

# **DRÖNARBASERAD UNDERSÖKNING AV BERGSLÄNTER – ERFARENHETER OCH POTENTIAL I 3-DIMENSIONELL GEODATA**

## **DRONE BASED SURVEYING OF ROCK SLOPES – EXPERIENCES AND FUTURE OUTLOOKS IN 3-DIMENSIONAL GEODATA**

*Filip Johansson, Bergab – Berggeologiska Undersökningar AB*

*Emelie Ekberg Bergman, Bergab – Berggeologiska Undersökningar AB*

*Axel Hellman, Sweco Civil AB*

### **Sammanfattning**

Bergslänter utgör ofta svåråtkomliga och riskfyllda miljöer att utföra bergtekniska undersökningar i, samtidigt som den ökande komplexiteten och digitaliseringen inom samhällsbyggnadssektorn skapar höjda krav på tillgänglig och skräddarsydd geodata för bergkonstruktioner.

Framsteg inom drönar- och databehandlingsteknologi möjliggör idag semi-automatiserad tids- och kostnadseffektiv införskaffning av geodata med skräddarsydd detaljnivå, omfattning och produktpaketering. Digital fotogrammetri sammanställer 3-dimensionella bergmodeller som punktmoln utifrån överlappande foton tagna med en drönarmonterad kamera. Efterföljande databehandling kan därefter generera ett flertal GIS- och CAD-kompatibla produkter såsom terrängmodeller, ortofoton och 3D-objekt.

Vi presenterar fältstudier från bergslänter i Göteborgsområdet, inkluderande rasområdet i Fjällbo där ett bergras om cirka 500 ton inträffade hösten 2017. Modellerna möjliggör en annars svåråtkomlig överblick och omfattande dokumentation, och erbjuder därmed ett effektivt planeringsverktyg för efterföljande inspektions- och åtgärdsarbeten.

Resultaten demonstrerar en stor potential för användandet av 3-dimensionell geodata vid inledande bergtekniska undersökningar i bergslänter. Den insamlade geodatan möjliggör undersökningar och analyser omfattande volymuppskattning, sprickmätningar och översiktliga stabilitetsanalyser via fjärranalys. Eftersom metoden kan undersöka stora ytor betydligt mer tidseffektivt än konventionella inspektionsmetoder ser vi en framtida potential för identifikation av rasriskområden i bergslänter, som en kompletterande metod med hög grad av spårbarhet. Vidare besparas personal vissa riskmoment relaterade till vistelse i potentiellt farlig terräng.

## **Inledning**

Bergslänter i anslutning till byggnation och infrastruktur förekommer över hela Sverige i både naturlig och konstruerad (sprängd) form, vilket medför en utbredd risk för potentiellt farliga blocknedfall och bergras. Uppskattningsvis sker 5-10 ras i bergslänter årligen i Sverige som medför konsekvenser för infrastruktur (SGI, 2018). Detta ställer höga krav på förvaltningen av bergslänter i anslutning till samhället, och rådande bergtekniska säkerhetsaspekter måste i flera fall kontinuerligt kartläggas för att utreda eventuella behov av underhållsinsatser. Stabilitetshöjande åtgärder som omfattar bergförstärkning, bergrensning och barriäranordningar erfordras generellt där konsekvenser av ett ras bedöms medföra fara för människor eller egendom. På grund av bergslänters höjd och ofta svårframkomliga lägen innebär behovsprioritering och dimensionering av dessa insatser ofta en utmaning vid besiktningstillfällen. En bättre förståelse för bergsläntens lokala geologiska förutsättningar och identifiering av strukturer i berget som kan initiera ras förbättrar möjligheterna att utforma adekvata stabilitetshöjande åtgärder. Vidare kan framtida underhållsbehov och rasrisk reduceras om berg- och förstärkningskonstruktioner samverkar fördelaktigt med berggrundens befintliga spricksystem och strukturer.

Interaktiva 3D-modeller tillhandahåller ett användbart kompletterande underlag till bergtekniska utredningar och dimensionering av stabilitetshöjande åtgärder i bergslänter. De senaste årens utveckling inom drönarteknologi och tillhörande sensorer möjliggör användandet av drönarbaserad digitalfotogrammetri till konsumentpriser, vilket erbjuder ett kostnadseffektivt verktyg för besiktningsarbeten i svårtillgänglig terräng. Från den drönarmonterade kamerans bilder framställs 3-dimensionella punktmoln genom SfM ("Structure from motion") -teknik under ett till stor del automatiserat arbetsflöde, vilket erbjuder en effektiv och spårbar metod för dokumentation, karakterisering och analys av bergslänter. I de punktmolnsbaserade 3D-modellerna kan bergtekniska parametrar och säkerhetsaspekter översiktligt kartläggas via fjärranalys, som en inledande fas i stabilitetsutredningar eller projekteringsskeden. I denna studie presenteras erfarenheter från arbeten med digitalfotogrammetriska 3D-modeller av drönarfotograferade bergslänter. I syfte att överskådligt demonstrera möjligheter och potential i att integrera 3-dimensionell geodata i bergtekniska utredningsmoment presenteras studier från tre områden som vardera belyser olika bergtekniska frågeställningar.

## **Bakgrund**

Tre olika områden har undersökts och sammanfattas i artikeln för att fånga en bredd i bergtekniska utredningsmoment som kan undersökas med drönarbaserade SfM-punktmoln. Områden valdes ut med hänsyn till deras tillgänglighet och lämplighet för respektive frågeställning (Tabell 1). För att undersöka vilken kvalitet som kan förväntas av sprickartering i punktmoln valdes en sprängd bergslänt intill en grönyta ut på grund

av dess goda tillgänglighet. I syfte att utvärdera potentialen att utifrån punktmoln identifiera och tolka de strukturer i en bergslänt som kan initiera ras analyserades ett aktuellt rasområde i Fjällbo, strax utanför Göteborg. Volymberäkning av instabila bergpartier med dimensionering av bergförstärkning utifrån beräkningar på punktmoln testades i en sprängd bergslänt intill en allmän väg i samband med pågående bergförstärkningsarbeten.

Tabell 1: Sammanfattning av använd utrustning för respektive tillämpning.

<i>Tillämpning</i>	<i>Områdesbeskrivning</i>	<i>Drönare</i>	<i>Kamera</i>
<i>Sprickkartering</i>	Sprängd bergslänt vid grönyta (630 m <sup>2</sup> )	DJI Phantom 4 Pro	20 Megapixel med 24 mm sensor. F/2.8-11.
<i>Strukturgeologisk tolkning av och analys av brottmekanismer</i>	Rasområde i naturlig bergslänt (5000 m <sup>2</sup> )	3DR Solo	12 Megapixel med 24 mm sensor. F/2.8
<i>Volymberäkning och dimensionering av bergförstärkning</i>	Sprängd bergslänt vid allmän väg (1500 m <sup>2</sup> )	DJI Phantom 4 Pro	20 Megapixel med 24 mm sensor. F/2.8-11

## Teknik

Fotogrammetri är en sedan länge etablerad mätteknik där överlappande fotografier modelleras till ett 3-dimensionellt punktmoln med SfM-teknik. Punktmolnet utgör grunden för definition och extrahering av bergteknisk och strukturgeologisk data (Micheletti et al., 2015; Westoby et al., 2012). I denna studie har bilder från en drönarmonterad kamera bearbetats till ett 3-dimensionellt punktmoln med SfM-teknik i mjukvaran Agisoft Photoscan, varefter 3D-modeller exporterats till diverse CAD- och GIS-kompatibla format. Bergtekniska analyser har gjorts i mjukvarorna CloudCompare, Dips och AutoCAD Civil 3D. CloudCompare har flertalet plugins och funktioner för analys av geodata och punktmoln. Pluginen qFacets användes för att semi-automatiskt identifiera och extrahera sprickytor från punktmoln (Dewez et al., 2016; Hellman, 2018). Fotografering utfördes från multipla vinklar och höjder med 60-80% överlapp i februari (2018) för att uppnå en heltäckande modell med minimala störningar från vegetation.

Punktmolnet för den strukturgeologiska tolkningen och analysen av brottmekanismer i rasområdet i Fjällbo georefererades i ett geodetiskt referenssystem utifrån referenspunkter på toppen av klippväggen. Referenspunkterna mättes in med en Trimble differential GPS och en fixpunkt för att uppnå en hög spatial noggrannhet. Spatiala fel och noggrannheten för 3D-modellen bedömdes utifrån precisionen på de inmätta referenspunkterna tillsammans med osäkerheten för punktmolnets projicering (Hellman, 2018). Punktmolnen som användes vid sprickkartering och volymberäkning med

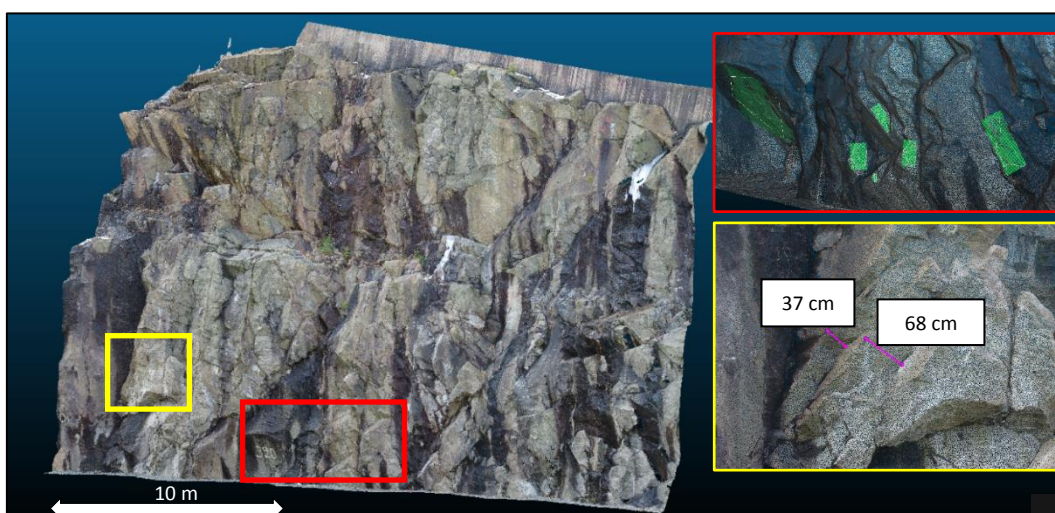
dimensionering av bergförstärkning projicerades i lokala koordinatsystem som definierades utifrån kända referenspunkter utan koordinatangivelser.

Kartläggning av sprickytor och tolkning av strukturgeologi utfördes i CloudCompare och dess plugin qFacets samt Rocscience Dips. Volymberäkning av bergpartier gjordes på punktmoln i AutoCAD Civil 3D. För semi-automatisk extrahering av sprickytorna med qFacets kalibrerades modellen utifrån tydliga sprickytor i punktmolnet vilka även hade observerats i fält. Manuell extrahering av sprickytor från punktmoln gjordes genom att markera minst 3 punkter på respektive sprickyta, vilket definierar ett polygonplan som återger sprickytans orientering i stupning och strykning.

## Tillämpningar

### *Sprickkartering*

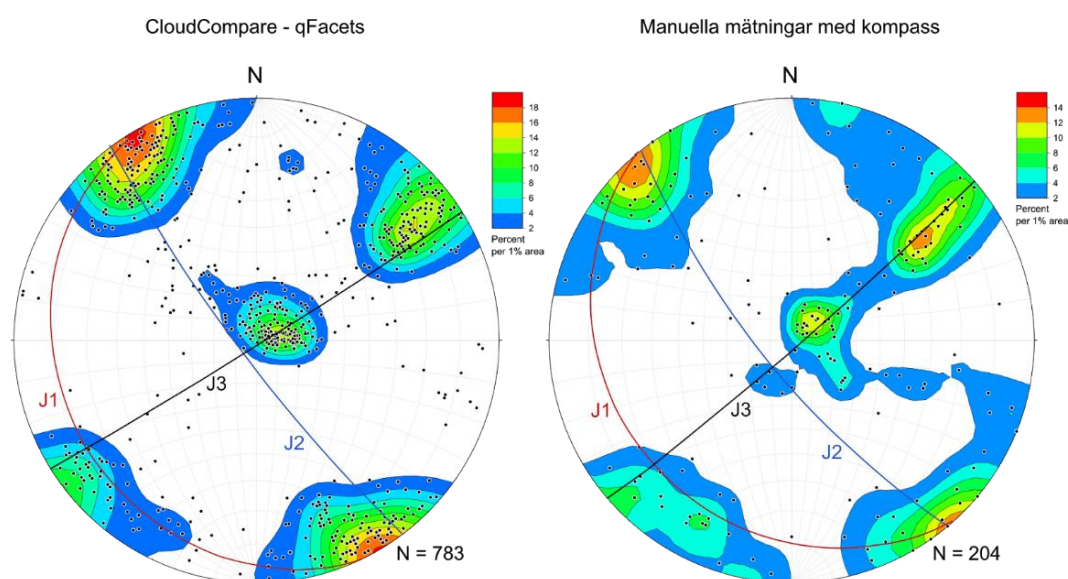
Stupning och strykning för naturliga sprickor i bergslänten mättes med kompass och inklinometer och jämfördes med motsvarande sprickor som extraherades manuellt ur punktmolnet (Figur 1). Sprickkarteringen i punktmolnet visar avvikelser mellan 0 och 9 grader för både stupning och strykning på individuella sprickytor jämfört med kompassmätningar. För 20 st analyserade sprickytor blev den genomsnittliga avvikelserna ungefär 3 grader för stupning och 5 grader för strykning (Bergman, 2018), vilket i bergtekniska kartläggningssyften kan anses som godtagbart. Skillnaderna kan delvis tillskrivas den utjämning av undulationer i sprickytan som de anpassade polygonplanen medför, men även den approximativa projiceringen av punktmolnet. Utöver sprickplanens orientering kan även sprickors utbredning, avstånd och frekvens fastställas i modellen. Mätning av sprickråhet från punktmoln har i tidigare studier visats möjligt (t.ex. Yunfeng et al., 2015) men omfattas inte i denna studie.



Figur 1: SfM-genererad 3D-modell som punktmoln av en sprängd bergslänt. Sprickytor kan kartläggas genom fjärranalys av modellen.

## Strukturgeologisk tolkning och analys av brottmekanismer i Fjällbo

Från punktmolnet kunde 783 st sprickytor extraheras semi-automatiskt med strykning och stupning samt spatiala angivelser enligt Dewez et al. (2016). För jämförelse mättes 204 st sprickytor i samma område med handhållen kompass och inklinometer. Strukturgeologisk kartläggning och kinematisk analys av brottmekanismer baserades på tolkning av polpunktsdiagram i Dips. Kartläggning av semi-automatiskt extraherade sprickytor från punktmolnet antyder tre huvudsakliga sprickgrupper: J1, J2 & J3 (Figur 2). Samma sprickgrupper antyds utifrån kompassmätningarna.



Figur 2. Resultaten från både extraheringen av sprickytor från punktmolnet och mätningar med handhållen kompass.

Mellan de två analyserna skiljer tolkningen av bergsläntens dominerande spricksystem med 2-14° för strykning och 2-7° för stupning (Tabell 2). SfM-processeringen, punktmolnet och inmätningen av referenspunkter uppvisar spatiala fel (RMSE) på mindre än 2 cm och punktmolnets projicering har ett fel på cirka 1 cm.

Tabell 2. Jämförelse av sprickgrupper tolkade från kompassmätningar och extraherade sprickytor från punktmolnet.

Sprickgrupp	Kompass (fält)		Punktmoln (qFacets)		Differens	
	Strykning	Stupning	Strykning	Stupning	Strykning	Stupning
J1	140°	14°	154°	11°	14°	3°
J2	141°	74°	143°	81°	2°	7°
J3	49°	86°	58°	88°	9°	2°

Resultaten mellan kompassmätningarna och sprickytorerna som är extraherade från punktmolnet överensstämmer i hög grad. De små skillnader som förekommer kan till viss del tillskrivas den valda qFacets metoden som utjämnar mindre undulationer i sprickytorerna. Skillnader i populationsstorlek och tolkning av polpunktsdiagrammen kan



även bidra till dessa variationer. Spricksystemet karakteriseras av de brant stupande J2 och J3 som tillsammans med J1 skapar en övergripande blockighet och bergmassans struktur. J1 stupar mindre brant och utgör subhorizontala basplan och sprickytor som i enstaka fall kan utgöra glidytor. Den mest signifikanta brottmekanismen enligt den kinematiska analysen i Dips är överstjälpling med J1 som basplan (83%) och kilbrott med avseende på alla sprickplan (26%).

Bergrasets brottyta återfinns vid en bergartsövergång i bergslänten, där det finns rikt med glimmer, vittrade ytor, vegetation och dränerande vatten. Närmare analys av brottytan visar att överstjälpling är den mest troliga brottmekanismen. Resultaten överensstämmer med observationer i fält och den okulära bedömningen av 3D-modellen. Flertalet lösa block återfinns utmed bergväggen samt ansamlingar av möjligt rasmaterial nedanför. Upprepad frost- och rotsprängning är starkt bidragande faktorer som bedöms ha orsakat raset.

### ***Volymberäkning och dimensionering av bergförstärkning***

I en sprängd bergslänt intill en allmän väg bedömdes ett större sammanhängande bergparti på cirka 10 meters höjd instabilt och ett eventuellt ras skulle sannolikt medföra konsekvenser för vägen och dess trafikanter (Figur 3). Det instabila bergpartiet utgörs av en sammanhängande skiva som ligger på ett sprickplan som stupar brant mot vägen. Bergskivans egentyngd uppskattades okulärt i fält till cirka 100 ton.



*Figur 3. Volymen och glidplanet för ett instabilt bergparti i en bergslänt beräknades. Den bedömda glidyten som styr ett eventuellt ras är rödmarkerad i bilden.*

Volymen för bergskivan beräknades i AutoCAD Civil 3D på punktmolnet genom att anpassa ett plan till den tolkade glidytan som skulle styra ett eventuellt ras. Bergvolymen beräknades då till 34 m<sup>3</sup>, vilket med en antagen densitet på 2,7 ton/m<sup>3</sup> ger bergskivan en egentyngd på cirka 92 ton. Glidplanets lutning beräknades manuellt i CloudCompare till 57° och dess friktionsvinkel bedömdes i fält till 30°. Utan att ta hänsyn till kohesionen i glidplanet blir den beräknade bultpåkänningen enligt modellen 473 kN, vilket i hög grad överensstämmer med fältobservationer.

## **Erfarenheter och slutsatser**

Resultaten demonstrerar att drönare utrustade med digitalkameror av standardkvalitet tillhandahåller en värdefull kompletterande metod för karakterisering av bergslänter och potentiella rasriskområden, samt vid efterföljande bergförstärkningsarbeten. SfM-punktmolnen som kan produceras från drönarbilder erbjuder tillräcklig detaljnivå och noggrannhet för kartläggning av såväl individuella sprickor som övergripande spricksystem och bergvolym i bergslänter. Modellerna erbjuder även en övergripande konceptualisering, spårbarhet och dokumentation av inspektionsresultat och bergtekniska bedömningar. Utifrån resultaten framgår att detta är ett tillförlitligt verktyg med hög spatial noggrannhet vilket kan användas som ett kostnadseffektivt komplement till fältundersökningar och alternativ till dyrare laserskanningsmetoder. Erfarenheter från dessa tillämpningar bestyrker emellertid behovet att relatera och justera modellerna till mänskliga fältobservationer och bergteknisk kunskap.

## ***Datakvalitet och spatial noggrannhet***

Mätosäkerheten vid sprickartering i drönarbaserade SfM-punktmoln anses från resultaten tillräcklig låg för att möjliggöra tillförlitliga bergtekniska tolkningar och bedömningar. Volymberäkning av bergpartier med drönarbaserade SfM-punktmoln indikeras av resultaten återspegla okulära fältbedömningar i en godtagbar omfattning. Jämförelsen är emellertid begränsad eftersom en mätosäkerhet inte kan definieras i förhållande till en okulär volymmuppskattning.

Den noggranna och precisa metoden med en D-GPS är lämplig för större områden med komplexa problem och geologi där höga krav ställs på spatial noggrannhet i punktmolnet. Resultaten antyder dock inga större variationer i kartläggning av bergets strukturer mellan punktmoln som är inmätta med D-GPS och punktmoln som är projicerade i lokala koordinatsystem utifrån kända referenspunkter. Generellt kan en noggrannhet på <2 cm förväntas med kompletterande inmätning av D-GPS och <20 cm förväntas utifrån endast drönarens inbyggda GPS. Vidare är en diskussion angående noggrannhet och metodval viktig för drönarbaserade undersökningar, och måste anpassas till den bergtekniska kontexten samt syftet med undersökningen.

Fotograferingsavståndet har stor inverkan på detaljnivån och bör skräddarsys efter undersökningens syfte och kamerans upplösning. Mängden data som kan extraheras ur

punktmoln är väldigt stor. För att undvika onödig modelleringstid, skev fördelning eller att överväldigas av redundant data är det därför viktigt att kalibrera och reducera mängden data till den aktuella frågeställningen.

### ***Begränsningar***

Vegetation utgör ofta en begränsning i fotogrammetri eftersom vanliga bildkameror inte kan penetrera övertäckande grönska. Väderförhållanden styr även möjligheten att genomföra en drönbaserad undersökning eftersom vind och väta påverkar drönarens flygförmåga och dålig ljussättning kan förvanska SfM-modelleringen.

### **Vidare tillämpningar**

Eftersom såväl bergets individuella strukturer som övergripande sprickgrupper kan kartläggas utifrån drönbaserade SfM-punktmoln kan metoden tillhandahålla värdefull och kompletterande data i olika klassificeringssystem av bergmassor, exempelvis Q-systemet.

Modellerna kan med fördel användas visuellt för konceptualisering och avgränsning av rasområden. I vidare tillämpningar är det även möjligt att använda drönbaserade 3D-modeller som grund för modellering av berggras och bedömning av riskområden.

Under det senaste decenniet har metodik för klassificering av bergmassa utifrån punktmoln utvecklats och möjliggör digitaliserad kvantifiering av rasrisk i bergslänter, vilket tillhandahåller ett värdefullt verktyg i svåröverskådliga områden. Matasci et al. (2017) har utvecklat metodik för spatial identifikation av potentiella rasområden samt kvantifiering av benägenheten för berggras utifrån analys av punktmoln. Analyserna är validerade och testade utifrån kända berggras, och författarna delger även ekvationer och beräkningsmetodik. Delar av metodiken testades översiktligt av Hellman (2018) och resultaten påvisade en potential för vidare användning.



## Referenser

- Bergman, E. E. (2018) Jämförelse av metod vid stabilitetsanalys i bergslänter (kandidatuppsats). Uppsala: Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1212127/FULLTEXT01.pdf>
- Dewez, T. J. B., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C., & Rohmer, J. (2016). Facets : A cloudcompare plugin to extract geological planes from unstructured 3d point clouds. In International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-799-2016>
- Hellman, A. (2018). Geohazard assesments of rock climbing sites; development of UAV and field based solutions (Masteruppsats). Göteborg: Institutionen för geovetenskaper, Göteborgs universitet. [https://studentportal.gu.se/digitalAssets/1703/1703965\\_b1008.pdf](https://studentportal.gu.se/digitalAssets/1703/1703965_b1008.pdf)
- Matasci, B., Stock, G. M., Jaboyedoff, M., Carrea, D., Collins, B. D., Guérin, A., ... Ravelin, L. (2017). Assessing rockfall susceptibility in steep and overhanging slopes using three-dimensional analysis of failure mechanisms. *Landslides*, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0911-y>
- Micheletti, N., Chandler, J. H., & Lane, S. N. (2015). Structure from Motion (SfM) Photogrammetry. *British Society for Geomorphology Geomorphological Techniques*, 2(2), 1–12.
- SGI (2018). Säkra bergslänter, Kunskapsläget och fallstudier, SGI Publikation 44, Statens geotekniska institut, Linköping. Diarenr. 1701-0065.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). “Structurefrom-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2012.08.021>