



LUND UNIVERSITY

Geofysiker, drönare och geologer ger tillsammans en bättre bild av berget

Jonsson, Peter; Johansson, Leif; Johansson, Sara; Olsson, Per-Ivar; Dahlin, Torleif

Published in:
Bygg & teknik

2019

Document Version:
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Jonsson, P., Johansson, L., Johansson, S., Olsson, P.-I., & Dahlin, T. (2019). Geofysiker, drönare och geologer ger tillsammans en bättre bild av berget. *Bygg & teknik*, (1/19), 52-55.

Total number of authors:
5

Creative Commons License:
Unspecified

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

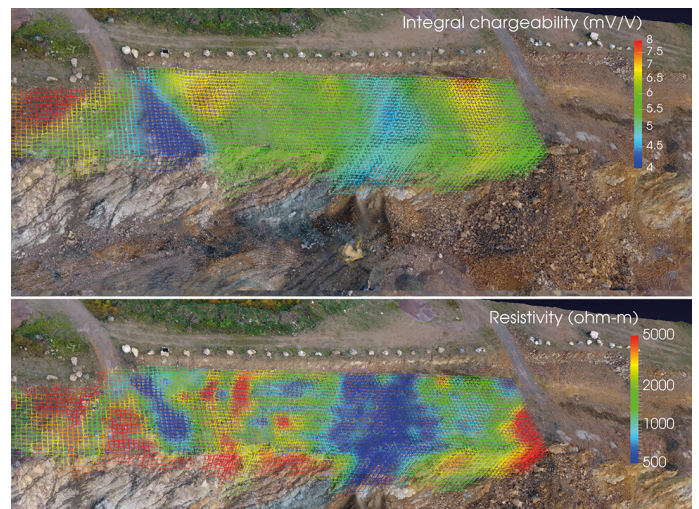
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

Geofysiker, drönare och geologer ger tillsammans en bättre bild av berget

Teknisk geologi vid Lunds tekniska högskola har i ett nyligen slutfört projekt, finansierat av Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo), undersökt om geofysiska mätningar med DCIP (kombinerade resistivitets- och IP-mätningar) kan ge bättre information om bergmassan i samband med planeringen av tunnlar och andra bergarbeten samt berguttag i bergtäkter. Resultaten bekräftar att DCIP i den undersökta miljön kan användas för att indikera lervittrade zoner, svaghetsstrukturer och uppkrossade zoner. Detta visar på att det går att underlätta och förbättra prognosarbetet, genom att ännu en möjlighet ges att bedöma bergmassans kvalitet innan byggfasen inleds.



För att ge en bättre bergprognos är det viktigt att använda relevanta metoder i förundersökningsstadiet, med syfte att tidigt kunna genomföra tids- och kostnadseffektiv kartläggning av variationer i jord och berg. Den i Sverige ofta använda Q-värdesbedömningen, liksom andra indexbaserade metoder, bygger huvudsakligen på fysisk observation av bergets mekaniska egenskaper, ibland i kombination med hydrauliska tester.

Sådana bedömningar baseras på bergblottningar och borrhävar eller borrhål,

det vill säga ger punktinformation, och det finns en stor risk att denna inte är representativ för bergmassan som helhet. Det är viktigt, speciellt i komplicerade miljöer, att inte enbart förlita sig på punktbaserad information, utan att även använda volymstäckande metoder för att säkra att till exempel undersökningsborrning utförs på representativa ställen och inkluderar kritiska zoner. Observationer av olika slag är nyttiga i alla skeden av ett bergbyggnadsprojekt, och det är en fördel om många olika bergparametrar analyseras för samtolkning. Detta för att ge en mera tillförlitlig helhetsbild och för att minska risken att missa kritiska zoner.

Den information som kan fås med

hjälp av icke-förstörande undersökningar som kombinerade resistivitets- och IP-mätningar (DCIP) blir därför av allt större intresse. Det har vid upprepade tillfällen visats att variationer i andra fysikaliska parametrar än de mekaniska, till exempel de elektriska egenskaperna, kan kopplas till faktorer som sprickzoner, lervittring och vissa mineraltyper i bergmassan. Ett gott exempel på hemmaplan, där resistivitetsmätningar visade god prediktionsförmåga vad avser förändringar i bergets egenskaper, är undersökningar i samband med byggandet av Hallandsåstunneln, där modellen över bergets resistivitetsegenskaper kunde användas för rent operativa ändamål under byggtiden.

Forskning som fokuserar på att utvärdera vilka slutsatser som kan dras om berggrunden baserat på insamlade geofysiska data är därför viktig. Ofta består valideringen av geofysiska tolkningar av en i sammanhanget liten volym från exempelvis kärnbörningar, och endast i undantagsfall kan undersökningsresultaten jämföras med tillgängliga större berggrundsytor, oftast i samband med drivning eller uttag.



Peter Jonsson
Teknisk geologi LTH, Lunds universitet



Leif Johansson
Geologiska institutionen, Lunds universitet



Sara Johansson
Teknisk geologi LTH, Lunds universitet



Per-Ivar Olsson
Teknisk geologi LTH, Lunds universitet



Torleif Dahlin
Teknisk geologi LTH, Lunds universitet

Därför återstår osäkerheter kring hur väl de geofysiska resultaten och tolkningarna överensstämmer i hela den geofysiskt undersökta bergvolymen, och de olika typerna av information kan ibland vara svåra att jämföra på grund av att de olika metoderna avspeglar olika parametrar.

Projektet

Idén bakom LTHs projekt är att först, innan bergguttaget, utföra en tredimensionell undersökning med den geoelektriska metoden DCIP. Härfter skapas en (också tredimensionell) modell med detaljerad geologisk information efter hand som det undersökta området sprängs bort.

På så sätt skapas en möjlighet att jämföra resultat och tolkningar från de geoelektriska metoderna med geologisk information i hela den undersökta volymen. Till exempel kan den tredimensionella utbredningen av sprickzoner, diabasgångar etc. följas i den geologiska modellen och jämföras med den geofysiska. Den geologiska modellen har framställts med fotodokumentation och drönarfotografering samt traditionell geologisk kartering. Detta har kombinerats med provtagning och detaljstudier med bland annat elektronmikroskop för att undersöka om det finns faktorer på mikroskala som kan ge utslag i de geofysiska mätningarna.

Målet med projektet är att ge insikter i hur väl geoelektriska undersökningar i en heterogen berggrund kan avbilda geologiska strukturer, och på vilken detaljnivå sådana kan lokaliseras. Syftet är att kunna vidareutveckla och anpassa framtida undersökningar i större infrastrukturprojekt samt kunna förbättra planeringen av bergguttag i bergtäkter utifrån den tillägnade kunskapen.

Som mätobjekt i projektet används Sydstens bergtäkt i Dalby, Dalby stenbrott öster om Lund i Skåne. Här utvinns idag berg för produktion av krossmaterial, och täkten är en av de större i området. De geologiska förutsättningarna i Dalby stenbrott lämpar sig väl för projektets syfte då det uppvisar relativt stora variationer i bergarter, strukturer och bergkvalitet.

Berggrunden består i huvudsak av tre olika bergarter: granitisk gnejs, diabas och amfibolit, men mindre partier av andra bergarter förekommer. Strukturerna är komplexa med veckning och bildning av linser, främst i amfiboliterna. Bergarterna har på grund av storskaliga tektoniska processer utsatts för omfattande deformation i flera generationer. Breccior och krosszoner före-



Figur 1: Insamling av DCIP-data i Dalby stenbrott. Notera kablaget med elektroderna samt instrumentet (till höger i bild). Ibland är det svårt att få tillräcklig kontakt mellan elektroder och mark, då krävs (som här) att vätska, eventuellt med tillsatser, hälls på marken runt elektroderna. Den undre delbilden visar elektrodernas inmätta positioner på markytan inlagda i ett ortofoto.

kommer liksom leromvandlingszoner. Fältundersökningarna har fokuserats kring en cirka 300 m lång, 40 m bred och 20 m hög bergvolym. Som första insats genomfördes DCIP-mätningar från ytan, innan avbaningen av jordlager gjordes.

Arbetets genomförande har varit beroende av välvilligt stöd från Sydsten AB och samordning med den ordinarie verksamheten i bergtäkten, och produktionen har styrt projektets framdrift.

Geofysiska undersökningar

Resistivitet

Resistivitetsundersökning bygger på antagandet att tekniska egenskaper i marken, här bergmassan med överliggande kvartära avlagringar, avspeglas i förändringar i markens ledningsförmåga. Vanligen används inversen till ledningsförmåga, resistiviteten, som mäts i ohm-meter, här betecknat Ωm . Exempel på fysikaliska egenskaper som kan förändra resistiviteten i en annars homogen bergart är själva bergartens mineralogi (matrisen), porositet, porvatteninnehåll och porvätskans ledningsförmåga. I en bergmassa med strukturer och variationer i bergartssammansättning är sprickvidder och sprickorientering, förekomst av lermineral, bergartsfördelning och lagringssituation andra exempel på resistivitetsändrande egenskaper.

Inducerad polarisation

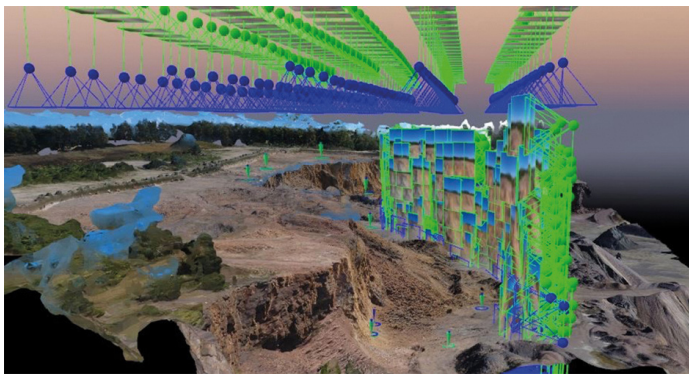
I samband med resistivitetsmätningarna går det att observera uppladdnings- och urladdningsfenomen i marken. Ett sammanfattande namn för de mätbara effekterna är inducerad polarisation, IP-effekter. Mätstorheten för IP-

effekterna är laddningsförmåga, *chargeability*, som är ett mått härlett ur den tidsberoende potentialförändring som mäts upp efter en snabb förändring av strömmatningen, typiskt vid ett polaritetsskifte.

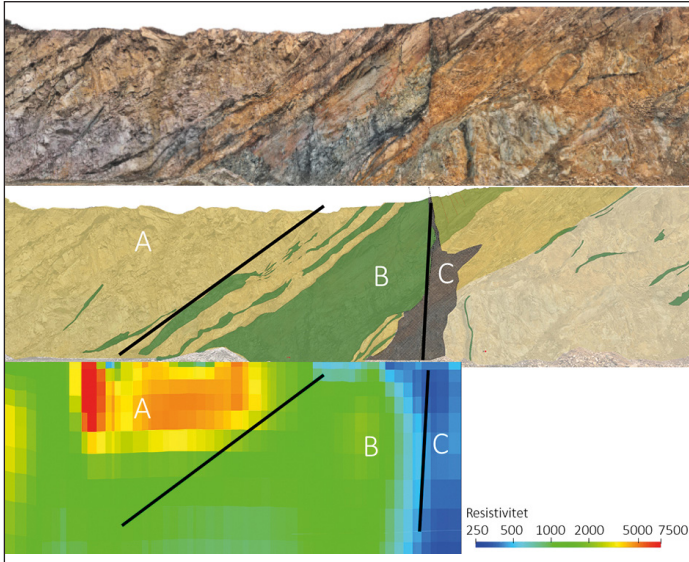
Dessa kan i makroskala bero på elektrisk polarisering och uppladdning av ledande partier i markvolymen, i mikroskala på förflyttning av joner och laddade partiklar i porvätskan, liksom polarisering av små enskilda korn eller strukturer i mikrometerstorlek. Det är till exempel välkänt att IP-effekten kan vara hög då det finns konduktiva mineral som pyrit och andra sulfider i marken; detta är anledningen till att IP-metoden länge har använts för prospektering efter mineraler. Även geologiska material utan innehåll av konduktiva mineral kan ge upphov till IP-effekter, men ger oftast mycket svagare signaler. Exempelvis ger en högre andel lermineral i sediment och sedimentära bergarter ofta förhöjda IP-värden.

Fältmätning och databearbetning

Bestämning av markens resistivitet görs genom att sända ström mellan två elektroder som är nerförda i marken, typiskt 1–2 dm, och samtidigt mäta spänningen mellan andra elektroder. Av mättekniska skäl används korta pulser av likström (DC) med omväxlande polaritet. Inducerad polarisation (IP) mäts traditionellt som den kvarvarande spänningen i marken efter strömpulsen, men med modern teknik kan IP-effekten också mätas samtidigt som strömmen sänds. Djupnedträngningen för mätningen styrs av avstånden mellan elektroderna, och genom att mäta med



Figur 2: En texturerad tredimensionell terrängmodell: resultatet från en drönarfotografering bildar en datormodell av terrängen. De blå pyramiderna visar drönarens fotograferingspositioner och de bilder som används för att skapa punktmolnet och elementnätet.



Figur 3: Jämförelse mellan geologisk tolkning (överst och geofysisk modell (nederst). Markeringarna A-C diskuteras i texten. Granitiska gnejser visas i gulbrunt och amfiboliter som grönt. Den olivgröna amfiboliten är omvandlad och biotitrik. Bergarterna i det mörkbruna området är breccierade längs en förkastning. Panoramatets bredd är cirka 80 m.

många olika elektrodavstånd längs en linje eller över en yta erhålls information om de geoelektriska egenskapernas variation i ett vertikalt tvärsnitt eller i en volym.

DCIP-mätningar utförs idag med datorstyrda flerelektrodsystem där elektroduppställning och mätsekvens kan optimeras till det aktuella mätobjektet. Genom att enligt ett mätprotokoll variera vilka elektroder som kopplas in, längs en mätlinje, samlas på detta sätt in hundratals eller tusentals datapunkter. Resultatet används efter kvalitetskontroll för att med hjälp av ett datorprogram skapa en FEM-modell (finita-elementmodell) av marken i form av en modellsektion som visar resistivitet och IP-egenskaper längs den aktuella mätlinjen, en så kallad inversmodellering (inversion). Om data från flera linjer kombineras kan volymmodeller skapas.

Geologisk kartläggning

För att kartera geologin har en traditionell geologisk besiktning genomförts, kompletterad med provtagning och laboratorieanalyser. Dessutom har fotografiska metoder använts; panoramafotografering och framställning av tredimensionella modeller med hjälp av drönarfotografering.

Geologiska laboriemetoder

Prover från bergmassan i form av stuffer har samlats in i pallväggarna. Här efter har en första petrologisk analys av insamlade bergprover genomförts. Baserat på denna har tunnslip av utvalda prover har tagits fram, och en petrografisk analys av tunnslipen har sedan genomförts med hjälp av bland annat svepelektronmikroskopi (SEM).

Panoramafotografering

Fotodokumentation av bergväggar är en mycket användbar metod om den kombineras med geologisk besiktning i fält. Konventionell fotografering innebär dock en kompromiss mellan detaljåtergivningen i bilden och hur stor yta som kan avbildas. Idag finns datorbaserade metoder för att lägga samman flera bilder till panoraman, vilket ger möjlighet att avbilda större ytor med stor upplösning. I projektet har panoramabilder med upp till 7 gigapixel producerats, jämför med en vanlig kamera, som ger bilder i storleksordningen 20–40 megapixel. Ett resultat från panoramafotograferingen visas överst i *figur 3*.

Structure from motion

Sedan mitten av 1990-talet har en fotografisk metod för tredimensionell

avbildning av ytor växt fram och funnit användning. Metoden *Structure from Motion* (SfM) producerar en tredimensionell inmätning av terrängen, ett så kallat punktmoln, med koordinatsatta bildpunkter. Till skillnad från traditionell stereofotografering krävs inte kalibrerade kameror, kända kalibreringspunkter eller kända fotograferingspunkter, då dessa beräknas i den iterativa process som används vid bearbetningen. Detta gör att detaljerad och koordinatsatt fotografisk information kan erhållas, samtidigt som stora ytor kan avbildas.

För att kunna generera ett punktmoln med hjälp av SfM-tekniken krävs ett stort antal överlappande bilder från olika positioner. En effektiv metod att samla in sådana bilder är med hjälp av så kallade drönare. Från punktmolnen går det sedan att ta fram en texturerad 3D modell genom att projicera drönarbilderna på triangulerade punktmoln, se *figur 2*.

Resultat

Grundat på geologiska fältobservationer och de ovan visade panoramafotograferingarna har en geologisk tolkning av bergväggarna gjorts, se *figur 3* mitten. Flera olika sådana tolkningar har gjorts efter hand som nya pallväggar sprängts fram. Dessa svarar alltså mot olika vertikala snitt i bergmassan, och kan jämföras med den tidigare uppmätta volymen av geofysiska värden. Det går alltså direkt att jämföra geologisk information med geofysisk, se *figur 4*.

Det är tydligt att riktningarna på de detekterade anomalierna med förmodat geologiskt ursprung följer observerade riktningar på geologiska strukturer i området. Resultaten visar att de två låg-resistiva vertikala anomalierna i DCIP-resultaten svarar mot en mer amfibolitrik del av urberget, markering B i *figur 3* nederst, och en breccierad (uppkrossad) zon med tecken på lerovandling (markering C). Vidare kan en högresistiv zon i NO-SV riktning identifieras (markering A) som sannolikt beror på en lägre andel amfibolit och lägre förekomst av järnhaltiga mineral i bergmassan.

Vid en jämförelse med den geologiska dokumentationen (panorama, drönarmodell och geologisk dokumentation) framgår det att lutande geologiska strukturer (till exempel amfibolitstråken) återspeglas mindre väl i resistivitetsmodellerna. Anledningen till detta är oklar. Antingen är de fysiska

kontrasterna mellan till exempel granit och amfibolit för små för att detekteras med geoelektriska metoder, eller så misslyckas den numeriska inversionsprocessen med att representera lutande strukturer korrekt.

IP-värdena är generellt låga i volymen, med undantag av en anomali där uppladdningsförmågan är något förhöjd. Detta förmodas bero på lervittrade zoner där även den vattenhållande kapaciteten är större. Dessutom fanns några områden där uppladdningsförmågan är något mindre kombinerat med högre ledningsförmåga, där porositeten eller salthalten förmodligen är förhöjd.

Slutsats

Möjligheten att identifiera varierande materialegenskaper i marken är beroende av en mätbar kontrast i fysiska egenskaper, i detta fall elektriska egenskaper. Detta projekt visar att variatio-

ner i lerinnehåll, porositet och vatteninnehåll kan detekteras med både resistivitet och IP. Möjligtvis kan en viss skillnad mellan olika typer av granitiska gnejser och amfiboliter detekteras med resistivitet, om innehållet av konduktiva mineral skiljer sig åt.

Mätbara variationer i IP är till stor del beroende av ett visst vatteninnehåll i det geologiska materialet, eftersom polarisering av mineralcorn förutsätter att elektriska dubbellager bildas i vattenfilmen kring dessa. Att den undersökta bergvolymen varit ganska väldränerad på grund av närheten till täkten kan ha bidragit till mestadels små IP-effekter

De detekterbara egenskaperna kan inte direkt översättas till mekaniska parametrar, men är ändå av stor betydelse för bedömningen av berget, eftersom kopplingen till byggbarhet och bergkvalitet är stor. Vår bedömning

är därför att DCIP-metoden inte kan ersätta traditionell geologisk bedömning eller kärnbörningar, men att den genom sin förmåga att avbilda större volymer kompletterar sådana på ett utmärkt sätt. DCIP-metoden har därför genom sin effektivitet och relativt låga kostnad stor potential för att bli en av standardmetoderna i bergbyggarens verktygslåda. Metoden bör användas i ett tidigt skede, så att resultaten kan användas som underlag för design av borrhprogram och andra detaljundersökningar.

Tack

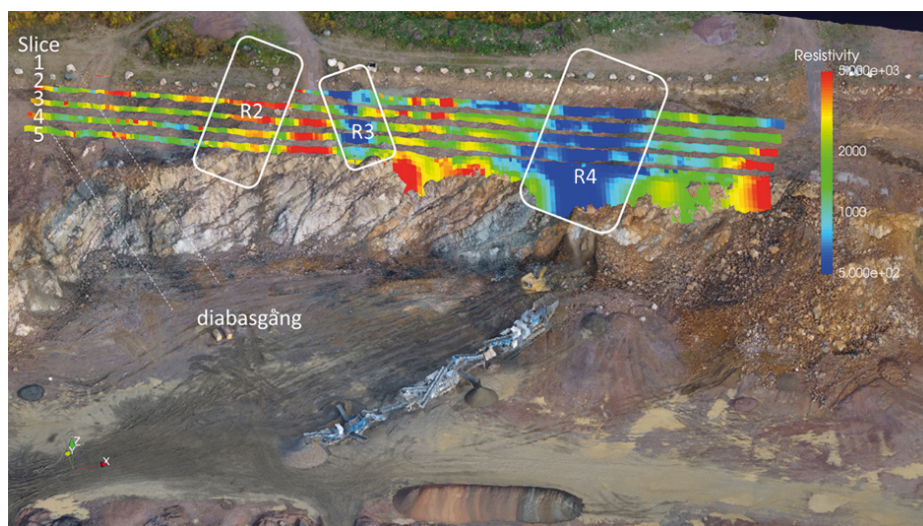
Författarna vill tacka Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning, som finansierat projektet. Arbetet har genomförts i nära samarbete med Sydsten AB, utan vars välvilliga medverkan projektet hade varit omöjligt att genomföra. Företaget har bidragit med bildmaterial och borrhkärnor till projektet, förutom att de upplåtit undersökningsområdet. Ett speciellt tack riktas till Leo Kramár och Mikael Svensson på Sydsten AB. Ett tack också till Chani Johnsson från CJ RC Flying som genomfört drönarflygningarna. Bearbetningen av data har delvis genomförts med resurser som tillhandahållits av Lunds universitets centrum för högpresterande datorer, LUNARC. ■

Läs mer:

www.tg.lth.se

Rapporten finns för nerladdning på

www.befoonline.se



Figur 4: Skivor genom en tredimensionell resistivitetsmodell tillsammans med drönarmodell från samt markeringar av synliga prominenta strukturer. Då den geologiska och den geofysiska modellen jämförs kan ses att de geofysiska anomalierna (R2 – R4) följer de geologiska strukturerens huvudriktningar (R2 samt R4) eller i något fall strukturer skapade av människan (R3, förhöjd saltförekomst vid bilväg).