mest enkla form bygger sådan riskbedömning på erfarenhetsbaserad bedömning av sannolikhet för ras eller blockutfall, sannolikt utfalls-scenario för en sådan händelse, samt en konsekvensanalys vilken kan göras olika detaljerad beroende på situationen. Alla steg i en sådan process kan utvecklas till en ökande detaljeringsgrad för att minska subjektiviteten som med nödvändighet finns när en bedömning grundar sig helt eller delvis på personliga erfarenheter. Projektet har utnyttjat befintlig programvara för att i stället simulera utfall i datormiljö. I arbetet har inte ingått utvärdering av metoder för att bedöma stabilitet i berg, eller sannolikheten för att berg eller block blir instabila och sätts i rörelse. Inte heller har någon konsekvensanalys för anläggning, trafik, eller människor ingått i projektet. Simuleringen av utfall är avsedda att visa riskpotentialen för blockutfall genom att belysa vilka områden i och nedanför en slänt som kan beröras, och på så sätt ge underlag för bedömning av olika typer av skyddsåtgärder. Figur 6 illustrerar den process projektet föreslår för att ta fram underlag till en detaljerad, objektiv riskbedömning och de ingående delprocesser som beskrivs mer i detalj senare i rapporten. Då tillförlitligheten i de simuleringar som genomförs behöver vara hög har projektet utvärderat påverkande faktorer och metodik i de olika delmomenten, vilket beskrivs i den fortsatta texten.



Figur 6 Illustrering av process för att ta fram underlag till detaljerad riskbedömning

Identifiering av potentiell risk inför en detaljerad bedömning kan ske med stöd av den preliminära riskbedömning som beskrivits i avsnitt 4. Det kan lika gärna vara kända risker som man vill analysera djupare med stöd av processen.

En detaljerad markmodell (DTM – ”Digital Terrain Model”) över topografin utgör den viktigaste pusselbiten för att simulera blockutfall på ett tillförlitligt sätt. Projektet rekommenderar här LiDAR-teknik samt en efterföljande teknik för processering av data för att optimera modellen av markytan. Insamlad LiDAR-data används även för att ge input till vegetationens skyddseffekt, som också är en viktig input.

Andra parametrar som styr ett blocks väg nedför en slänt är blockets geometri och vikt, liksom markens hårdhet. Beskrivning av hur dessa parametrar sätts beskrivs i kapitel 5, där också övriga delprocesser som leder fram till bra underlag för detaljerad

riskbedömning presenteras. Simuleringar av blockutfall i dataprogram är centralt för den metod som föreslås som stöd vid riskbedömning i projektet. Känslighetsanalys för de ingående parametrarna samt validering av metoden genom analys av utfallens tillförlitlighet är viktigt, inte minst för att kalibrera simuleringarna för lokala förhållanden. Dataunderlag och tillvägagångssätt för den programvara vi använt beskrivs i avsnitt 5.5 och en beskrivning av styrande algoritmer sammanfattas i Bilaga 3, 4 och 5.

## 5.2 Höjdmodellering från LiDAR

I projektet har vi analyserat hur man bäst skapar en detaljrikedom och kvalitet för terrängmodeller till största möjliga nytta för riskbedömning. Tidigt konstaterades att låg flyghöjd och hög punktdensitet (många laserträffar per kvadratmeter) krävs för att skapa en detaljrik och verklighetstrogen höjdmodell av terrängen. Projektgruppen landade då ganska snart i att drönarburen LiDAR-teknik var mest lämplig. Fotogrammetri kan användas i lägen där vegetation saknas, men vanligen har LiDAR-tekniken bättre precision och upplösning.

Det finns en uppsjö av leverantörer som erbjuder tjänster för att utföra datainsamling med LiDAR, där olika typer av drönare, sensorer och processering av data kan användas. Det är viktigt att ställa kvalitetskrav på den data som levereras och i övrigt precisera vad som ska levereras. Det är därför också viktigt att ha en grundläggande förståelse för tekniken för insamling och processering av data. I rapporten beskrivs detta med hänvisning till fördjupande dokumentation. I leveransen ingår även vissa verktyg för att processera data, vars handhavande beskrivs i rapporten och dess bilagor.

I projektet har vi valt att samla in data med hjälp av en leverantör som specialiserat sig på drönarflygning. Den använda tekniken kallas UAS-LiDAR (LiDAR skanning i ett Unmanned Aerial System, dvs 'drönare' med LiDAR). Med en ny (våren 2023) utrustning och programvara för detta ändamål har vi fått levererat rådata (punktmoln), och bearbetade data (klassade punktmoln och höjdmodeller). Vi har därefter i dialog med leverantören analyserat processerna, från insamling av data till färdiga modeller, för att få en uppfattning om felkällor, vilka möjligheterna är att påverka dessa och felens inverkan på resultaten vid simulering.

## 5.3 Från LiDAR till modeller

Utvecklingen inom LiDAR-tekniken har gått snabbt under 2000-talet, vilket gör att mycket av det som beskrivs här blir en ögonblicksbild, både avseende teknik för datainsamling och för processering av data. Projektets mål har varit att skapa en DTM och DSM ("Digital Surface Model") som är "tillräckligt" bra för att fungera som underlag för de simuleringar som senare görs med höjddata som grundparameter. Både DTM och DSM bygger på samma insamlade LiDAR-data.

Tekniken för UAS-LiDAR beskrivs bra på många andra håll och här nedan ges enbart en kort, förenklad överblick.

Laserpulser skickas ut från det instrument/LiDAR-sensor som drönaren bär. Varje puls får en unik identitet för att korrekt analys ska kunna ske. Tiden det tar för pulsen att komma tillbaka avgör avståndet från instrumentet till reflekterande punkt. I vårt fall är

det i huvudsak mark eller vegetation som reflekterar. Man kan få flera reflexer från en puls (vegetation och mark), där senare reflexer vanligen tappar lite energi. Träffytans storlek på marken kallas fotavtryck (från "footprint") och ju närmare marken man flyger desto mindre fotavtryck erhålls. Detta innebär även att om man flyger nära marken har man större sannolikhet att komma igenom vegetationen och därmed bättre förutsättningar för att skapa en mer detaljerad modell av marken. Våldigt tät vegetation är fortsatt ett problem att penetrera. Ett annat problem med både ALS och UAS-LiDAR är brantstående ytor, vilket exempelvis instabila bergslänter ofta är, som inte returnerar några reflexer eller betydligt färre än planare ytor. Det senare problemet kan delvis minskas genom planläggning av flygrutterna för drönaren, inställning för scanningen och via efterbearbetning av data vilket beskrivs mer i detalj senare i rapporten.

Det finns ett antal felkällor kring LiDAR-tekniken, varav flera successivt minskat efter hand som teknik och programvara utvecklats. Här följer enbart de delar som vi bedömer viktigast för kvaliteten på markmodellen med det val av utrustning och programvaror vi gjort. Drönarens sensor sveper terrängen under sig med LiDAR. Avståndsberäkningarna blir bäst vertikalt rakt under drönaren vid flygning då footprint vanligen är mest symmetriskt där och laserpulsens också har kortast väg i det läget. Olika utrustning har lite olika teknik och olika möjligheter att ställa in exempelvis scanningsvinklar. När flygrutten för drönaren bestäms anges bland annat överlapp mellan två parallella flygstråk. Överlapp vill man ha av flera skäl. Dels kan objekt "synas" bättre eller sämre från olika vinklar, dels används överlappen till att minska lägesfel i lasermolnet. Mer om detta i avsnitt 9.

I Bilaga 2 beskrivs mer i detalj hur upplägg av LiDAR-projekt för ändamålet bör se ut.

## **5.4 Bearbetning av LIDAR**

### **5.4.1 Detaljerade modeller från LIDAR**

Processen att samla in data, själva LiDAR-flygningen med drönare beskrivs kort i 5.3, men därefter behandlas det "punktmoln" av datapunkter som LiDAR skapar. Denna process innefattar:

- Rensning av perifera data som antingen ligger utanför intresseområdet, eller är uppenbart felaktiga
- Justering av punktmolnet för att minimera lägesfel
- Klassificering av punkterna i utvalda klasser, där de viktigaste för vår del är mark och olika hög vegetation
- Därefter vidtar en process för att optimera klassningen. Detta behövs eftersom förinställda kriterier sällan är optimala för olika förhållanden och datautfall.

När behandlingen av punktmolnet är klart, tas digitala höjdmodeller (DEM – "Digital Elevation Model) fram för de klasser man väljer. I vårt fall är det DSM och DTM som behövs i simuleringarna av blockutfall. Höjdmodellerna skapas som raster i den upplösning som väljs, vilket brukar bestämmas av hur många markträffar LiDAR har per kvadratmeter. I vårt fall har vi underlag för att ta fram modeller ner till 0,1x0,1 meter. Processen kan använda olika beräkningar för att ta fram höjdvärde per pixel.

Processen beskrivs mer i Bilaga 2.

#### **5.4.2 QGIS och tilläggfunktioner**

I projektet har vi använt GIS-programvaran QGIS, med stöd av dess insticksprogram, för att bearbeta och presentera data för detaljerad riskbedömning.

R är en programmeringsmiljö som mest används för statistiska beräkningar och grafisk presentation av dessa. R är utvecklat i "GNU"-projektet (GNU är ett "fritt" operativsystem), vilket har en lång historia av att utveckla "Open source" – programvara. Miljöer av detta slag får bidrag från utvecklare från många håll i världen, men R har en kärntrupp på Universitetet i Auckland. Programmet "lidR" har utvecklats som en specifik del ("r-lidar") i denna miljö. Programvaran och pluginversionen för QGIS är fortfarande fri att använda, trots att programmet nyligen gått upp i ett kommersiellt bolag. Programmet lidR är inriktat på att bearbeta punktmoln som LIDAR-data, för att bland annat interpolera, klassificera och skapa DEM, DSM eller DTM.

I QGIS ingår ett antal insticksprogram i grundinstallationen som kan behöva aktiveras, medan andra behöver installeras av användaren. Råd för Bearbetning av punktmolnsdata, liksom råd för processer i lidR (som plugin i QGIS), samt generell vägledning för hantering av QGIS insticksprogram för aktuella ändamål återfinns i Bilaga 3.

#### **5.5 Simuleringar med Rockyfor3D**

Programmet Rockyfor3D (vår förkortning Rf3D) valdes för att simulera blockutfall. Programvara återfinns på [www.ecorisq.org](http://www.ecorisq.org). "ecorisQ" är ett globalt nätverk inom "natural hazard risks" med säte i Schweiz. Både organisationer och privatpersoner kan bli medlemmar till en relativt låg kostnad (100-350 CHF för 2024). RF3D används aktivt runt om i världen och har utvecklats successivt sedan 1998 under ledning av Luuk Dorren, professor vid institutionen för tillämpad vetenskap vid universitetet i Bern, Schweiz. En rad forskare från främst Europa har bidragit till utvecklingen av programvaror som stöd för geologiska naturfaror på ecorisQ, bland annat Rf3D. Primärt har utvecklingen skett med tanke på de stora risker som ras och blockutfall utgör i länder med stark topografi i nära anslutning till bebyggelse och infrastruktur.

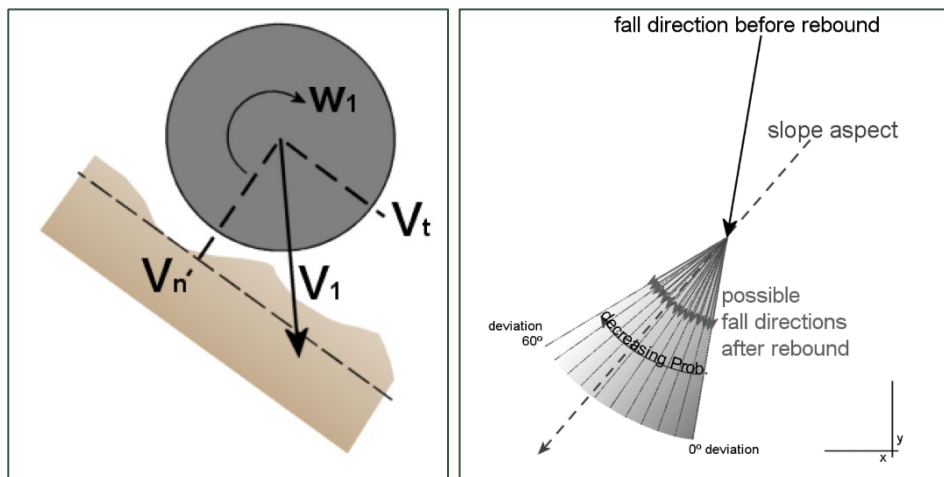
Ett blockutfall är komplext och inget utfall är det andra likt. Algoritmerna som reglerar utfallen i modellen är av naturliga skäl därför en förenklad matematisk beskrivning av de processer som styr utfallen. Beskrivningen av utfall i ett simuleringsprogram behöver därför kalibreras för lokala förhållanden och resultaten verifieras så långt som möjligt (i första hand via bakkalkylering av inträffade blockutfall).

Valet av RF3D baserar sig på egen utvärdering av funktion (användarvänlighet och validitet), programmets tillgänglighet, "transparens" och kostnad. Som grund för utvärdering och val av programvara för simulering ligger egna tester och analyser, vetenskapliga artiklar om riskbedömningar av ras- och blockutfallsproblematik, samt inte minst "benchmarking"-studier. Övriga programvaror som övervägdes inledningsvis i projektet var RAMMS:ROCKFALL och Rocscience Rockfall. Utveckling av programvaror för ras och blockutfall fortgår och även om vi i detta projekt ger råd om hur man bör

utföra insamling av underlagsdata, preparera dem och köra simulering i RockyfoRf3D, så kan realistiska simuleringar även skapas på annat sätt. Det viktiga, oavsett valet, är att man validerar simuleringsverktyget, kalibrerar det för lokala förhållanden och, så gott det går, även verifierar datasimuleringarna. Hur man kan göra detta beskrivs senare i rapporten.

Mycket av texten som beskriver programvaran och hur simuleringar genomförs är hämtat ur den engelskspråkiga manualen för RockyfoRf3D som finns på ecorisQ hemsida för nedladdning. Referenser i manualen anges enbart då det anses särskilt viktigt för en transparent förståelse. Aktuell version för Rf3D är 6.0 där uppdatering av manualen pågår när detta skrivs.

Programvara använder en kombination av sannolikhetsbaserad och deterministisk modell av blockutfall. Enbart delar av de stokastiska variablerna går att påverka för användarna, medan algoritmerna som sådana inte är "open source", vilket medför att dessa bara delvis kan utvärderas. Simuleringarna skapar en processbaserad, probabilistisk utfallsmodell för bergblock. Processerna som involveras är gravitation, normal och tangentiell restitution vid kollision mellan block och mark i modellen, samt kollision mot träd. Restitutionsvärdena ger ett värde på hur elastisk kontakten med mark är och hur mycket rörelseenergi som förloras. Figur 7 illustrerar hantering av blocks rörelse vid sammanstötningen med mark.



Figur 7 Bilden till vänster illustrerar delar av programmets hantering av block i modellen. Bilden till höger illustrerar ett blocks rörelseriktning före markkontakt och hur dess rörelse efter simuleras. Från Rockyfor3D (6.0) revealed (2024). Se text för beskrivning.

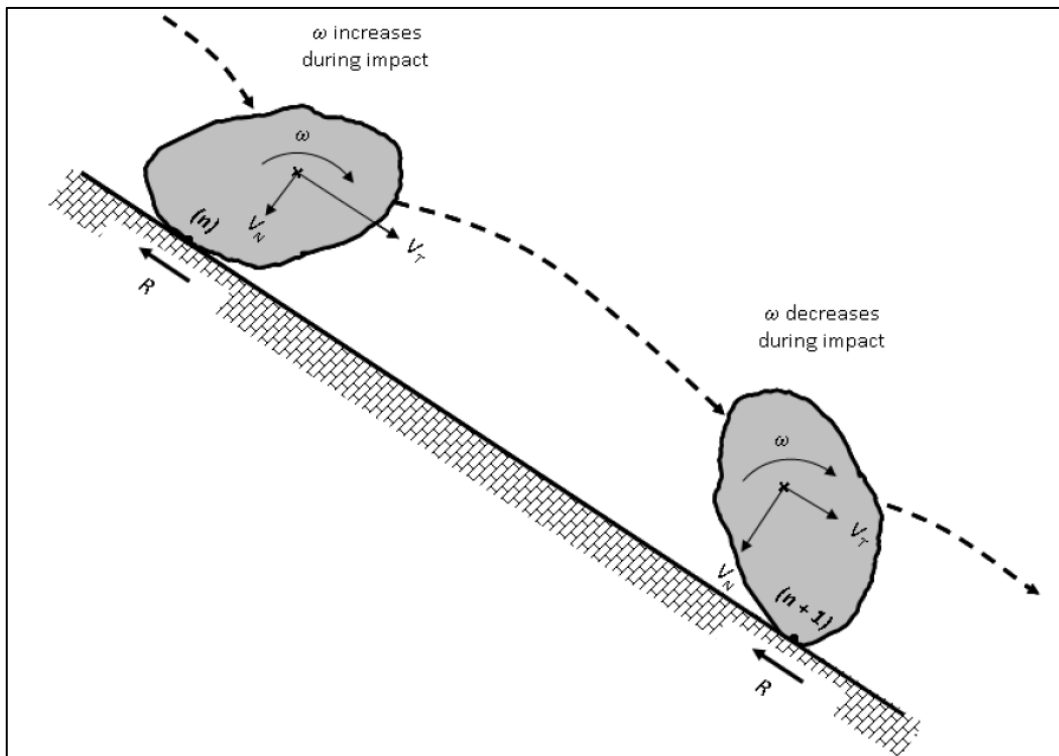
I utgångsläget (default) ges blocket i modellen en utgångshastighet på 0,5 m/s i horisontalled och 0,5 m/s i vertikalled. Hastigheten kan antas motsvara ett block som plötsligt förlorar sitt fäste i slänten, utan någon egentlig inverkan från extern kraftpåverkan. I modellen har blocket denna hastighet när den lämnar sin "källpixel" i höjdmodellens raster. Man har här valet att ge blocket extra energi vid starten, om man tror sig veta vad som lokalt kan initiera blockutfall, så som exempelvis ett fallande träd

eller en rotvälta. Detta görs genom att ge blocket en extra fallhöjd i startpositionen, vilket då anges i program-menyn.

Blocket kan ges olika form, densitet och dimensioner, antingen i de rasterfiler som simuleringen utgår från, eller i program-menyn (varifrån de aktuella rasterfilerna då skapas i programmet).

Med hastigheten i horisontal- och vertikalled från startpositionen beräknas parabelrörelsen med hjälp av Newtons lagar. Blocket ges initialt ingen rotation utan erhåller detta (vinkelhastighet,  $\omega$ ) vid första markkontakten (rebound i figuren).

Block som rullar modelleras som små, korta fall även för sfäriska block, där tyngdpunkten "faller" till nästa markkontakt i små steg så länge vinkeln mellan de två linjerna  $V_n$  och  $V_1$  i Figur 7 är större än 0 och friktionen i markkontakten överskrider. Friktionen i kontaktytorna anses något förenklat styras av markens friktionskoefficient som ansätts av programmet i och med att markegenskapen ("soiltype" i program-menyn) anges.



Figur 8 Vinkelhastigheten ( $\omega$ ) efter markkontakt styrs av blockets infallsvinkel, hastighet, massa och tyngdpunkt i förhållande till träffpunktens läge mot marken, samt markens geometri och hårdhet.  $\omega$  kan minska eller öka, beroende på dessa faktorer. Från Wyllie (2014).

Funktioner i programmet inkluderar möjlighet att erhålla blockens energi i given punkt och möjlighet att analysera skyddsbarriärers effekt genom att ange dess motståndskraft och geometri.

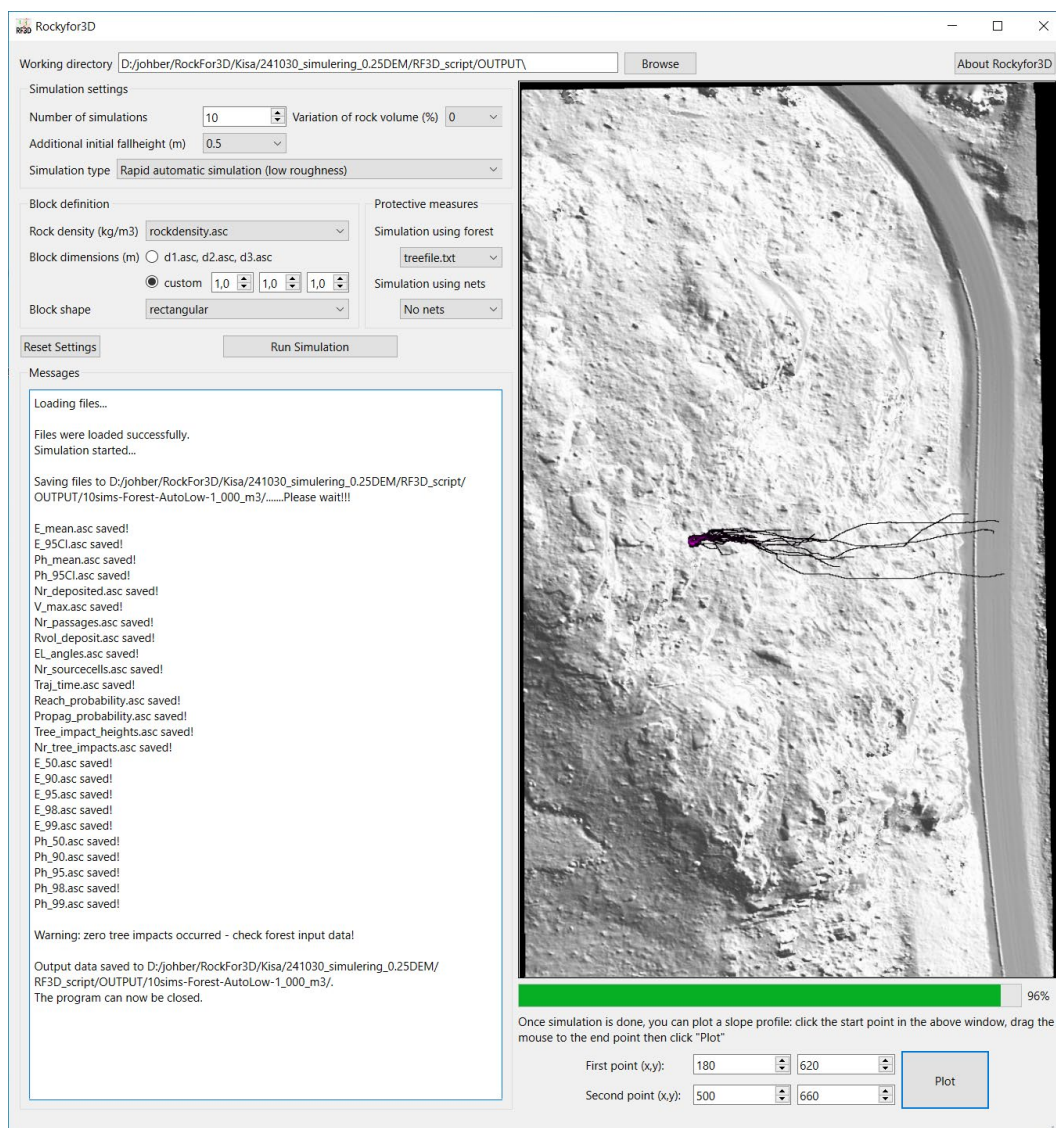


### 5.5.1 Underlag för simulering (till Rockyfor3D)

Input till Rf3D sker via en program-meny (GUI) och med ett antal rasterfiler i ESRI ASCII-format som skapas i GIS. Vi har i projektet skapat verktyg i QGIS som underlättar processen för detta. Ett minimum av sex raster krävs vid en simulering.

Det går att köra simuleringar i programmet direkt, med enbart en terrängmodell (benämns dem.asc i programmet). Det blir då en förenklad simulering ”på säkra sidan”. Nedan ges en punktlista för de input som behöver ges (se exempel i 10):

- Arbetsmapp (Working directory) – här ska de underlagsfiler som krävs ligga, inte minst höjdmollen i dem.asc som är ett minimum även om man bara vill köra en snabbsimulering. I mappen hamnar även resultatfilerna (25 stycken).
- Antal simuleringar – Observera att antal simuleringar gäller per källa, där varje pixel man angett som källa för blockutfall räknas som en källa (tänk på att upplösning i höjdmollen, areans storlek och antal simuleringar påverkar tiden det tar för en körning).



Figur 9 Program-meny i Rf3D efter exempelkörning, där 10 simuleringar gjorts.

- Extra fallhöjd – här kan man välja att ge blocket extra energi i starten. Default är 0,5 meters extra fallhöjd.
- Simuleringstyp - Här finns tre val; två snabbsimuleringsalternativ med två alternativa markförutsättningar (en med jämnare och en med mer ojämn mark), samt en simuleringstyp där man har bättre indata och då preciserar olika parametrar själv i ascii-filer (samt eventuell en treefile.txt om man skapat en sådan).
- Det simulerade blockets form kan anges i program-menyn eller i ascii-filer. Generell form kan också anges (Antingen i bl\_shape.asc eller som rektangulärt, elliptiskt, sfäriskt, eller diskformat). Man kan även ange om man vill att blockdimensionerna ska varieras mellan individuella simuleringar i en körning, vilket kan vara användbart om man har ett statistiskt underlag för hur blocken brukar variera i en känd problemslänt.
- Simuleringen kan göras med eller utan träd i slänten. Om man kör med träd i modellen kan dessa matas in i form av en trädfil (treefile.txt) eller som rasterfil. I båda fallen behövs även en fil som anger hur stor andel av skogen/träden som är barrträd. Programmet har utvecklat algoritmer som tar fram trädets diameter i brösthöjd (DBH=1,3 meter över marken), vilket i sin tur används för att beräkna vilken skyddseffekt trädet har vid olika typer av träff mellan block och trädstam. Det är en viss skillnad mellan barrskog och lövskog med avseende på deras skyddseffekt.
- Man har även valet att simulera med nät, det vill säga simulerade (eller verkliga) skyddsnet. Läs mer i avsnitt 6.

### 5.5.2 Resultatfiler från Rf3D

I program-menyn (se Figur 9) kan man följa simuleringprocessen när man väl startat simuleringen genom att trycka på "Run simulation". I fönstret nere till vänster i menyn får man då en bekräftelse på att filerna sparas i den arbetsmapp man valt och vilka filer som skapats.

## 5.6 Råd och beskrivning av parametrar inför simulering

I detta avsnitt beskrivs de parametrar som ingår vid simulering i detalj, samt hur de nödvändiga raster-filerna skapas. Alla filer ska vara i ESRI ASCII-format, förutom trädfilen. Om man väljer att ha en sådan ska den vara en textfil (.txt).

1. Det mest grundläggande underlaget/parametern utgörs av själva höjdmodellen, vilken skapas till en ascii-fil som benämns dem.asc, där "dem" står för "digital elevation model". I GIS är det annars vanligt att skilja mellan DTM respektive DSM, vilka båda kan sägas vara DEM:er. I Rf3D är DEM likställt med DTM, vilket kanske kan uppfattas lite ologiskt. Rf3D rekommenderar en upplösning i höjdrastret lägre än 1-2 meter, på grund av att man upplevt att utfall har en tendens att vid högre upplösning nå för långt. Manualen skrevs dock för några år sedan och mycket har hänt i LiDAR-tekniken för möjligheten att få högre kvalitet och korrekt återgivna detaljer i markmodellen. De testsimuleringar vi kört i

projektet tyder inte på några uppenbara skillnader på grund av valet av upplösning i DTM:en. Tester har skett med 1 m, 0,5 m och 0,25 meters upplösning. I exemplet i Figur 9 har 0,25 m raster använts. Bilden som visualiserar utfallen i figuren har en färgsättning som inte går att ändra i programmenyns fönster, men vi rekommenderar egen stilsättning av höjdm modell och simuleringar i GIS, så att de uppfattas på ett sätt som tydliggör upplösningen i resultaten.

Det är viktigt att samtliga rasterfiler har identisk utbredning (antal rader och kolumner) som dem.asc. De inledande raderna i dem.asc ska se ut som följande exempel (Tabell 2) om man öppnar dem i en textfilsläsare. Höger kolumn beskriver värdet.

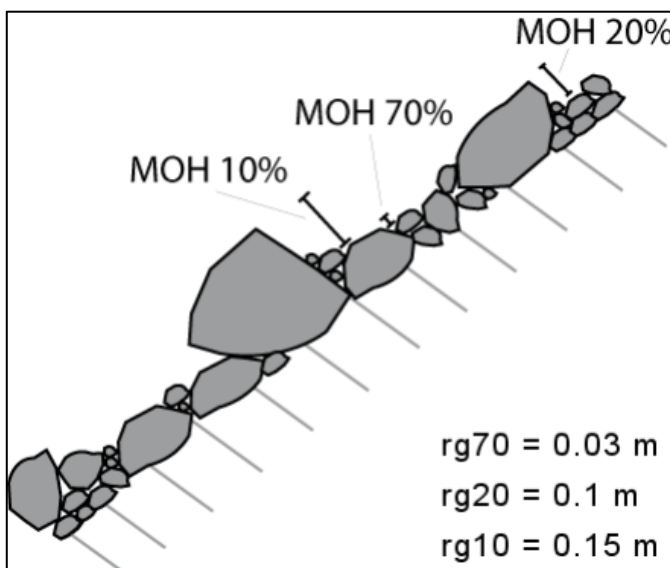
Tabell 2

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| <b>ncols 557</b>              | antal kolumner                                     |
| <b>nrows 1206</b>             | antal rader  |
| <b>xllcorner 538932.7500</b>  | rastrets nedre, vänstra hörns<br>ost-västkoordinat |
| <b>yllcorner 6424071.7500</b> | rastrets nedra vänstra hörns<br>nord-sydkoordinat  |
| <b>cellsize 0.2500</b>        | rastrets upplösning i meter                        |
| <b>nodata_value -9999</b>     | värdet för celler som saknar data                  |

Därefter följer decimaltal för höjdvärde för rastrets alla celler.

2. I rasterfilen rockdensity anges densiteten i det/de block som utgör käll-rasterceller genom att dessa celler får värdet för blockens densitet i kg/m<sup>3</sup>. Celler i rastret som inte är källa för blockutfall ska ha värdet 0. Accepterade värden för densiteten är mellan 2000 och 3500.
3. För att ta hänsyn till ojämnheter på marken finns i Rf3D parametern ”Mean Obstacle Height” (MOH). Den är framför allt skapad med tanke på lägre upplösningar i höjdm modellen som inte fångar upp block mm i den detaljerade markstrukturen. Parametern förändrar inte markmodellen, eller slänthlutningsvärden i sig, men den tangentiella restitutionskoefficienten (som påverkar blockens rotationshastighet) kan få stor påverkan från högre MOH-värden, vilket kan illustreras av Figur 8 där underlaget är helt plant, men vid ojämnheter påverkar rotationen av blocket på ett påtagligt sätt. Det är meningen att värdena (enligt Figur 10 nedan) ska mätas vid en fältundersökning i den aktuella slänten. Indelningen av markytan i procentsatserna 10, 20, och 70% är fasta, där värden från 0 -100 meter ska ansättas, vilket är höjden över omgivande mark mätt vinkelrätt mot slänten nedåt i slänthlutningens riktning. Höga värden stoppar upp block i simuleringen. Med den upplösning för DTM vi valt att simulera med kommer man i stort sett bort från denna parameter, eftersom detaljerna markstrukturen redan är representerad i modellens upplösning. En fältkontroll kan avgöra om man trots allt skulle behöva ansätta något höjdvärde för någon av de tre delparametrarna. Noël m.fl. (2021) beskriver mer om relationen mellan

block och mark och markstruktur, samt fördelarna med en detaljerad markmodell.



Figur 10 Mean obstacle height (MOH) illustrerad i ett exempel. Från Rockyfor3D (6.0) revealed. Se text för beskrivning.

Vi har i de tre försöksområdena som ingått i projektet inte haft anledning att testa annat än med låga värden ( $\leq 5$  dm), och då sett att markmodellerna generellt ger en upplösning där block och andra ojämnheter inkluderas i modellerna. De värden man väljer att ansätta för MOH slumpas under simuleringarna runt i markmodellens pixelceller, baserat på procentsatserna, så att alla celler alltid har antingen värdet för 10, 20 eller 70%.

Tabell 3 Tabellen visar värden som används vid snabb, automatisk simulering. Ur Rockyfor3D (6.0) revealed.

| Terrain         | Soil type | Low roughness |      |      | Medium roughness |      |      |
|-----------------|-----------|---------------|------|------|------------------|------|------|
|                 |           | Rg70          | Rg20 | Rg10 | Rg70             | Rg20 | Rg10 |
| Sources area    | 6         | 0             | 0    | 0    | 0                | 0    | 0    |
| Slope > 38°     | 5         | 0.05          | 0.05 | 0.1  | 0.05             | 0.1  | 0.1  |
| Slope 32° - 38° | 4         | 0.05          | 0.1  | 0.2  | 0.1              | 0.2  | 0.3  |
| Slope 20° - 32° | 3         | 0.05          | 0.1  | 0.15 | 0.1              | 0.15 | 0.25 |
| Slope 10° - 20° | 2         | 0             | 0    | 0.1  | 0                | 0.1  | 0.1  |
| Slope < 10°     | 1         | 0             | 0    | 0    | 0                | 0    | 0    |

Vid snabbsimulering ansätts värden både för MOH och soiltype (se punkt 4 på följande sida) baserat på släntlutningen enligt Tabell 3. Har man en hög upplösning i DTM ( $\leq 0,25$  m) så kan dessa snabba simuleringar i värsta fall ge något för korta utfall enligt Rf3D (se kommentar nedan).

Kommentar: Den underlagande höjdmödel i visualiseringar vi gjort i QGIS, och som vi visar exempel på i denna rapport (Avsnitt 9), är en skuggad höjdreliëf belyst från nordväst, med en upplösning på 0,1 m<sup>2</sup>. Självva simuleringarna som visas är genomförda baserat på modeller med en grid med upplösning på 0,25 m<sup>2</sup>, dvs ett höjdvärde på varje sådan pixel. Med tanke på den höga densiteten av markträffar i underliggande LiDAR så fångar denna upplösning i stor utsträckning upp mindre ojämnheter i terrängen som vid lägre upplösning annars jämnas ut vid lägre upplösningar. Rf3D rekommenderar i sin manual lägre upplösning men det beror på att programmet ursprungligen är framtaget för mer storskalig analys och för en tid då datakraft var ett större problem än idag. Vi ser att resultaten blir trovärdiga och man kan minimera arbetet med att ta fram MOH genom att helt enkelt sätta värdena lågt eller till 0, när det inte finns tecken på att höjdmödeln missat uppenbar topografisk ojämnheter. Hög upplösning i höjdmödeln tar generellt sett hand om ojämnheterna denna parameter ska beskriva på ett bra sätt.

- Släntens markförhållanden ("soiltype") ansätts i soiltype.asc enligt Tabell 3. Värdet 1-7 skapar en restitutionkoefficient ( $R_n$ ) som ett variationsspann i enlighet med tabellen. Koefficienten kan beskrivas som hur effektivt blocket studsar, där 1 motsvarar en perfekt elastisk studs och 0 att det inte studsar alls.  $R_n$  verkar i normalens riktning, dvs vinkelrätt mot släntlutningen och varierar slumpmässigt inom intervallet vid simulering.

Tabell 4 Olika marktyper som kan väljas (kallade soiltype's i programmet). Ur Rockyfor3D (6.0) revealed.

| Soiltype | General description of the underground  | mean $R_n$ value | $R_n$ value range |
|----------|---|------------------|-------------------|
| 0        | River, or swamp, or material in which a rock could penetrate completely                           | 0                | 0                 |
| 1        | Fine soil material (depth > ~100 cm)  | 0.23             | 0.21 - 0.25       |
| 2        | Fine soil material (depth < ~100 cm), or sand/gravel mix in the valley                            | 0.28             | 0.25 - 0.31       |
| 3        | Scree ( $\varnothing$ < ~10 cm), or medium compact soil with small rock fragments, or forest road | 0.33             | 0.30 - 0.36       |
| 4        | Talus slope ( $\varnothing$ > ~10 cm), or compact soil with large rock fragments                  | 0.38             | 0.34 - 0.42       |
| 5        | Bedrock with thin weathered material or soil cover  | 0.43             | 0.39 - 0.47       |
| 6        | Bedrock   | 0.53             | 0.48 - 0.58       |
| 7        | Asphalt road  | 0.35             | 0.32 - 0.39       |

- För blockform och blockdimension kan underlagsraster skapas i program-menyn, men också genom att ta fram rasterfiler i GIS.
- Utöver ovan beskrivna rasterfiler kan även raster för olika skogsbestånd definieras i GIS och utgöra input vid simulering. Vi rekommenderar dock att skapa en textfil där alla träd definieras i en textfil (treefile.txt) med hjälp av LiDAR-data. Projektet har skapat verktyg för att göra detta i QGIS – se Bilaga 3 och 4 för beskrivning om hur detta går till.

## 5.7 Verktyg i QGIS för att skapa underlagsfiler i ASCII

Det finns en manual för hur underlagsfiler ska se ut och tas fram i Rockyfor3D. Den går att följa som den är, men vi har underlättat den processen något genom att dels skapa verktyg för detta och beskriva här hur man kan arbeta med stöd av QGIS. Eftersom underlagsfilerna är rasterfiler som ska beskriva någon egenskap för ytor i slänten, eller för enstaka celler i rastret (som exempelvis källcell för blockutfall), så är det smidigaste sättet att peka ut område eller cell direkt med verktyg i GIS. Detta sker med en så kallad shapefil, vilket är ett klassiskt GIS-format för ytor. Dessa består av tre filer (.shp, .shx och .dbf) och den fil som man arbetar med ska heta terrain (.shp, .shx, respektive .dbf)

Rf3D utnyttjar GIS-programvaran SAGA GIS för att skapa de underlagsfiler som beskrivs i 5.6. SAGA finns som plugin till QGIS, men vi har inte fått aktuell process att fungera med de funktioner som krävdes i vår version av QGIS, vilket gjorde att vi skapade ett verktyg i QGIS för att åstadkomma detta.

Råd för hur verktyg mm används finns i Bilaga 3.

## 6 Verifiering av simuleringsresultat

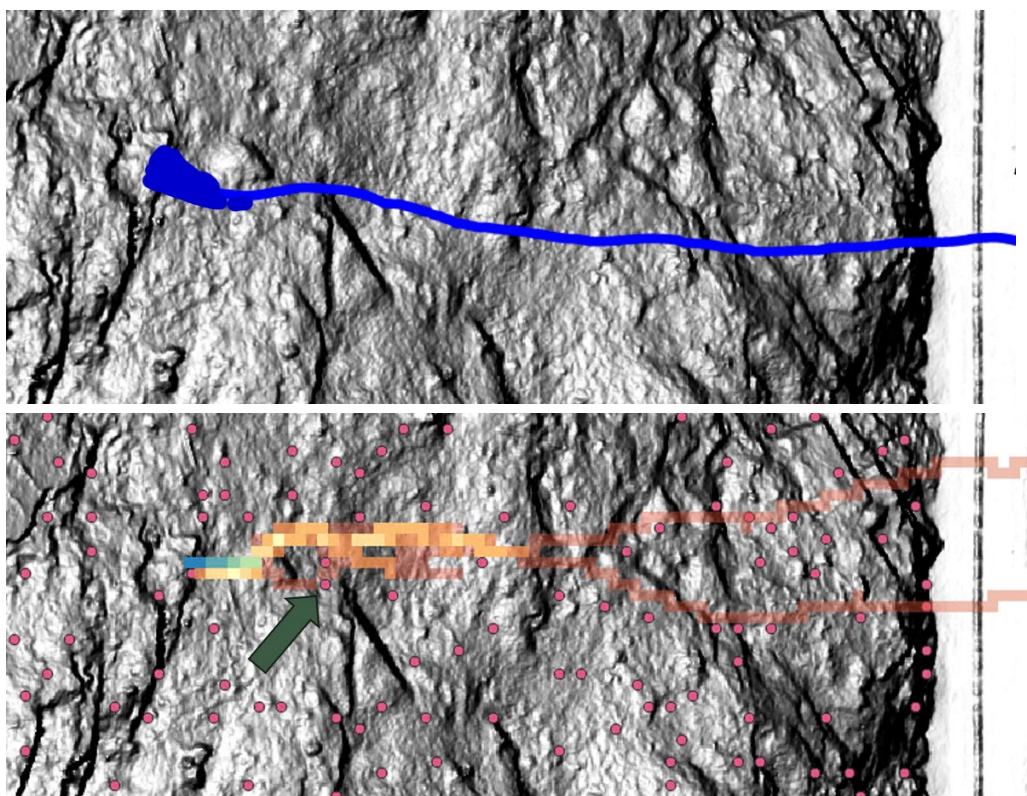
För att få en tydlig återkoppling på utförda simuleringars utfallsresultat behövs verkliga fall för verifiering. Sådan är sällan väl beskrivna och vi har inte funnit några dokumenterade utfallsförlopp i svensk litteratur. Det finns studier som specifikt initierat blockutfall för att studera fallförloppet i detalj (se exempelvis [Thorbjörnson Lind, 2016](#)), men där förhållanden och statistiken oftast varit begränsande för att dra generella slutsatser.

Inom ramen för detta projekt fanns två fall som det fanns information kring, ett vid Norrahammar och ett vid Kisa. Det vid Norrahammar var dock initierat av nedsprängning av block, varför det inte kunde betraktas som ett verkligt fall. Fallet vid Kisa kunde dock följas i terrängen, med stöd av vittnesbeskrivning och kvarstående skador på mark, träd och väg. Det aktuella fallet beskrivs mer nedan och simulering genomfördes med ansättande av olika utfallsenergi för att jämföra kalibrerad simulering med verkligt fall.



Figur 11 Skador på träd orsakade av ett blockutfall 2020.

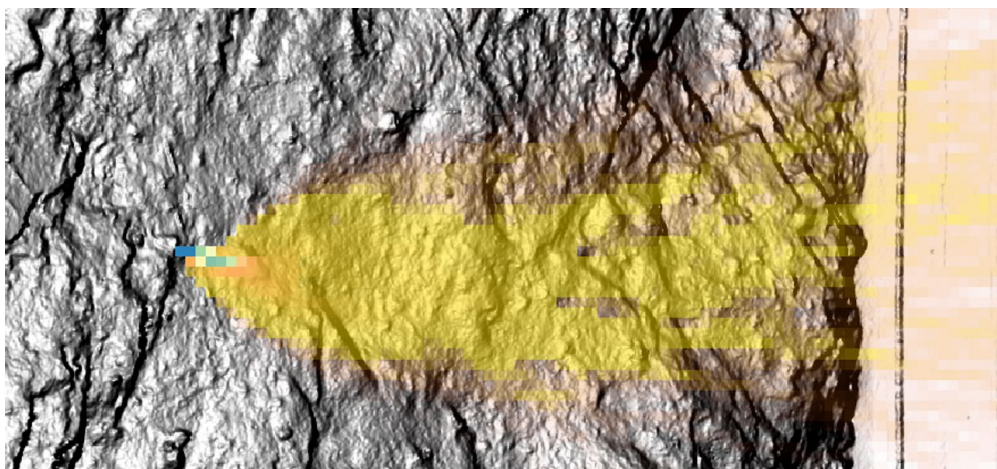
Skador på träd som illustreras i Figur 11, vittnesbörd med avseende på utfallsplats, samt spår efter ny-asfaltering på grund av orsakade skador på vägen nedanför, gjorde att utfallsbilden gick att avbilda med ganska stor säkerhet, vilket illustreras i övre bilden i Figur 12. Det finns en osäkerhet kring själva utfalls-scenariet, det vill säga initieringen av utfallet. Enligt muntlig information från vittneskällan (Karl-Johan Loorents, Trafikverket) så ska blocket ha lösgjorts och fått energi på grund av rörelser i träd och dess rotsystem. Hur mycket energi blocket har fått är osäkert, varför vi har provat med lite olika energi vid simuleringarna. Detta påverkar inte det geometriska förloppet, som illustreras i nedre bilden i Figur 12, men däremot utfallets längd. Blocket, som återfanns någorlunda bevarat i närheten, var ca 0,7-1 m<sup>3</sup> stort och relativt kubiskt. Det definierades i Rf3D och gavs en extra rörelseenergi vid startpunkten, vilket sker genom att "släppa" det från höjd (i aktuellt fall 3 meter) ovanför utfallsplatsen i modellen. Den extra energin krävdes för att blocket skulle nå den identifierade slutdestinationen.



Figur 12 Identifierad utfallsbana i övre bilden och simulerat utfall (10 st) i nedre bilden. Grön pil pekar på skadade träd i Figur 11.

I Figur 12, nedre bilden, så framgår att det endast är ett fåtal utfall av de 10 som ingick vid denna simulering som nådde vägen. Ett av dessa liknar det verkliga förloppet. Färgerna i bilden ska illustrera sannolikheten för att block når en viss pixel i modellen. Vid mer omfattande simulering, skapas en större utfallsbredd i slänten, med olika sannolikhetsfördelning. I resultaten av de 1000 simuleringar som illustreras som sannolikhet för utfallslängd i Figur 13, så stannar blocken upp i slutningen. Men med varierande, ganska låg sannolikhet når block vägen i vissa fall.

Figur 13 högt upp i slänten och de utfall som når vägen är ganska utspridda, med låg sannolikhet för varje enskild plats. Adderas alla utfall som når vägen, blir förstås den sammanlagda sannolikheten högre.



Figur 13 1000 simuleringar från den kända utfallsplatsen, med låg, men varierande sannolikhet för block att nå enskilda platser utmed vägen.

## 7 Riskreducering

Det är möjligt att analysera hur en fysisk barriär av något slag påverkar utfallen i simuleringarna och ger stöd vid bedömning av utformning av exempelvis skyddsnäts läge, höjd och kapacitet för att åstadkomma den grad av riskreducering som önskas uppnås.

I Rf3D finns inbyggda funktioner för att simulera med skyddsnät som kan ge två typer av resultat. Man kan markera läge på tänkt skydd längs en linje som ritas in i terrain.shp innan batchkörningen tar fram underlagsfilen i ASCII. Beroende på vilka värden som sätts i filerna:

1. net\_number.asc (integer type raster; [values 0 – 999])
2. net\_energy.asc (integer type raster; [values 0 – 20000 kJ])
3. net\_height.asc (integer or double type raster; [values 0 – 10 m])

Filerna tas fram med stöd av QGIS på liknande sätt som beskrivits tidigare. I detta fall dras en linje i shape-filen. Om höjdvärdet sätts till 0 så påverkas inte simuleringen, men all data för block som passerar linjen dokumenteras i en resultatfil.

Med stöd av simuleringar av den typ som illustreras i Figur 13 kan man skapa underlag vid bedömning av behovet av att installera skyddsnät eller liknande, med en optimal kapacitet och geometri.



## 8 Resultat och leverans

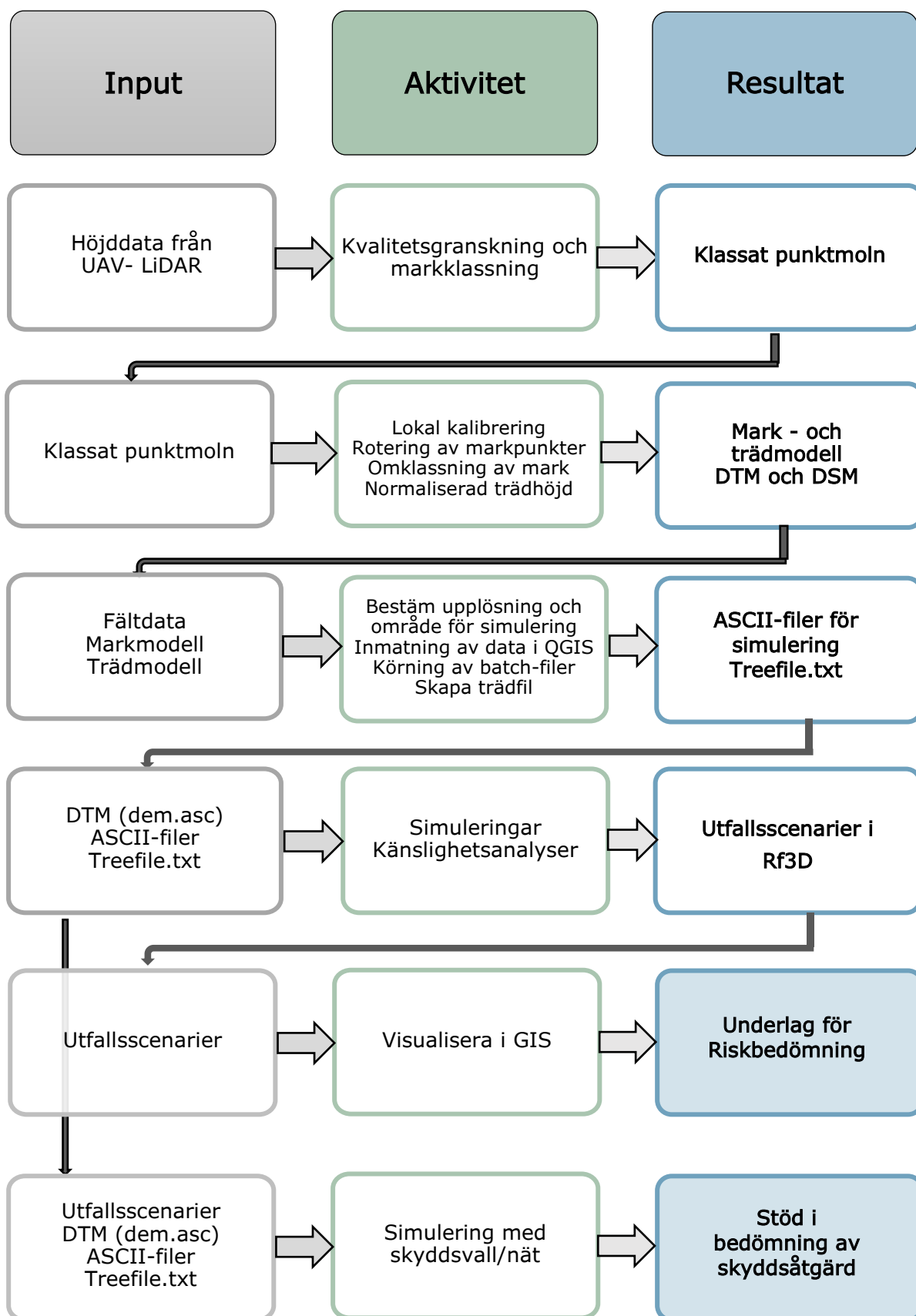
Denna rapport dokumenterar resultat uppnådda i projektet, liksom dess genomförande. Som leverans från projektet bör även ses det ”brunbildsunderlag” som tagits fram av Lantmäteriet på projektets initiativ. Verktyg framtagna i QGIS kan också sägas ingå i leveransen då de är hjälpmedel för att genomföra aktivitet eller ta fram underlag för sådan.

För översiktlig riskbedömning finns Lantmäteriets Terränglutning, brunbild i dagsläget tillgänglig till skala 1:10 000 via SGI:s karttjänst; <https://gis.sgi.se/rasskrederosion>, och inom en snar framtid även i högre upplösning i karttjänst riktad till de som är verksamma med riskbedömning kring slänter. Lutningslagren finns även att ladda hem från [Geodataportalen](#). Verktyget för att översiktligt beräkna potentiellt utfallsområde levereras så att det blir möjligt att installera enligt instruktioner i denna rapport i QGIS.

### 8.1 Sammanfattande schema för detaljerad riskbedömning

Skissen på nästa sida (Figur 14) illustrerar de olika stegen i de processer för detaljerad riskbedömning av potentiella blockutfall som vi beskrivit i rapporten. Aktiviteterna, underlag för dessa aktiviteter, samt de resultat som de skapar beskrivs i rapporten.

Observera att block inte nödvändigtvis lösgörs enbart från bergslänter, utan kan också komma i rörelse från en moränslänt där blocken kan ligga utsatta för erosion eller påverkan från exempelvis fallande träd eller deras rotvältor. Processen kan användas för block i brantare slänter, oavsett dess ursprung.



Figur 14 Illustration av de processer och resultat som ingår i den metodik projektet arbetat fram.

## 9 När kan simuleringar vara användbara?

### 9.1 Exempel på behov

Simuleringar i Rf3D kan användas i flera olika syften och kan läggas upp på olika sätt efter behov och syfte. Några exempel:

- Ny anläggning ska passera nedanför en större sluttning där den översiktliga riskbedömningen pekar på potentiella risker med hänsyn till bergslänter. Aktuella släntavsnitt väljs ut och en detaljerad laserscanning utförs. Hela slänten processas för att skapa indata för simulering av tillräcklig kvalitet, enligt metodik presenterad i denna rapport. Om riskkällor (lösa block eller liknande) är okända kan samtliga slänter brantare än 40 grader väljas ut som källa för utfall och därefter kör man en enkel simulering för hela slänten, med rimligt konservativa parameterintervall. Resultatet kan vara underlag till
  - förfinad simulering av utvalda delar i slänten
  - besiktning av stabilitet för delar av slänten som ser ut att kunna vara ett hot mot anläggningen vid instabilitet
  - Förfinad simulering kan sen vara underlag till bedömning av behov av skyddsåtgärder
- Känd problemsträcka längs anläggning där naturlig slänt från "omgivande fastighet" utgör riskkälla. Simuleringar utförs för att utreda utformning av barriär, såsom ett skyddsnett, med avseende på läge, geometri och vilka energier det behöver ta upp. Simulering kan ske från en mindre eller större del av slänten.
- Det har brunnit i ett skogsområde, alternativt skogen som skyddade från ras har stormfällts/avverkats och transporterats bort. En besiktning tyder på att slänterna på omgivande fastighet är instabila och kan utgöra risk för Trafikverkets anläggning. Om vi bortser från juridiska ansvarsfrågor så behöver anläggningen skyddas och simulering ger svar på om så är fallet och i vilken utsträckning.

## 10 Diskussion och exempel

För att analysera och utveckla tekniken för förhållanden som kan vara aktuella för Trafikverket har projektet utgått från tre slänter där blockutfall tidigare skett; väg 34, strax söder om Kisa; järnväg vid Norrahammar, söder om Jönköping; järnväg vid Lackarebäck, i utkanten av Göteborg. Vi har genomfört en stor mängd simuleringar under arbetets gång för att utvärdera Rf3D:s alla parametrar och möjlighet till inställningar, samt val av upplösning i syfte att kunna optimera valda värden för parametrar för realistiska utfallsresultat. För delar av processen vid simuleringarna är dock algoritmerna som används delvis dolda och vi har i projektet inte analyserat i detalj vilken inverkan på resultatet de grundläggande förutsättningarna i dessa algoritmer har. De algoritmer som ligger till grund för simuleringarna är:

- Standardekvation för paraboliskt utfall, med en given initial hastighet för blocket. Hastigheten kan delvis styras av användaren, men är förvalt till 0,5 m/s i horisontalled, respektive vertikalled, i pixellutningens riktning.
- Blockets kontakt mot marken. Denna komplexa process innefattar deformationen i markkontakten (främst av marken) och blockets rekyl från marken, och beräknas i en algoritm med hjälp av 10 olika ekvationer. Den största förenklingen i simuleringarna sker här - alla block hanteras som sfäriska i luftfärden, rotationen är tvådimensionell mellan två markkontakter, och själva blocken förblir intakta under hela utfallsförloppet. Tröghetsmoment för blocken beräknas baserat på de dimensioner man anger för blocket, vilket har stor betydelse för markkontakten och den rekyl som blir. Efter första markkontakten beräknas blockets nya hastighet i horisontal och vertikalled ut, samt dess rotationshastighet. Detta innebär ändå tydliga förenklingar av verkligt förlopp, men mer detaljerade alternativ blir snabbt väldigt komplexa och tänkbara algoritmer skulle både vara förenade med stora osäkerheter och vara beräkningstunga.
- Energiförlusten vid kollision med träd beräknas också i en algoritm med ett flertal ekvationer, för att ta hänsyn till hur högt på stammen kollisionen sker och hur centrerad den är mot stammen.

I följande avsnitt redovisas några exempel på visualisering av resultat från simuleringar, samt ett resonemang kring påverkande processer i simuleringarna – hur verklighetstrogna är de styrande parametrarna och hur realistiska blir simuleringarna med hänsyn till detta?

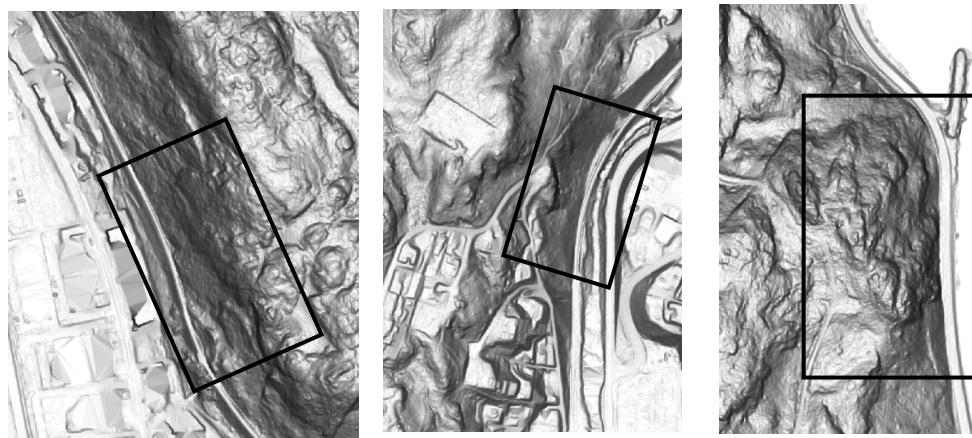
Projektets tre testområden har fungerat bra för ändamålen i projektet, då terrängen och andra förhållanden är varierande och därför har gett olika infallsvinklar i analysen. För att göra faktiska riskbedömningar behöver arbetsgrupper skapas för specifika fall i de tre områdena där man tillsammans bestämmer hur simuleringar ska ske och vilka specifika delar i slänten som dessa ska fokuseras på. Vi rekommenderar den typ av övning för att enklast kunna gå från metodbeskrivning till implementering.

## Projektets testområden

De tre testområden projektet valt ut har något olika förutsättningar avseende både vegetation och markförhållanden. Det innebär att vi haft möjlighet att se hur detta påverkade markmodellernas kvalitet och dra vissa slutsatser kring detta. Ortofoton från de tre områdena kan ses i Figur 15. I Figur 16 Redovisas sluttningarna som ingått i fallstudierna inlagda i Lantmäteriets höjddata (skuggad modell).



Figur 15 Ortofoton över de tre testområden som ingått i projektet, från vänster till höger i bild; Lackarebäck, Norrahammar och Kisa. Skalan i nedre vänstra hörnet är ungefärlig och gäller för alla tre områdena.



Figur 16 Terränglutning illustrerad baserat på Lantmäteriets höjddata i gråtoner – mörka toner innebär brantare lutning. Ungefärligen samma områden som ortofotona i Figur 12. Svarta rutor markerar de ungefärliga områden som projektet låtit utföra LIDAR från drönare över.

I Lackarebäck skedde drönarflygningen när en hel del av lövskogsbeståndet spruckit ut. Trädbeståndet är blandat, främst mellan tall och olika typer av lövträd, dominerat av ek. Utöver det finns ganska rikligt med täta bestånd av enbuskar. I slänten finns områden med talus, stor andel berg i dagen och områden med morän i nedre delen av slänten, där också en del gräs och annan undervegetation förekommer. Enbart några få överhäng finns i bergslänten.

I Norrahammar är det framför allt två bergslänter som inkluderats, nedanför dessa dominerar en gles skog av lövträd, varav en del är döda. Flygningen skedde innan lövsprickningen. Delar av slänten nedanför bergslänten består av talus. Det är begränsat med berg i dagen utöver de branta bergslänterna, där det också finns överhäng.

I Kisa består skogen av blandskog som domineras av gran. Skogen täcker större delen av slänten. Ingen tydlig talusbildning finns, men en del block ligger mer eller mindre löst i slutningen. Inga markanta överhäng har lokaliserats.

## 10.1 Lackarebäck

Området vid Lackarebäck har en varierande vegetation. Karaktäristiskt för slänten, och delvis problematiskt, är förekomsten av täta enbuskage, vilket framgår av Figur 17.



Figur 17 Punktmoln från LiDAR över del av området som studerats i Lackarebäck. Punkterna visas med den färgkodning som den samtidiga fotograferingen gett dem. Enbuskar framstår i grönt.

Det problem som uppstår är att aktuell LiDAR i stor utsträckning inte penetrerar de täta buskagen och därför erhålls inga eller bara enstaka träffar på marken. Buskarna är i sig ofta ganska låga varför många laserpulser reflekteras ovan, men ganska nära marken och de algoritmer vi testat för att klassa punkter i en markklass respektive flera vegetationklasser har svårt att göra den separationen. Ingen algoritm vi sett har nyttjat färgkodningen i RGB-data, men det skulle kunna vara en utväg för att förbättra klassningen. Som det nu är kvarstår många av enbuskarna som markklassade efter klassningen, vilket medför att det i DTM:er som skapas inte kan särskiljas mellan vad som är ett block och en tät enbuske. I nuläget krävs ett manuellt arbete för att rensa bort LiDAR-punkter som uppenbart är reflexer på enbuskar, innan man går vidare och gör en DTM och en DEM till simulering i Rf3D. Så länge området som analyseras är begränsat låter sig detta ändå göras med en begränsad arbetsinsats. Resultat från simuleringar där hela slänten ingått i en snabb, förenklad simulering, där ingen rensning skett från enbuskarna, är bedömningen att de har begränsad effekt på resultaten. Att de flesta buskar är lokaliserade högt i slänten kan vara en del av förklaringen till det.

## 10.2 Norrahammar

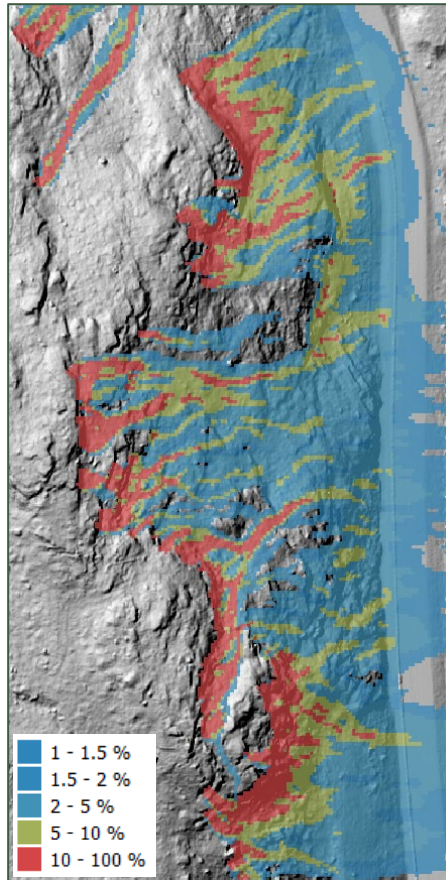
I Norrahammar har den studerade slänten utgjort återkommande problem med blockutfall. Den del av slänten som gett blockutfall tidigare ligger nära anläggningen, men en större del har ändå ingått i studieområdet. Norrahammar utgjorde studieområde för den masterstudie som var pilotstudie inför detta projekt.

Vi väljer att inte redovisa något exempel på simulering här då upplägg och parametrar i en sådan bör ske i samråd med Trafikverket och de åtgärder som redan skett i slänten.

## 10.3 Kisa

I Figur 18 visualiseras en snabb simulering för större delen av det område som skannades med LiDAR från drönare i projektet. Utfallen är av naturliga skäl rent hypotetiska eftersom den lokala stabiliteten inte undersökts. Bilden visar därför enbart förmodade resultat om ett blockutfall sker lokalt i slänten och ger en ackumulerad bild av väldigt många lokala sådana hypotetiska utfall utmed slänten.

Som källa för utfallen har alla pixlar med en beräknad lutning överstigande ca 55 grader använts. Färgskalan illustrerar en av de resultatfiler (ASCII) som simuleringarna ger; "Reach probability", det vill säga sannolikheten för att något av alla utfalls-simuleringarna når en specifik pixelruta i området. 1000 simuleringar per utfallscell ligger till grund för resultatet som genomfördes med träd, och utfallshastighet av 0,5 m/s i horisontalld.



Figur 18 Illustration av resultat från snabbsimulering av en stor del av slänten i Kisa, där källor för blockutfall utgjorts av alla celler i rastret som lutar mer än ca 55 grader. Färgskalan illustrerar sannolikhet att block som faller ut når en viss pixel i modellen.



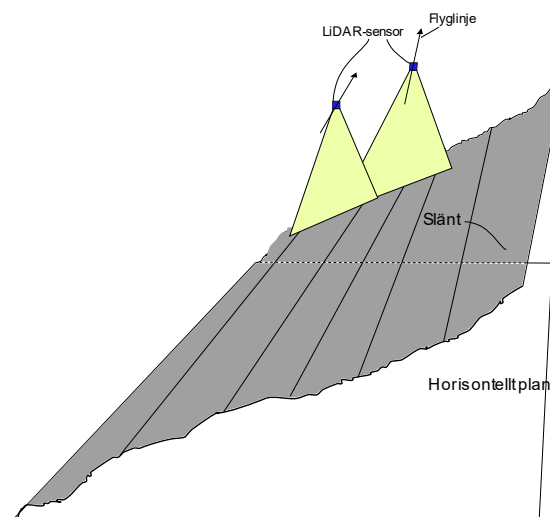
## 10.4 Höjdmodellernas kvalitet

### 10.4.1 Erfarenheter från utförd LiDAR via drönare

LiDAR-flygningarna i projektet testades vid två generella flyghöjder: 60 respektive 100 meter över marken. Trädens höjd styrde valet av 60 meter. En tidig slutsats var att lägre flyghöjd ger bättre data. Vi rekommenderar därför 60 meters höjd där så är möjligt. Vi ser ingen nackdel att flyga lägre om det är möjligt, utöver att det påverkar antal flyglinjer (trajectories) som krävs för att erhålla samma överlapp i sidled som vid högre flyghöjd. Punkttätheten på marken blir högre vilket inte är någon nackdel utöver att datorkraften belastas mer.

När det gäller överlapp eftersträvades ett 50% överlapp i marktäckning i förhållande till närliggande flyglinje. Flygstråriktningar varierades för att kunna analysera vad som är lämpligast. Figur 19 illustrerar ett generellt upplägg där flygning rekommenderas parallellt med sluttningen. Mer detaljerade rekommendationer om upplägg ges i Bilaga 2.

Vid överlappsberäkningar inför flygningar utgår man i normala fall från en horisontell markyta, vilket är naturligt om man flyger över stora områden på hög höjd. För de aktuella detaljerade simuleringarna riktar vi in oss på små områden och låg flyghöjd, samt dessutom på branta sluttningar. Valet att rekommendera flygning parallellt med de slänter som ska analyseras baseras på att man då får ungefär samma geometriska förhållanden längs en flyglinje, men framför allt att man kan få fler träffar från laserpulserna i branta partier. Däremot så skiljer den yta som täcks ovanför flyglinjen i förhållande till den nedanför då pulserna har kortare till marken ovanför drönaren än nedanför, vilket illustreras i Figur 19.



Figur 19 Illustration av flygstråkslinjer för LiDAR-sensorn och dess marktäckning vid skanning i slänt.

Utöver flyglinjernas lägen i sidled, så behöver höjden på drönaren (eg. sensorn) längs flyglinjen planeras så att den tar hänsyn till hur stor vinkel vid sidan av sensorn den skannar i förhållande till släntens lutning. Det överlapp i skanningen som rekommenderas är 50% uppåt i slänten, dvs skanningen från den nedre (vänstra) flyglinjen i figuren ska teoretiskt täcka upp till ett läge rakt under den övre flyglinjen längs hela flyglinjen. Upplägget innebär att man får ett överlapp som är mer än 50% nedåt i slänten och i realiteten blir därför överlappningen delvis tredubbel för många områden som inte är så branta, förutom i de yttre flygområdena där överlappningen ser annorlunda ut.

## 11 Avslutande kommentarer

I den här rapporten beskrivs i detalj hur man kan:

1. översiktligt sälla bort riksslänter och bedöma vilka man kan behöva utreda ytterligare.
2. göra en detaljerad utredning kring slänTERS, eller enskilda blocks potential att utgöra risk.
3. analysera effekten av fysiska barriärer, med avseende på erhållen riskreducering

Det är viktigt att påpeka att det mellan steg 1 och 2 bör finnas ett (stort) utrymme för att göra de inledande utredningarna för riskbedömning baserat på enbart fältinsatser, utan efterföljande numeriska simuleringar, om det kan påvisas att existerande risker kan bedömas på ett tillförlitligt sätt på dessa grunder och att de är tolerabla. I en sådan situation behövs därför inga simuleringar av blockutfall enligt punkt 2. Rena fältbedömningar är idag den allmänt rådande metoden för att ta fram underlag för bedömning av risk och behov av åtgärder. Sådan riskbedömning är behäftad med hög grad av subjektivitet.

Kostnaden för att genomföra steg 1 är låg. SGI har inom ramen för projektet både tagit fram en allmänt tillgänglig och rikstäckande karttjänst som visar var branta slänTER existerar i landet och ett GIS-verktyg som visar de teoretiskt möjliga utfallsområdena nedanför dessa slänTER (brantare än 40 grader). Dessa områden ska inte anses vara riskområden, utan enbart teoretiskt potentiella områden utsatta för risk. En absolut majoritet av dessa teoretiska utfallsområden runt om i landet har en väldigt låg risk avseende blockutfall. Det beror på att svensk berggrund generellt är stabil och när det finns instabila block är det ändå sällan de faller ned på känsliga ställen eller skapar olyckstillbud. De flesta blockutfall sker också på naturmark där människor mer sällan vistas. Lokalt kan det dock alltid finnas block som kan utgöra risk och där ett blockutfall kan ske plötsligt och oförutsett, om slänTstabilitet och risker inte utretts.

Den översiktliga riskbedömningen är ett billigt och snabbt sätt att sälla bort slänTER som inte utgör någon risk.

Kostnaden för steg 2 är initialt ganska hög, beroende på att kunskapen om förfarandet i nuläget inte är inarbetad i ansvarande organisationer eller i utförande teknikkonsulters och entreprenörers organisationer. Vid en ökad kunskapsuppbyggnad, och om det skapas en konkurrensutsatt marknad för utförande av simuleringar av detta slag, kommer med hög sannolikhet kostnaderna bli lägre.

Värdet av att utföra en detaljerad riskbedömning med hjälp av simuleringar för en anläggningsägare eller ”riskägaren” är dels att de ger en objektiv bild av tänkbara blockutfall, förutsatt att underlag och parametrar är kalibrerade. De kan också skapa ett systematiskt sätt att arbeta med riskbedömningar och ge goda underlag att bedöma i vilken omfattning skydd behöver installeras, samt underlag att bedöma sådana skydds geometriska dimension och läge.

## Referenser

Agudelo Motta, C., 2020. Methods for rockfall risk assessment and estimation of runout zones: A case study in Gothenburg, SW Sweden. Master thesis, dept. of Geology, Lund university.

Dorren, L. K., Berger, F., le Hir, C., Mermin, E., & Tardif, P., 2005. Mechanisms, effects, and management implications of rockfall in forests. *Forest Ecology and Management*, 215(1-3), p. 183-195.

Dorren L. K., 2023. Rockyfor3D (v6.0) revealed – Transparent description of the complete 3D rockfall model. ecorisQ document.

Wyllie D. C., 2014. Rock fall engineering: Development and calibration of an improved model for analysis of rock fall hazards on highways and railways. PhD thesis at the university of British Columbia.

Jaboyedoff, M. & Labiouse, V., 2011. Preliminary estimation of rockfall runout zones. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11, 819.

Räddningsverket, 2003. Handbok för riskanalys. ISBN 91-7253-178-9.

SGI, 2018. Säkra bergslänter. Kunskapsläget och fallstudier. Publikation 44.

Štroner, M., Urban, R., Lidmila, M., Kolář, V. & Křemen, T., 2021: Vegetation filtering of steep rugged terrain: The performance of standard algorithms and a newly proposed workflow on an example of a railway ledge. *Remote sensing* 13(15):3050.

Thorbjörnson Lind, T, 2016. Rockfalls from rock cuts beside Swedish railroads. Master study, KTH. ISSN 1652-599X; 16/04.

Toppe, R., 1987. Terrain models – a tool for natural hazard mapping, *IAHS* 162, p. 629–638.

## Bilagor

## Bilaga 1 – Beskrivning av verktyg för potentiellt utfallsområde

För att utföra analysen av var ett blockutfall teoretiskt kan hamna har SGI utvecklat en algoritm baserat på artikeln *Real-time Soft Shadowing of Dynamic Height Map Using a Shadow Height Map* (Lee & Kim, 2008) i programmeringsspråket Python. Algoritmen är rasterbaserad och indata utgörs av ett höjdraster (DTM) samt ett lutningsraster, det senare ett derivat av det förra. Enkelt beskrivet utgår algoritmen från källpixlar (definierat som pixlar där lutningen överstiger 40 grader) och beräknar värden successivt bort från källpixeln i 16 olika vinklar, 360° runt, med källpixelns höjd som startvärde. I algoritmen specificeras en vinkel ned från horisontalplanet som enligt de studier vi utgått från, motsvarar hur långt ett block teoretiskt kan färdas nedför en slänt. Se Figur 4 i rapporten för en illustration - det kan beskrivas som en plan yta riktad nedåt längs slänten och den skärningslinje med marken som skapas nedanför slänten motsvarar då så långt det potentiella utfallsområdet sträcker sig. I beräkningen för detta i rasteralgoritmen minskas höjdvärdet successivt för varje steg i lutningsrastret från källpixeln. Vi har satt utfallsvinkeln till 27 grader (läs mer i rapporten), vilket innebär att höjdvärdet sjunker med drygt 0,5 m för varje meter i horisontalled. När höjdvärdet i lutningsrastret inte längre är större än markmodellen (DTM:ens) höjdvärde, klassas pixlarna i lutningsrastret inte längre som potentiellt utfallsområde.

Utfallsområdets storlek beror av släntens lutning och vinkeln ner från den pixel i rastret som är ”källan”, motsvarande tänkt utfallsposition. Enligt empiriska studier (se Jaboyedoff & Labiouse, 2011, för en sammanställning) är vinkeln mellan ett horisontalplan genom tänkt utfallspunkt till en linje mellan utfallspunkt och så långt ett block potentiellt kan nå nedför en slänt, någonstans mellan 26-33 grader. I den algoritmen vi skapat har värdet 27 grader använts då detta bedömts vara på säkra sidan (konservativt värde). Grundläggande parameter för översiktlig beräkning av utfallsområde är val av källpixlar, det vill säga blocks startpositioner (”riskkällor”), varifrån block kan komma i rörelse. Alla pixlar där lutningen är 40 grader eller högre är källpixlar i algoritmen.

Den indata analysen kräver är en höjdmodell i rasterformat och ett raster med källpixlar som tas fram med utgångspunkt från höjdmodellen. I den inledande delen av algoritmen skapas två tomma raster med samma storlek och format som höjdrastret; ett raster för området som ligger under den vinkel som väljs (S) och ett ”arbetsraster” där ackumulerad höjd sparas (Stot). S står för ”Skugghöjd”, vilket symboliserar höjd över markhöjden i respektive pixel. I båda dessa raster sätts alla pixelvärden till 0 initialt och fylls därefter på efterhand algoritmen körs på med värden. Utöver det definieras ett antal konstanter; Grid size (gs), rastrens pixelstorlek, dz, hur mycket skugghöjden sjunker på en meter i horisontal-led, och s, som är föregående skugghöjd (ej att förväxla med stort S, Skugghöjdsrastret) vilket används då skugghöjden ska räknas ut.

I nästa steg räknas algoritmen ut i en ”nästlad for-loop”. En for-loop upprepar ett kodblock ett specificerat antal gånger genom att iterera dvs. går igenom varje element en åt gången. En nästlad for-loop innebär att en for-loop innehåller en eller flera for-loopar.

T.ex. kan en for-loop iterera genom en lista och skriva ut alla sex värden på en tärning ([1,2,3,4,5,6]), så i första iterationen skriver den ut "1", i den andra iterationen "2", o.s.v. Om det då läggs till en for-loop i den for-loopen, för en andra tärning, så skulle det kunna innebära en nästlad for-loop som skriver ut alla 36 möjliga kombinationer av två tärningskast. Så i en nästlad for-loop kommer den för varje iteration i den yttre for-loopen att gå igenom alla element i den inre for-loopen.

I utfallsalgoritmens första (eller yttersta) for-loop finns ett användardefinierat antal belysningsvinklar (tänk väderstreck), där default är 16 vinklar. Alla vinklar tilldelas också en "oktant" (en åttondel av 360 grader). Första oktanten är 0 till 45 grader, andra är 45 till 90 grader o.s.v. De 16 vinklarna uppdelat i oktanter innebär två vinklar i varje oktant. För varje vinkel räknas det också ut en offset (återkommer till hur det används längre ned). Även värdet "hyp" (hypotenusan) räknas ut. Både offset och hyp kommer att variera beroende på vilken vinkel som räknas ut.

När alla raster och konstanter definierats kan beräkningarna av potentiellt utfallsområde påbörjas och det som ska bli det resulterande skuggrastret. Det görs i två nästlade for-loopar som körs inuti den for-loop (dvs är nästlad) som beskrevs i stycket ovan. Den första av de två looparna säger att något ska göras för varje rad i rastret, den andra for-loopen, nästlad i den första, säger att något ska göras för varje kolumn. De nästlade for-loopar gör att beräkningarna kan arbeta sig igenom varje pixel i rastret, en åt gången. Algoritmen kan då stega sig igenom rastret på fyra olika sätt – uppifrån och från höger, uppifrån och från vänster, nedifrån och från höger, och nedifrån och från vänster. Utöver det finns ett offset-värde som tillsammans med det sätt rastret stegas igenom gör att skughöjden kan räknas ut från olika vinklar (ej att förväxla med vinkel på släntlutning, tänk istället väderstreck). På detta sätt räknas algoritmen ut pixel för pixel och värdet för S beror på S i "föregående" (bakomliggande) pixel eller pixlar. I ortogonala riktningar beror värdet bara på S i en bakomliggande pixel i ortogonal riktning. I diagonala riktningar beror värdet bara på S i en bakomliggande pixel i diagonal riktning. I alla övriga riktningar beror värdet dels på bakomliggande pixel i ortogonala riktning och delvis på bakomliggande pixel i diagonala riktning. Processen körs för en vinkel åt gången, dvs. varje pixel går igenom med inställningarna för att räknas ut för en belysningsvinkel, eftersom det definieras i den första, eller yttersta, for-loopen.

Det som räknas ut i varje pixel är dess värde ( $S = \text{"skughöjd"}$ ) baserat på värdet i föregående S, med 27 grader vinkel nedanför. Om den nya S blir lägre än H (makens rasterhöjdvärde) sätts  $S=H$ . Vid värden för  $S>H$  markeras pixeln som "skuggad", dvs som potentiellt utfallsområde. Hela rastret går igenom i algoritmen, men det är enbart pixlar med lutning  $> 40$  grader som utgör källpixlar för skuggningen. När  $S \leq H$  markeras pixlar i den aktuella riktningen/vinkeln inte som "skuggad".

Det sista steget i den innersta for-loopen är att rastret Stot fylls på med värdena från S-rastret om S är större än Stot, annars behålls Stot-värdet. Därefter nollställs S och uträkningen av nästa vinkel påbörjas. Detta innebär att alla 16 vinklar räknas ut som separata raster och det högsta värdet från de resulterande rastren slås samman till ett enda raster. Slutligen så omklassas pixeln till 1 om  $S>H$ , annars får pixeln värdet 0.

## Installera och använda verktyget i GIS

Det Python-skript som tagits fram för att beräkna potentiellt utfallsområde har anpassats för att köras i QGIS. Det läggs till i QGIS genom att gå till "verktygslådan", och där klicka på symbolen för Python-skript och välja "Lägg till skript i verktygslåda". Därefter ska skriptet "Potentiellt\_utfallsomrade" finnas bland Python-skripten (heter bara "Skript" i verktygslådan) under gruppen "Potentiellt\_utfallsomrade". Skriptet kräver som tidigare nämnts ett höjdraster och ett lutningsraster som input, det kan läggas till som en fil eller som en WCS-tjänst. Som default finns adresserna till Lantmäteriets WCS-tjänster för höjd och lutning inskrivna, dessa kräver dock användarnamn och lösenord. En kort instruktion finns också i verktygets meny som dyker upp på skärmen när skriptet startas.



## Bilaga 2 - Upplägg LiDAR-projekt - insamling av data och kvalitetskrav

Denna bilaga beskriver processen för att ta fram en höjdmodell baserad på LiDAR, det vill säga det vi förenklat kallar laserscanning. Under projektet har vi utvärderat olika metoder för att skapa en markmodell (DTM) från LiDAR som blir "tillräckligt" bra för att kunna genomföra tillförlitliga simuleringar av blockutfall. Markmodellen utgör det enskilt viktigaste underlaget för sådana simuleringar. Det kan finnas situationer där andra metoder att skapa underlag för DTM kan fungera och det pågår en intensiv teknikutveckling inom området, men vi har kommit fram till att LiDAR från drönare är den metod som när detta skrivs är den mest kostnadseffektiva. Generellt ger den också bäst kvalitet för de behov som metodiken i projektet är i behov av.

### Val av system – specifikation och krav

Den utrustning som använts i detta projekt är en DJI Matrice 300 RTK, med en Zenmuse L1-sensor. LiDAR-tjänsten har upphandlats via konsulttjänst inom ramen för projektet. Bedömningen vid upphandlings-tillfället var att detta system skulle ge lika goda resultat som betydligt dyrare lösningar kan ge. Vi går inte här in på alla detaljer i det tekniska systemet i själva drönaren, eller L1-sensorn. Det sker en kontinuerlig teknikutveckling och det avgörande är att man kan skapa höjdmodeller som är tillräckligt bra enligt den beskrivning som följer. För mer information, se test genomförd kring utrustningens exakthet och noggrannheten (engelskans "accuracy", se studie DJI Zenmuse L1 Lidar system)

Det finns inte en direkt svensk översättning på engelskans accuracy, som i detta fall avser hur bra lägespositioneringen är i förhållande till verkligt läge. Svenskans ackuratess används inte för data av denna typ vad vi vet. I dess ställe används i Sverige begreppen exakthet/precision och noggrannhet för kravställning och kvalitetsbeskrivning av LiDAR-data och även för de modeller av marken som skapas från denna data. Kvalitetsklasser och krav lutar sig vanligen mot standards inom området. För LiDAR-data är bland de mest refererade "Positional Accuracy Standards for digital geospatial data", skapat av ASPRS (American society for photogrammetry and remote sensing) som är en internationell vetenskaplig organisation för detta kunskapsområde. Där finns bland annat definitioner på accuracy och beskrivning av olika typer av fel som finns i den slutliga datamängden från LiDAR. De fel som är viktigast att minimera för de syften DTM:er har i simuleringar som detta projekt berör, är de som berör punkters höjdläge (Z) samt intern skevhet i datamängden. Vi har i projektet valt att ta stöd i vårt arbete och denna bilaga från den senaste utgåvan av deras standard, som beskrivs som "industry consensus". Nedan använder vi noggrannhet då accuracy avses. Figurerna nedan är också lånade därifrån om inte annat anges.

### Grundläggande om DTM-kvalitet

Det är viktigt att förstå vad som ligger till grund för de olika "fel" som finns i enskilda LiDAR-punkter i det "moln" av rådata som levereras från mätningarna. Dels finns det fel som beror på systemets olika komponenter, alltifrån LiDAR-sensors faktiska position

och dess rörelse i förhållande till marken, till hur väl den emitterade energin kan preciseras och hur väl den reflekterade energin kan preciseras, samt hur energin störs, sprids och reduceras på väg till och från objekt på marken. Dessa fel kan bara identifieras vid upprepade (identiska) flygningar på samma plats, vid något olika förhållanden. Generellt är dessa fel små, men svåra att kvantifiera med exakthet. Det finns också en felkälla i tolkningen av det resulterande punktmolnet i förhållande till aktuella markförhållanden. Om vi bortser från vegetationens reflektion, vilken kanske är svårast att precisera i detalj, och fokuserar på marken som ska ligga till grund för terrängmodellen, så kan man säga att det i huvudsak är tre komponenter som påverkar modellens kvalitet:

- Vegetation som påverkar LiDAR-pulsens förmåga att nå marken
- Densiteten (antal pulser/m<sup>2</sup>) av punkter som når marken
- Hur väl de algoritmer som används klarar av att skilja på mark och vegetation

### **Kvalitet i LiDAR**

När målet är att skapa en så bra markmodell som möjligt, dvs en modell som till läge och form är så lik verkligheten som möjligt, är oberoende verifikation nödvändig. Detta sker genom kontrollpunkter på marken (GCP, Ground Control Points), vilka mäts in på konventionellt sätt. Man justerar med hjälp av dessa punktmolnets läge så att det ligger så rätt det går i förhållande till dessa. För simuleringarnas skull är det faktiska läget inte avgörande för resultaten utan enbart upplösning och inbördes geometriförhållanden i modellen. Vi rekommenderar någorlunda symmetriskt placerade kontrollpunkter inom flygområdet för att säkerställa att ingen skevhet föreligger i förhållande till verklighetens markgeometri. Ett minimum av 4 kontrollpunkter bör finnas även i små områden (<100x100 meter). För områden upp till ca 200x400 meter bör man gå upp till 6 eller 8 GCP. Större områden än så genererar väldigt stora datamängder och det rekommenderas då att dela upp området i två eller flera mindre delområden. I rektangulära utredningsområden (dvs områden för LiDAR-flygning) i planvy, vilket är att föredra, bör sidornas ortogonalitet i normala fall ligga parallellt, respektive vinkelrätt mot utredningssläntens huvudsakliga lutningsriktning. Drönarens flygstråk kan då läggas parallellt med slänten, vilket rekommenderas då planering av flygningen till stor del kan utföras på kontoret med stöd av befintlig höjdmödel, exempelvis baserad på Lantmäteriets LiDAR-data. Det är viktigt att en GCP hamnar nära hörnen på utredningsområdet och flygstråken kan med fördel planeras så att de passerar vertikalt över kontrollpunkterna där så är möjligt, då noggrannheten generellt är bäst i detta flygläge för sensorn.

Placera GCP i första hand på hårda, horisontella markytor, när det är möjligt. Plana, horisontella berghällar eller liknande är optimalt. Ett sprayat kors i färg som skapar bra kontrast mot omgivningen är bra. Om detta är svårt att få till kan man nyttja syntetiska, medhavda kontrollpunkter som finns på marknaden. Dessa kan installeras eller läggas på plan mark, där det är viktigt att läget i förhållande till faktisk mark är tydligt bestämd och enhetlig vid inmätning. Inmätning sker med totalstation eller motsvarande med så bra och verifierad noggrannhet som möjligt med RTK/PPK-stödda GNSS. Läget kan bindas till rikets nät med positionsstöd mot fasta, inmätta punkter i rikets nät eller motsvarande i närområdet.

Flygstråken planeras in så de blir parallella med den generella släntens riktning, det vill säga vinkelrätt släntlutningen, vilket gör att man kan dra nytta av LiDAR-sensors ”öppningsvinkel” i sidled, uppför slänten så att man ”ser in under” de brantaste partierna. För att uppnå en sådan effekt så krävs dock en noggrann geometrisk planering med parametrarna; flyghöjd, sidovinkel för LiDAR-sensorn och släntlutning. Utgå från de slänter som bedöms viktigast att ingå i riskbedömningen.

Flyghöjden kan variera mellan 50-100 meter. Vi valde ca 60 meter på grund av trädens höjd i de tre områdena. Nära marken ger mindre markträff för LiDAR-pulserna, större genomtränglighet för pulserna genom vegetation, högre punktdensitet, men mindre överlapp i sidled mellan stråk.

## Bilaga 3 - Rekommendationer för bearbetning av LiDAR-data

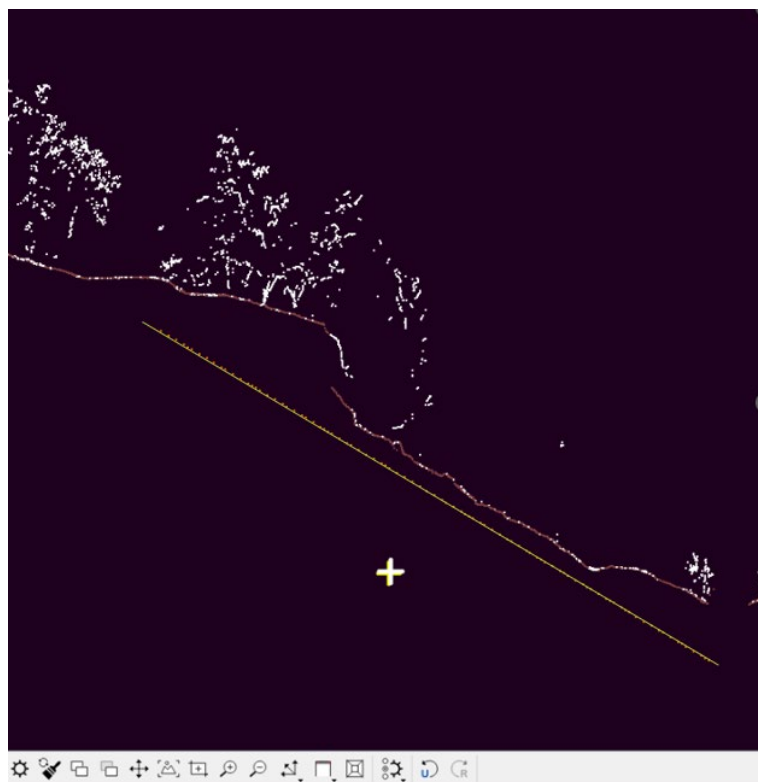
### Klassificering av markpunkter i LiDAR-data

I projektet har vi i första hand arbetat med programvara från Terrasolid (Terra Scan, Terra Match och Terra Modeller) vid bearbetning av LiDAR-data för att ta fram underlag till modeller av terrängen.

För att ta fram en höjdmmodell från ett punktmoln baserat på LiDAR behöver laserträffar på mark skiljas från icke-markträffar. En klassificering blir aldrig perfekt, och mindre perfekt när man befinner sig i terräng jämfört med bebyggda områden. En fråga som behöver besvaras är också hur man ska definiera vad som ska anses utgöra "mark" i terrängen, där mycket av jord och berg är bevuxet med olika typ av låg vegetation (från lav till buskar) och där det även finns stubbar, fallna träd, block mm. som mer eller mindre är en del av underlaget. Projektet har inte något definitivt, allmängiltigt svar här, men konstaterar att det är en utmaning att finna en metod som entydigt kan differentiera mellan låg vegetation såsom ljung och lågt eller vissnat gräs, respektive "mark". Vid simulering av blockutfall är modellens terräng och dess egenskaper, såsom restitutionskoefficient, av stor betydelse och medan låg vegetation av olika slag generellt har liten inverkan på blocks rörelse, så har "riktig" mark stor effekt både på blockets riktningförändring och ökning eller minskning av dess rörelseenergi.

Det finns ett flertal olika metoder för att klassificera mark i ett LiDAR-punktmoln, vilka kan prestera olika bra beroende på hur terrängen ser ut och om vegetation eller andra objekt som exempelvis byggnader fångats in i laserskanningen eller ej. Täta buskar, branta sluttningar och storblockig terräng, utgör exempel på förhållanden där markreturer kan saknas vilket också försvårar klassificeringen av mark.

Inom uppdraget har vi testat och använt oss av ett antal olika algoritmer. Valen av dessa har dels berott på de tester vi gjort och rekommendationer vi funnit i aktuell forskningslitteratur, men dels också på algoritmernas tillgänglighet, det vill säga om de är "open-source" eller finns inbakade i program som vi redan tillämpat för andra steg i bearbetningen av LiDAR-data. Längre ner i denna bilaga följer de algoritmer som vi främst använt.



Figur 20 Initial klassning av alla punkter (brunt=markpunkter, vitt=övriga punkter). I det uppenbara överhänget i centrala delen av figuren klassas punkterna fel, vilket kräver en modifiering av klassningen som beskrivs i texten.

Inledningsvis kan man göra en klassning med de förinställda värden man har i sitt program. Vid visualisering kan man då illustrera i tvärprofiler som exemplet i Figur 20, där markklassade punkter i brunt visas tillsammans med alla övriga klasser i vitt. Detta är ett bra sätt (tillsammans med vanlig planvy) för att få en uppfattning om var det eventuellt saknas markträffar eller där algoritmen misslyckas med att klassificera mark. I figuren ser man ett tydligt överhäng där alla punkter i övre delen klassats som icke mark. Brant terräng är generellt sett svårare än plan terräng att beskriva, men överhäng av detta slag innebär ett särskilt svårt problem att komma runt eftersom de flesta algoritmer angriper punktmolnet nedifrån och då betraktar punkter högre upp som icke mark.

För aktuell applikation av höjdmödel är det förstås väsentligt att den övre delen av bergslänter finns med i höjdmödeln snarare än den nedersta delen, eftersom blockutfall är mer troliga och utgör större risk från högre liggande delar. Vi utvecklade då en metod som går ut på att först rotera punktmolnet för hela undersökningsområdet till en position där hela släntens generella lutning blir horisontell (dvs ungefär som den gula linjen i Figur 20). Först då genomför man klassningen på hela punktmolnet igen, vilket medför att punkter i översta delen i branta slänter, liksom överhäng, i större utsträckning kommer att klassas som mark. Markklassning av viktiga delar i terrängen är en förutsättning för att den slutliga terrängmodellen (DTM) ska innehålla den höjdinformation som kan skapa trovärdiga simuleringar. Efter klassning på roterat punktmoln roteras punktmolnet tillbaka till ursprungligt läge, en process som innebär att man behöver vara extra noggrann.

”Progressive TIN Densification” (PTD, Axelsson, 2000) är en algoritm som bygger på en Triangulated Irregular Network (TIN) -modell som stegvis förtätas. Inom en fördefinierad storlek på rutnät (gridstorlek) väljs de lägsta punkterna till ”kärn-punkter” (seeds) i algoritmen och med utgångspunkt från dessa förtätas TIN-modellen successivt genom att andra punkter läggs om de faller inom ramen för kriterier man väljer, som är baserade på vinklar och avstånd till närmaste triangel. PTD är grunden för många vidareutvecklingar av algoritmer som skett och utgör fortsatt kanske den vanligaste algoritmen för att klassa och filtrera punktmoln från LiDAR. Algoritmen har bara en begränsad tillgänglighet som open-source.

Progressive morphological filter (PMF) (Zhang et al., 2003) bygger på två morfologiska operationer: erosion och dilation. Erosionssteget söker efter lokala minimipunkter inom detta fönster, vilket gör att högre objekt tas bort. Därefter följer dilation, där den tidigare reducerade ytan återställs. Dilation letar efter de högsta punkterna inom fönstret och ”återför” dessa till ytan, vilket hjälper till att återinföra markpunkter som kan ha tagits bort under erosionssteget. Dessa steg upprepas flera gånger för att gradvis förbättra noggrannheten i markklassificeringen. Filtringen görs inom ett fönster vars storlek definieras av användaren. Det kan också göras med flera olika fönsterstorlekar.

Cloth Simulation Filter (CSF) (Zhang et al., 2016) är en algoritm som kan beskrivas som att en trasa släpps över ett upp-och-ned-vänt punktmoln. Trasan styrs sedan av olika parametrar för hur mycket den ska sjunka ned, samt hur stel och trög den ska vara, och alla punkter som sedan berörs av trasan bildar marken.

Dessa är de metoder vi testat inom uppdraget, men det finns definitivt fler metoder som skulle vara värda att utvärdera. Det finns även ett antal metoder vi utvärderat men ej kommit så långt med att vi kan ge några rekommendationer för dem. Två av dessa är DBScan som är en algoritm som grupperar data baserat på densitet, samt verktyget CANUPO som bygger på en maskininlärningsalgoritm där användaren manuellt skapar träningsdata genom att dela in punkter i olika klasser. Enligt Štroner m.fl. (2021) kan en kombination av CANUPO och CSF-algoritmen ge ett bra resultat i terrängförhållanden med vegetation och hög lutning. CANUPO kan t.ex. användas i programmet CloudCompare,

## Vägledning för bearbetning av data i QGIS

För att förfina klassificering och ta fram underlag inför simulering i Rf3D har vi valt att delvis använda R, som är ett så kallat free and open-source software (FOSS), med R-paketet lidR, och delvis även verktyget FUSION som kan laddas in i QGIS som ett Plugin eller köras i kommandotolken i QGIS. FUSION innehåller många av de steg som också går att göra i R, så som att markklassa punktmoln, ta fram DSM (eller canopymodel som det kallas i FUSION) och räkna fram trädhöjd (en normaliserad höjdmmodell). Trädhöjd används i Rf3D för att räkna fram ”DBH” (diameter at breast height), vilket i sin tur ingår i simuleringialgoritmen för att beräkna blocks påverkan vid kollision med träden i slutningen. FUSION, med tillhörande verktyg, finns att aktivera som insticksprogram

och köra i QGIS, medan R finns som insticksprogram men inte med några färdiga verktyg i QGIS. R i QGIS ger dock möjlighet att lägga till egna skript, vilket vi gjort enligt manualen för lidRbook (<https://r-lidar.github.io/lidRbook/>). Verktygen vi skapat är:

- "Klassificera mark" – Verktyg för att markklassa las-filer. I gruppen finns ett verktyg för att klassa m.h.a. CSF-metoden och ett verktyg för att använda PMF-metoden.
- "Höjdmodeller" – Innehåller dels ett verktyg för att ta fram en DTM och DEM.asc (DTM i det format RockyFor3D kräver), dels för att skapa en DSM. Det finns även ett verktyg för att ta fram en normaliserad trädhöjd, eller "canopy height model" (CHM), vilket görs genom att DTM:en subtraheras från DSM:en. Samma resultat går också att ta fram direkt ur punktmolnet - instruktioner finns i lidRbook.
- "Identifiera\_trad" – Detta steg kör lidR:s verktyg för att identifiera enskilda träd i raster med normaliserad trädhöjd och skriver resultatet som en treefile.txt-fil, det format som krävs i RockyFor3D. Även detta kan tas fram direkt ur punktmolnet.

En alternativ väg att ta fram underlagsdata kan vara att använda verktyg i FUSION för att göra vissa av stegen ovan. De verktyg som kan användas där är:

- GroundFilter – Verktyg för att markklassificera las-filer.
- GridSurfaceCreate – Verktyg för att ta fram en DTM från en las-fil. I verktyget finns ett antal så kallade "switches" för att påverka hur algoritmen hittar höjdvärdena för varje cell i rastret. Som default används medelhöjden av alla punkter inom en cell för att bestämma höjdvärdet men det går även att använda switches som gör att den lägsta punkten bestämmer höjdvärdet, eller som gör att den högsta punkten bestämmer höjdvärdet.
- CanopyModel – Verktyg för att ta fram en DSM och CHM från en las-fil. Den högsta träffen inom en cell i en grid sätter höjdvärdet. För att ta fram en CHM måste även en DTM användas som indata.

## Rekommendationer för att ta fram DTM

Det finns många olika metoder och många olika mjukvaror som erbjuder verktyg för att klassificera markpunkter och ta fram en höjdmodell (DEM, DTM och DSM). Vi beskriver i föregående avsnitt de som vi i huvudsak använt för att ta fram underlag till simuleringar. En viktig del i denna process är att ställa kvalitetskrav och kontrollera kvaliteten på de slutliga underlagen, för att säkerställa att den data som levereras uppfyller nödvändiga krav.

Om den detaljerade riskbedömningen som beskrivs i denna rapport följts och det samlats in ett högupplöst punktmoln, samt tagits fram en mer högupplöst DTM än vad Lantmäteriet erbjuder. Denna data ska då vara justerad ("matchad") för skevheter mellan flygstråk och knuten till GPK, dvs inmätta kontrollpunkter. Kontroll kan sen utföras genom att de markklassade punkterna inspekteras i 3D-mjukvara, gärna i kombination och jämförelse med det oklassade punktmolnet för att visuellt uppskatta hur bra själva klassningen är och om antalet markpunkter är tillräckligt och jämnt fördelade över området. Saknas markpunkter i vissa områden? Hur har det hanterats när DTM skapas? Det är viktigt att besöka platsen i fält med den högupplösta modellen av marken (DTM) då det ger viktig information för utvärdering av markklassningens kvalitet.

Nedan följer ett antal rekommendationer för de olika verktyg/algorithmerna vi använt. Det finns många inställningar att vrida på, fler än de vi kommit fram till, så detta är inte någon komplett guide utan ett antal observationer vi gjort under arbetets gång. Det är också viktigt att tänka på att vilka inställningar som är bäst påverkas av hur LiDAR-punktmolnet ser ut, punkttäthet och täckningsgrad, samt studieområdets terräng. Slutsatserna vi dragit är utifrån de förhållanden vi jobbat med i detta uppdrag.

## **CSF + PMF**

Både CSF och PMF kan resultera i bra klassningar såvida inte terrängen lutar allt för mycket. Vid hög lutning har vi inte lyckats att fånga in dessa branter samt marken ända fram till kanten utan att de parametrar som justeras gör så att även trädstammar och i vissa fall buskar blir klassad som mark.

En metod som dock sett lovande ut är att kombinera CSF- och PMF-algorithmerna genom att först köra en CSF med inställningar för att få med den branta terrängen, och därefter köra en PMF för att ta bort de eventuella träd och andra höga punkter som felaktigt markklassats.

Den inställning för cloth resolution vi använt då är 0,1 dvs. en hög upplösning av vad som kan beskrivas som täthet av punkter i den upp-och-ned-vända "trasan" där den kan sjunka ned. Vi antar att detta gör så att den bättre får med detaljer i terrängen och enklare kan fånga in snabba skiftningar i höjddled. För class threshold har vi använt 0,4 vilket innebär ett vertikalt avstånd från den tänkta markytan som utgörs av trasan inom vilket en punkt kan vara och bli markklassad. För time step, vilket innebär att hur mycket trasan tillåts att sjunka ned, har vi använt värdet 1, ju lägre värde desto mer sjunker trasan ned.

Större värden för class threshold och lägre värde för time step borde alltså innebära att terräng som skiftar snabbt i höjddled kan fångas in bättre av markklassningen. Nackdelen med sådana inställningar är dock att det även riskerar att klassa objekt i terrängen som stenblock, buskar och träd som mark. För att få bort det problemet har vi kört PMF-algoritmen. Inställningar för PMF har inte testats i lika stor utsträckning som PMF men vi har fått ett bra resultat med en sekvens av fönsterstorlekar mellan 0,5 och 5 meter och tröskel värden mellan 0,15 och 0,3 meter, vilket innebär den maximalt tillåtna höjdskillnaden mellan en punkt och dess grannar för att den ska klassificeras som mark.

## **PTD**

Eftersom vi rekommenderar att LiDAR-data samlas in med drönare vilket genererar ett punktmoln med hög densitet, är det möjligt att välja en liten "gridsize" (även kallat maximum building size). En liten gridsize innebär dock att mer beräkningskraft krävs. Det kan även påverka resultatet negativt om det inte finns någon markträff inom rutan (eller "griddrutan"), t.ex. om hela rutan faller inom ett stenblock eller en trädstam, då hamnar marknivån uppe på stenblocket eller uppe i trädet.

I områden med brant terräng har de bästa resultaten uppnåtts med Axelssons algoritmen i TerraScan då punktmolnet vridits upp i släntens riktning. Detta gör de brantaste



partierna mindre branta vilket innebär att algoritmen lättare kan klassa punkterna som mark och ej mark.

Vid överhäng där det är den övre markytan som är intressant är metoden beskriven ovan där punktmolnet roterats, den enda metod som gett tillräckligt bra resultat. Andra algoritmer som använts inom detta uppdrag har endast klassat marken under överhängen som markträffar.

### **Övriga rekommendationer**

Det är viktigt att inspektera kvaliteten på laserdata innan det markklassas. En svag länk i kedjan av processer fram till slutlig DTM påverkar slutprodukten. Det börjar med insamlingen av LiDAR-data - var har laserträffarna hamnat i förhållande till verklig mark? Finns det täckning även i mer branta partier? Saknas punkter vid t.ex. en avsats kommer den inte att avbildas korrekt och de algoritmerna kommer att interpolera en markklassning som visar en brant backe istället för en bergvägg.

Generellt sett är det bäst att bara använda sista träffar för klassificering av markpunkter, framförallt för geometriska metoder som PTD och CSF. Det kan dock finnas undantag för detta, särskilt vid användning av icke-geometriska metoder.

### **Rekommendationer för framställning av DTM från LiDAR-punktmoln**

Vi har testat några olika verktyg och algoritmer för att framställa en DTM från det markklassade punktmolnet. Dessa verktyg och algoritmer är sådana som finns i R:s lidR-paket eller i FUSION, dvs de går att implementera i sin egen miljö utan kostsamma licenser.

De algoritmer som finns i lidRbook för att ta fram en DTM är Triangular irregular network (TIN), Inverse distance weighting (IDW) och Kriging. I de test som gjorts inom detta uppdrag har vi inte kunnat se några stora skillnader mellan resultaten från dessa. Det bör dock nämnas att våra observationer inte behöver vara allmängiltiga, då det kan vara annorlunda i fall där de naturliga förutsättningarna för markklassning ser annorlunda ut än de vi använt. Det finns dock skillnader för hur snabbt det går att köra algoritmerna. Där sticker kriging ut som den klart långsammaste. För alla dessa höjdmodeller har det vid mycket branta partier ibland kunnat observeras lokala svackor, där ett lågt höjdvärde efterföljs av ett högt värde i brantens riktning. Detta beror troligtvis på att vegetation växande längs branten har klassats som mark.

Vad som fungerar bäst i GridSurfaceCreate i FUSION beror på hur det markklassade punktmolnet ser ut. Om det finns många punkter som misstänks vara felklassade, t.ex. träffar i buskar eller snår, kan det vara lämpligt att använda de lägsta punkterna för att bestämma höjdvärdet inom varje rastercell. För de lokaler där vi tagit fram data har vi kunnat se att GridSurfaceCreate i FUSION med default-inställningen, dvs. tar medelvärdet av alla punkter inom rastercellen, ligger något högre än de metoder som finns att tillgå i lidR vilka ligger närmare nivån för GridSurfaceCreate med minimum-inställningar (använder den lägsta laserpunkten). GridSurfaceCreate skapar inte lika mycket lokala svackor vid branta partier som lidR-metoderna, vilket borde vara en fördel för syftet i detta uppdrag.

En höjdmmodell framtagen med FUSION som bygger på medelhöjden av alla punkter jämfört med en höjdmmodell som bygger på den lägsta punkten kommer att så klart ligga högre men branta partier kommer också att hamna längre fram i släntens riktning. Det är en effekt av att medelvärdet respektive lägsta värdet i en fast grid (XY) över en yta med stora förändringar i Z-led kommer att skilja sig åt. Detta blir troligtvis extra tydligt i ett punktmoln med hög träfftäthet, och den effekten skulle förekomma även utan brus och med bara perfekta träffar på en hård yta. Det innebär maximalt en cells förskjutning även om höjdvärdena i branta partier kan skilja sig mycket inom en specifik cell.

På grund av de lokala svackor i branta partier som observerats i DTM:er framställda med lidR-algortimerna, rekommenderar vi att FUSION-verktyget GridSurfaceCreate används och där välja inställningen att de lägsta punkterna används.

### **Problematiken med överhäng vid efterföljande markklassning**

Vid överhäng och om punktmolnet roterats för att förbättra markklassningen kommer det att finnas punkter i två nivåer. Vi är intresserade av markytan uppe på överhänget och därför är det viktigt att höjdmodellen inte baseras på de punkter som finns under överhänget, vilket troligtvis är den höjd de flesta algortimer för att framställa en DTM kommer hitta. För att höjdmodellen ska representera den övre markytan är det lämpligt att städa bort punkter under överhänget vilket kan göras i LiDAR programvara där punktmolnet kan redigeras (exempelvis CloudCompare, TerraScan, ArcGIS eller FME). Ett annat sätt är att köra en algoritm, t.ex. CanopyModel i FUSION, där de högsta punkterna ligger till grund för värdet i höjdmodellen, och därifrån klippa ut ytor där överhäng finns och därefter "stansa" in dem i en höjdmmodell framtagen med konventionell metod.

### **Rekommendationer för mjukvara**

#### **Fusion**

- FUSION-mappen måste ligga i en mapp vars sökväg endast innehåller alfanumeriska tecken (så "Program Files" fungerar inte).
- Om mark klassificeras m.h.a. FUSION måste alla punkter vara oklassade.

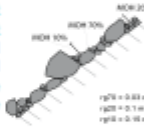
#### **PTD**

TerraScans markfiltreringsalgoritm är inte öppen källkod men är en variant på Axelssons algoritm (<https://terrasolid.com/guides/tscan/crground.html>).

Axelssons algoritm eller liknande TIN-baserade algoritmer finns inte utvecklat som kostnadsfri programvara. LASTools innehåller ett sådant verktyg men är fritt att använda om man kör mindre områden (men går att använda för större områden om man delar upp punktmolnet i delområden och därefter sammanfogar till en stor grid).

## Bilaga 4 – Rekommendation för fältdatainsamling

Med den metodik som förslås i denna rapport så minskar behovet av datainsamling i fält i förhållande till den användarmanual som Rf3D ger. Det är förstås ändå väldigt viktigt att bilda sig en bra uppfattning om terrängförhållandena, såsom typ av jordart, blockighet, markens ojämnhet, typ av vegetation mm., men insatsen kan begränsas till två relativt korta besök i fält; ett i samband med drönarflygningen och ett uppföljande för att bedöma resultatet av insamlad LiDAR-data.

| General  |  |  |   |
|--|--|--|---|
| Date*  |  | Nr. Polygon*   |   |
| Location*  |  | Slope angle*   | ( ° / % )   |
| Name*  |  | Zone*  | <input type="checkbox"/> start / source <input type="checkbox"/> transit <input type="checkbox"/> deposit |
| * each polygon represents a homogeneous unit; size depends on the mapping scale  |  |  |   |
| Polygon characteristics  |  |  |   |
| 1. Dominating rock (deposited in the polygon or potentially falling from release area)   |  |  |   |
| Block shape  | <input type="checkbox"/> 1. rectangle  | <input type="checkbox"/> 2. ellipsoid  | <input type="checkbox"/> 3. Sphere <input type="checkbox"/> 4. Disc                                       |
| Block dimensions (d1, d2, d3): ..... (m) x ..... (m) x ..... (m)   |  |  |   |
| Rock density (kg.m <sup>-3</sup> ):  |  |  |   |
| 2. Soil / underground type in the polygon  |  |  |   |
| Material constituting the underground  | <input type="checkbox"/> river / swamp / other material in which a rock could penetrate completely   | <input type="checkbox"/> fine soil material (depth > ~100 cm)                              | <input type="checkbox"/> fine soil material (depth < ~100 cm) / sand/gravel mix in the valley             |
|  | <input type="checkbox"/> scree (Ø < ~10 cm) / medium compact soil with small rock fragments / forest road  | <input type="checkbox"/> talus slope (Ø > ~10 cm) / compact soil with large rock fragments | <input type="checkbox"/> bedrock with thin weathered material or soil cover                               |
| (soiltype)<br><small>values needed for Rockyfor3D</small>  | 0  | 1  | 2    3    4    5    6    7  |
| 3. Surface roughness in the polygon  |  |  |   |
| MOH: typical obstacle height normal to the slope surface (m) that block encounters in 70%, 20% and 10% of the cases during a rebound on the slope surface. <b>Should be measured looking down the slope!</b> |  |         |   |
|  |  | MOH for 70% of the sample area (rg70)  | 0 - 100 (m)   |
|  |  | MOH for 20% of the sample area (rg20)  | 0 - 100 (m)   |
|  |  | MOH for 10% of the sample area (rg10)  | 0 - 100 (m)   |
| Lying tree stems*  | Mean height =  | m  | Area covered = %  |
| 4. Forest*   |  |  |   |
| Representative plot size: ..... m x ..... m  |  |  |   |
| DBH* (cm)  | * DBH: Tree diameter at breast height (usually measured 1.3 m above ground upslope from the stem)<br><small>Record all the DBH ≥ 5 cm measured in the plot: e.g., 8, 31, 17, 13, ...</small> |  |   |
| Stems / ha   |  |  |   |
| Mean DBH (cm)  |  | Coniferous (%)   |   |
| Stddev DBH (cm)  |  |  |   |
| Species*   |  |  |   |
| 5. Rockfall activity indicators / silent witnesses*  |  |  |   |
| Mean nr. of rockfall impacts on trees*   |  | Height(s) of rockfall impacts on trees (m)*  |   |
| Depth impact craters (m)*  |  | Fresh, deposited rocks in Polygon*   | Yes / No  |
| 6. Remarks / sketch*   |  |  |   |
|  |  |  |   |
| <small>* optional fields; these are not required for Rockyfor3D</small>  |  |  |   |

Figur 21 Protokoll för dataunderlag till simulering i Rf3D.

Dokumentationen i fält inför simulering i Rf3D ska ge stöd för den indata, dvs de ascii-filer som behöver skapas till simuleringarna. Som stöd för att ta fram ett eget protokoll finns i programmets manual ett fältprotokoll. Protokollet visas i Figur 21. En beskrivning av de olika delarna följer nedan.

Den generella delen är delvis självförklarande. Formuleringarna är anpassade till en utfallsstudie (simulering) av ett specifikt riskblock eller liknande, där man väljer att upprätta ett protokoll för respektive delområden i fält. Det kan finnas fördelar med att upprätta en egen mall för fältprotokoll, inte minst för att anpassa protokollets huvud efter behov.

Under blockform kan man välja att ange ett specifikt blocks form, eller en mer generell blockform för en specifik slänt, som stöd för simuleringsarbetet. Under densitet kan det vara lämpligt att i stället ange bergart och heterogenitet i släntens berggrundgeologi, liksom släntens strukturgeologi, som sprickighet, förskiffring och liknande. Informationen kring geologi bör i normala fall finnas från tidigare fältundersökning i området. I annat fall kan det vara lämpligt att göra ett separat protokoll för geologin, där bergarter och bland annat uppskattning om densitet framgår.

Under punkt 2, Soil, är det tänkt att man klassificerar hela undersökningsområdet baserat på jord/marktyp. De aktuella marktyperna är fixerade i Rf3D och översätts till den numeriska skalan i nederkant av protokollfältet vid simulering.

Mätning av MOH under 3 kan som beskrivits i rapporten ske med fokus på den småskaliga topografi som inte framträder i den höjdmodell som tagits fram. I bästa fall kan parametrarna vara satta till värdet 0 vid simulering.

Del 4 av protokollet används för att precisera skogstypen i delområden i slänten. Är det samma typ av skog i hela slänten kan detta utelämnas, men det behöver ändå registreras vilken typ av trädslag skogen består av. Protokollet är främst utformat för mätning i fält av faktiska träddiametrar, men även denna del går utmärkt att genomföra genom att använda DSM från LiDAR-data, där individuella träd kan identifieras och deras höjd, och diameter i brösthöjd (DBH) beräknas med utgångspunkt från höjd och trädtyp. Det som särskiljs i beräkningarna är lövträd, respektive barrträd. I simuleringarna anges den procentuella fördelningen för delområden i terrängen, vilka ritas in med polygoner.

Avsnitt 5 och 6 i protokollet är stöd i fältundersökningarna för att också bedöma släntens historik med avseende på tidigare inträffade blockutfall eller ras. I ett idealfall har man en statistik för frekvensen av händelser som kan vägas in i riskbedömningen, men den typen av underlag hör till undantagen.



**STATENS  
GEOTEKNISKA  
INSTITUT**

Statens geotekniska Institut

581 93 Linköping

[www.sgi.se](http://www.sgi.se)

E post: [sgi@sgi.se](mailto:sgi@sgi.se)

Växel: 013-20 18 00