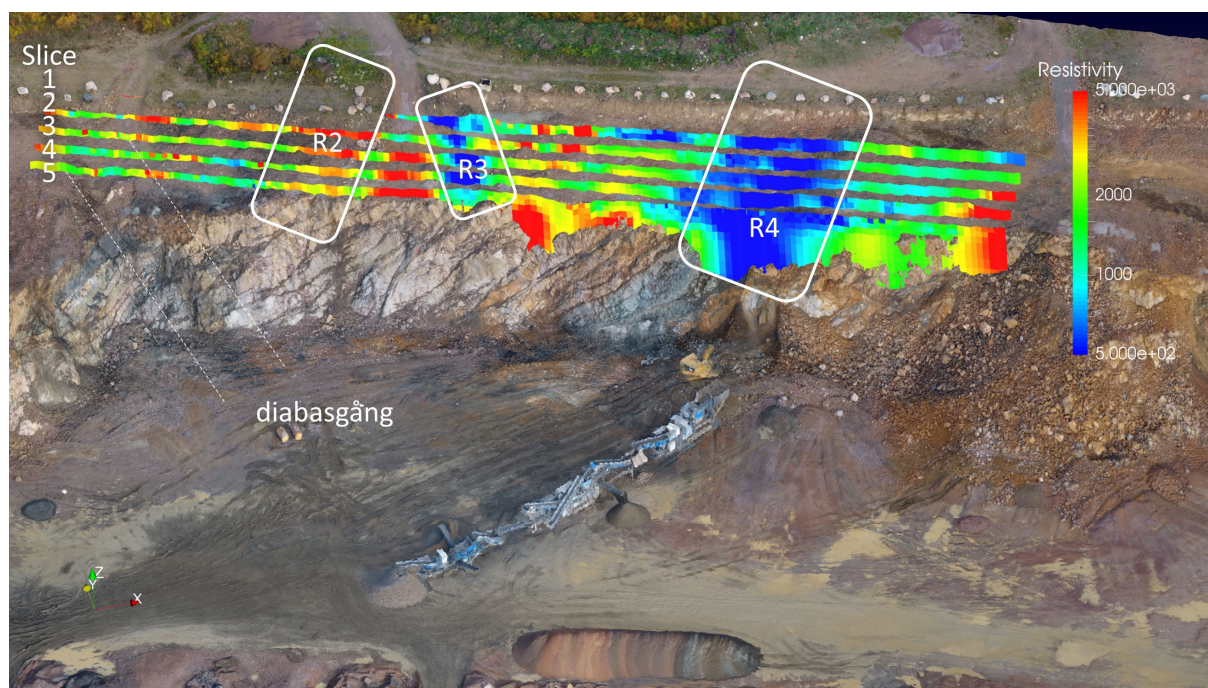


Integrerad förundersökning för bergentreprenader och bergtäkter



Exempel på resultat från mät försök i bergtäkt från tidigare projekt (Jonsson et al 2018). Skivor genom en tredimensionell resistivitetsmodell tillsammans med drönarmodell 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 strukturernas huvudriktningar (R2 samt R4) eller i något fall strukturer skapade av människan (R3, förhöjd saltförekomst vid bilväg).

ANSÖKAN TILL TRAFIKVERKET - 2020-04-30

Torleif Dahlin

A. Bakgrund

Bergmaterial är en oundgänglig råvara som är nödvändig för transportinfrastruktur (vägar, järnvägar, broar, etc.), energiförsörjning, vattenförsörjning, avlopp, etc., och därmed för samhällets fortsatta funktion och utveckling. Bergmaterial är en nyckelingrediens i tillverkningen av betong och asfalt, och därmed vid byggande av industrilokaler, bostäder, kontor, sjukhus och andra offentliga byggnader liksom till vägar, järnvägar och broar.

Bergmaterialindustrin producerar och levererar i storleksordningen 80-100 miljoner ton bergmaterial varje år, vilket gör bergmaterial till en av landets största industriprodukter. Det genereras också stora mängder överskottsmassor från bergskärningar och tunnelbyggen, som potentiellt är en värdefull råvara. Bra kvalitet och rimligt pris på bergmaterial är centralt för tillväxt, sysselsättning och välfärd, och en infrastruktur av hög kvalitet gör transporter effektivare och därmed mindre energikrävande. Framställningen av bergmaterial har dock i sig miljöpåverkan, den ger ingrepp i landskapsbilden, grundvattenpåverkan, påverkan på växt och djurliv, samt leder till energiåtgång för framställning och transport. Det är därför av stor betydelse att utvinningen planeras och utförs på bästa möjliga sätt i förhållande till förutsättningarna, vilket kräver tillgång till relevant kvalitetssäkrad information.

Planering inför expansion av befintliga eller öppnande av nya bergtäkter

Inför anläggande av nya eller expansion av befintliga bergtäkter krävs information om naturresursens egenskaper; djup till berg, typ av bergart och variation i bergkvalitet i form av olika typer av sprick- och krosszoner, vittringsgrad, etc. Kostnaden för avbaning av jordlager ovanpå berget är starkt kopplad till jorddjupen, och det är viktigt att bergkvaliteten är tillräckligt god för att motivera kostnaden och påverkan på miljön. Det är också önskvärt att kunna särskilja högkvalitativt berg som duger till ballast, slitlager och bärlager från sämre berg som kan förekomma i gångbergarter och sprickzoner. Vidare är jordlagrens sammansättning viktig så att man kan bedöma om det avbanade materialet kan säljas. Bergets strålning är också betydelsefull, och om betydande delar av bergmassan har förhöjda strålningsvärden begränsas användbarheten för materialet. Sådant berg finns dock endast i mindre delar av Sverige, och mätmetoder för kartläggning finns redan, varför vi valt att inte fokusera på det här.

Grundvattenförhållanden är också viktiga att känna till med tanke på prognostisering av miljöpåverkan av en framtida täktverksamhet, vilket är centralt i tillståndsprocessen, men också för bedömning av totalekonomin (kostnader för länshållning). Information är nödvändig inte bara om grundvattennivåer, utan variation i hydrauliska egenskaper inom och kring den framtida täktens utsträckning krävs för att göra en realistisk och trovärdig prognos. Detta är särskilt utmanande i den typ av berg som är intressant för täktverksamhet, eftersom enstaka sprickzoner eller bergartsgångars läge och egenskaper kan ha en avgörande betydelse.

Sammantaget krävs tillräckligt god information om djup till berg och bergets egenskaper i tre dimensioner (3D) för att det ska vara möjligt att göra en säker prognos av kostnader och möjliga intäkter för en framtida täktverksamhet, samt en realistisk bedömning av dess

miljöstörning. Kraven på tillförlitliga prognoser i samband med miljöprövningar har ökat, och det är sannolikt att kraven kommer skärpas ytterligare i framtiden.

Entreprenadberg och masshantering

I samband med större infrastrukturprojekt är det vanligt att det uppstår stora överskottsmassor av jord- eller bergmaterial. Beroende på materialets egenskaper utgör massorna en värdefull råvara som kan användas inom andra delar av projektet eller i andra projekt. Om materialegenskaperna är olämpliga för användning i projekt återstår bortforsling och deponering, vilket kan medföra stora kostnader. För att kunna hantera massorna på ett ändamålsenligt och kostnadseffektivt sätt är det centralt att i förväg ha god kännedom om mängd och materialegenskaper på de massor som kommer genereras i byggskedet. Det är också viktigt att ha kännedom om bergets egenskaper för att kunna planera drivning av tunnlar och bergskärningar så att rätt utrustning och personal används, för att minimera risken för skador, förseningar och kostnadsökningar.

Grundvattenförhållanden är också en central fråga för bergentreprenader, eftersom grundvatteninläckage ofta har en stor och i en del fall dominerande inverkan för bergbyggandsprojekt.

Byggnads- respektive driftskedet

Målet med en bergtäkt är att fragmentera berget. Det är mycket billigare att göra detta med sprängmedel än med krossar, så det vore en fördel att kunna prediktera eller bättre styra över det så kallade styckefallet. Genom att på förhand veta var sprickor eller svaghetszoner finns kan man undvika att skjuta längs med sprickorna eller anpassa tändplanen efter sprickorna för bättre styckefall och mindre risk för stenkast vid sprängning. Detsamma gäller entreprenadberg med tanke på att hantering och användning av massorna som resurs ska bli så effektiv som möjligt.

I driftskedet för täkter är det vidare intressant att kunna undvika "slag", alltså ofördelaktigt orienterade svaghetsstrukturer som kan göra att pallväggen inte blir vertikal efter sprängningen. Detta kan uppstå utan att det egentligen är någon skillnad i bergkvalitet, det räcker med sprickor, och även här vore "röntgensyn" i form av adekvata förundersökningar användbart. Bergets uppsprickningsgrad påverkar risken för kast vid sprängningen, som kan skada personal och utrustning, där även slagen kan påverka risken för kast. Många grävmaskiner har förstörts av nedrasande berg nattetid eller helgtid, och på motsvarande sätt finns risk för skador på manskap och maskiner vid bergentreprenader. Bättre riskbedömningar för detta vore värdefullt.

En uppskattning av den volym jord som täcker berget är viktigt vid bergarbeten för att undvika problem vid tunnelbyggen och för att kunna planera masshanteringen i jord- och bergskärningar. I fallet täkter är det viktigt för anpassning av brytplanen eftersom stora jordvolymer är tidsödande och dyrt att avlägsna, och kan leda till svårigheter med deponering. Om man inte gjort en tillräckligt detaljerad kartläggning av jorddjupets variation innan täkten öppnades, eller beslut om expansion togs, kan det göras som en del i underlaget för anpassning av brytplanen.

Variationer i bergets kvalitet samt förekomst av grundvattenförande zoner kan också ha stor inverkan i driftskedet för berganläggningar och bergskärningar. Det är oftast i samband med sprick- och krosszoner, vittrade samt grundvattenförande zoner som det uppstår ras och problem orsakade av vatteninläckage.

State-of-the art

Förundersökningsmetoder

Man förlitar sig ofta på borrhning och sondering som förundersökningsmetod för bergskärningar och tunnlar, samt för expansion av befintliga eller anläggande av nya bergtäkter. Det ger detaljerad information i borrhningarna men ingen information mellan dessa. Eftersom man endast gör ett fåtal borrhningar riskerar man missa zoner med avvikande jorddjup eller bergkvalitet, vilket kan få stora ekonomiska och miljömässiga konsekvenser. Geofysiska undersökningar kan ge yt- och volymstäckande information, men resultaten är behäftade med osäkerheter och upplösning som minskar med ökade djup vid ytbaserad undersökning. En smart kombination av geofysik och borrhning kan kraftigt minska eller helt eliminera risken för allvarliga felbedömningar och optimera förundersökningens samlade värde.

Elektrisk Resistivitetstomografi (ERT) har etablerats som en effektiv metod för kartering av jorddjup och variation av bergkvalitet i förundersökningar för undermarksbyggande. Hallandsåstunneln är ett exempel där ERT gav mycket värdefull information om variation i bergkvalitet och användes som ett operativt verktyg i såväl planerings- som byggfas efter omstarten av tunnelprojektet (Danielsen & Dahlin 2009). Vid ERT mäts markens specifika elektriska motstånd (resistivitet), medan en utvidgad version av ERT inkluderar mätning av markens uppladdningsförmåga (även kallat IP = Inducerad Polarisation). ERT kombinerat med IP kallas även DCIP (Direct Current resistivity and time-domain Induced Polarisation). DCIP mäter frekvensberoende elektriska egenskaper i marken, vilka är beroende kornstorleksfördelning och kopplar till hydrauliska egenskaper (Binley et al. 2005; Maurya et al. 2018).

Seismik är en etablerad metod för bergundersökningar. Med refraktionsseismik bestäms fördelningen av tryckvågshastighet i marken (P-våg) och ytvågsseismik kan användas för bestämning av skjuvvågshastigheter. Det har visats att det finns samband mellan seismisk tryckvågshastighet och Q-värden (Barton 2006), index för hårdhet (Khandelwal & Ranjith 2010) samt RQD (Sjögren et al. 1979). Sharma & Singh (2008) har visat på stark korrelation mellan tryckvågshastighet och hållfasthet för de sju olika typer berg de testade. Det har ännu inte visats vetenskapligt att det finns motsvarande samband med LA-värde.

Georadar (GPR = Ground Penetrating Radar) har använts för kartläggning av spricksystem, svaghetszoner och förkastningar i bergtäkter. Arosio et al. (2012) har påvisat hur svaghetszons kartläggningar i tidiga skeden kan minska produktionskostnader för bergtäkter. Även karakterisering av sprickdimensioner och ifyllnad med hjälp av GPR har rapporterats,

t.ex. (Grégoire & Hollender 2004). I de fall jordtäckningen inte består av högkonduktiva jordarter, kan GPR också användas för att bedöma jordlagrens mäktighet.

EM (induktiva ElektroMagnetiska) och mätningar av magnetfältet kan användas för att detektera zoner med olika ledningsförmåga och magnetisk susceptibilitet. Ett typexempel på magnetometrins tillämpning är lokalisering av diabasgångar, medan EM-metoder som t.ex. VLF standardmässigt används i hydrogeologiska sammanhang.

Bergtäkter

Få litteraturreferenser har återfunnits för geofysik i samband med täkter. O'Driscoll et al (2013) använde en kombination av refraktionsseismik, ytvågsseismik och ERT för kartläggning av en glacifluvial sand-grusavlagring. Integrerad tolkning av data gjorde att de kunde kartlägga siltinnehåll, kornstorleksfördelning och lerlinser vilket inte var möjligt om varje metod tolkades separat. Magnusson et al. (2010) visade att ERT kan vara effektivt för kartläggning av sprickfrekvens, större sprickzoner och variationer i bergmassans kvalitet, vilka kan påverka kvaliteten på bergmaterialet. Jonsson et al. (2018) visar att variationer i lerinnehåll, porositet och vatteninnehåll kan detekteras med både ERT och IP. Nwachukwu et al (2017) använde resistivitet för jorddjupskartering och beräkning av den totala brytbara bergvolymen. Fechner et al. (2004) använde markradar för att kartlägga variation i kvalitet på kalksten m.h.a. korrelationer med kemiska, mineralogiska, petrofysiska och spektrala dielektriska egenskaper.

Integrerad tolkning av olika typer av data

Alla undersökningsmetoder är förenade med osäkerheter i resultaten. Borrning kan ge hög upplösning i borrhålen men ger ingen information mellan borrhålen, vilket kan leda till att man missar kritiska zoner. För geofysiska metoder ökar osäkerheten generellt med ökande djup, och upplösningen minskar, vidare är de parametrar som bestäms bara indirekt kopplade till bergkvalitet eller hydrauliska egenskaper. Genom att kombinera olika metoder med olika styrkor och begränsningar, och låta dessa samverka i en integrerad tolkningsprocess, kan man skapa en bättre helhetsinformation, och därmed reducera osäkerheten i prognoserna.

Integrerad tolkning av olika typer av data kan göras med kopplad inversmodellering (inversion), s.k. "joint inversion" (Jordi et al 2019; Ronczka et al 2018). Det ger modeller där geofysiska och geologiska data överensstämmer i högre grad, och underlättar felanalysen och tolkningen. Exempelvis kan DCIP och seismik stödja varandra (Ronczka et al. 2018) liksom DCIP och GPR (Doetsch et al. 2012).

I de fall information från borrhål finns kan denna integreras i modelleringen, och mätningar kan också göras i själva borrhålen och integreras i inversionen (Doetsch et al. 2010). Geologisk och hydrogeologisk information ger också förbättrade möjligheter till en integrerad tolkning av olika typer av data och förbättrar därmed prognosens kvalitet.

B. Syfte

Det övergripande målet är att utveckla systematisk metodik för framtagande och hantering av geoinformation som beslutsunderlag för bergentreprenader i samband med tunnlar och bergskärningar, samt för anläggande av nya eller expansion av befintliga bergtäkter.

Ändamålet är ekonomiskt, miljö- och klimatomfattigt hållbar entreprenad- och bergtäktsverksamhet. Detta skall ske genom att utveckla metodik för tredimensionell (3D) kartläggning av bergkvalitetsparametrar och grundvatten-hydrauliska parametrar, med integrerad tolkning av geofysiska data i kombination med borrhning, hydrauliska och mekaniska tester som verktyg för att skapa sådana modeller. För att detta ska bli möjligt måste dock den geofysiska metodiken och metoderna anpassas för de förutsättningar som gäller för entreprenader och bergmaterialindustri, vilket är syftet med detta projekt.

Specifika syften med projektet är ta fram metodik och metoder för tredimensionell (3D) kartläggning av variation i:

- Jorddjup och indikation på materialtyp i jordlagren.
- Bergartstyp och bergartsstrukturer inklusive gångbergarter.
- Bergkvalitet (bergtyp, sprickfrekvens, sprick-krosszoner, vittring, mekaniska egenskaper).
- Grundvattenhydrauliskt signifikanta strukturer.

Fokus kommer att ligga på kombination av data från olika metoder, samt anpassning och utveckling av metodik och vissa metoder inom ramen för de logistiska förutsättningarna i samband med bergentreprenader och bergtäkter. Snabba geofysiska metoder för översiktlig skanning, av t.ex. variation i jorddjup och -sammansättning, såsom GPR (markradar) och EM (induktiva ElektroMagnetiska) metoder ingår. Vidare skanning med magnetiska mätningar för identifiering av bergenheter med avvikande och potentiellt olämpliga egenskaper. I nästa steg används mer högupplösande metoder, där tomografiska mätningar med DCIP och seismik med P-, S- och ytvågor kommer vara nyckelmetoder. Utgående från det andra steget lokaliseras borrhållpunkter. Borrhning görs med MWD (Measurement While Drilling) med efterföljande borrhållloggning, samt elektrisk och seismisk borrhållstomografi. Värdet av borrhningarna och brunnarna ökar genom att de placeras på optimerade positioner m.h.a. de geofysiska modellerna, genom att man eliminerar risken att missa kritiska zoner med t.ex. avvikande jorddjup eller bergkvalitet. Borrhållen kan användas för hydrauliska tester, och slutligen för grundvattennivåövervakning, vars relevans dock är beroende av att de är placerade på ett representativt sätt.

Metodik och metoder kommer att testas och demonstreras i fullskaletester vid befintliga eller planerade bergtäkter, och bergskärningar i anslutning till infrastrukturprojekt. Tillgång till referensdata från kärnborrhning, MWD i samband med produktionen, drönarfotograferingar, laserskanningar, standardiserade provningar av mekaniska egenskaper, relevanta för ballastprodukter, etc. är väsentliga vid val av testplatser.

Vidare ingår i projektet att utvärdera kostnad och nytta för olika metoder, inklusive geofysik och borrhning, liksom uppskattning av kostnaden för olika scenarier av felbedömning av djup till berg och dålig bergkvalitet.

I ett senare steg skulle de geofysiska 3D modellerna tillsammans med övriga relevanta data kunna ligga till grund för att skapa 3D modeller av bergkvalitetsparametrar (t.ex. sprickfrekvens, vittringsgrad, LA-värden, kulkvarnsvärden, glimmerhalt) och grundvattenhydrauliska parametrar, förslagsvis med hjälp av maskininläring. Genom att integrera 3D modellerna i ett digitalt informationssystem för bergtäkten skulle de kunna användas som ett operativt verktyg i effektiv planering och drift av denna. På samma sätt kan man integrera modellerna i t.ex. GeoBIM för transportinfrastrukturprojekt. Om man fortlöpande för in data från driften i systemet tillförs information som kan användas för att ytterligare kalibrera och uppdatera modellerna inklusive osäkerhetsmått. Detta ryms dock inte inom ramen för detta projekt utan behöver ske i uppföljningsprojekt som delvis kan löpa parallellt med detta.

Forskningsfrågor:

- Vilken noggrannhet i bestämning av djup till berg kan man uppnå med enskilda metoder var för sig, respektive kombinerad tolkning av alla testade metoder?
- Hur väl och med vilken upplösning kan variation i bergartstyp och bergartsstrukturer karaktäriseras i 3D från geofysiska data?
- Hur väl kan bergkvalitetsparametrar (RQD, Q-värden, sprickfrekvens och vittringsgrad) predikteras från geofysiska data?
- Kan vibrationer från trafik eller täktverksamhet användas som signalkälla för seismisk tomografi (s.k. passiv seismik)? Kan vibrationer från borrningen av undersökningshål resp. hål för sprängmedel användas som signalkälla för seismisk tomografi?
- Går det att finna samband mellan geofysiska egenskaper och kvalitetvärden som används i bergmaterialindustrin (t.ex. kulkvarns- och LA-värden)?

Förväntade resultat och effekter

Bättre metodik och metoder för förundersökning väntas ge bättre beslutsunderlag för planering av masshantering i samband med bergskärningar och undermarksbyggande, samt för öppnande av nya eller expansion av befintliga bergtäkter. Det minskar risken för felbedömningar som kan leda till extrakostnader, ekonomiskt ofördelaktiga investeringar och reducerar risken för oförutsedda miljöstörningar och förseningar. Bergmaterial är som tidigare nämnts en förutsättning för samhällsbygget, och värdet av det årligen använda materialet (vid leverans) från bergmaterialindustrin är ca 9 miljarder. Dock är bergmaterialets kostnad per ton låg, redan efter en kort sträcka överskrider transportkostnaderna brytningskostnaderna. Det är därför viktigt att täkterna finns så nära användningsområdena som möjligt, men de konflikter som uppstår i tätbebyggda områden (där användningen oftast sker) måste kunna hanteras. På motsvarande sätt kan överskottmassor från entreprenadarbeten endast nyttiggöras inom ett relativt begränsat geografiskt område, och även i det sammanhanget kan det uppstå konflikter p.g.a. transporter, buller, etc. som måste förebyggas i möjligaste mån.

Bättre prognoser av jorddjup och bergkvalitetsfördelning som underlag gör att man kan förlägga tunnlar och infrastruktur som kräver djupa skärningar i olämpliga lägen, samt undvika placering eller expansion av bergtäkter som är ofördelaktiga med avseende på jordtäckte eller bergkvalitet. Därigenom sparar man arbete och resurser, reducerar intrång i miljön, reducerar buller, etc., vilket leder till mera ekonomiskt byggmaterial med mindre miljöbelastning och energi-förbrukning för framställningen, som är ett viktigt led i bergmaterialindustrins "Färdplan för fossilfri konkurrenskraft".

Adekvata förundersökningar förväntas kunna ge en bättre prognos för risk för kast vid sprängning, och en bättre stabilitetsprognos inför skrotningen. Likaså reducera risken för ras som kan orsaka allvarliga skador i driftskedet för infrastruktur.

Integrering av digitala bergkvalitetsmodeller i brytningsprocessen skulle göra det lättare att styra produktionen och optimera kvalitet beroende på tillgänglig råvara och kundkrav. Genom att etablera en digital datahanteringsprocess skulle man kunna åstadkomma en kontinuerlig återkoppling av data från driften, som kunde användas för fortlöpande kalibrering och uppdatering av modellerna med maskininlärning så att de successivt blir mera tillförlitliga. För transportinfrastruktur är digitala bergkvalitetsmodeller (inlagda i t.ex. GeoBIM eller motsvarande) värdefulla för förvaltning och underhåll, så att man kan ha extra uppmärksamhet på partier med avvikande bergkvalitet där problemen ofta uppstår.

Förutom att resultaten från detta projekt är fullt ut applicerbara på överskottsmassor från bergskärningar i väg- och järnvägsprojekt, s.k. entreprenadberg, kommer resultaten i hög grad vara tillämpbara för förundersökning för underjordisk infrastruktur, såsom tunnlar och bergrum.

C. Genomförande

Projektet läggs upp som ett forsknings- och utvecklingsprojekt under totalt 4 år, med seniorforskare, en postdoktor, en utvecklingsingenjör, en deltids- och en heltidsdoktorand. Följande ingår i genomförandet:

- Framtagning av metodik för optimerad användning av kombinerade metoder.
- Anpassning och utveckling av yt- och borrhålsbaserad mätningar med geofysiska fältmetoder, för tidseffektiv, robust och kvalitetssäkrad datainsamling inklusive positionering av sensorer.
- Integrerad inversmodellering av olika typer av geofysiska data kombinerat med borrhålsinformation, för skapande av kvalitetssäkrade geofysiska modeller inklusive osäkerhetsbestämningar. Genom integrerad tolkning kan osäkerheterna i modellerna reduceras.
- Test av metodik och metoder ska utföras i täkter i olika driftskeden som väljs ut i samråd med referensgruppen och täktägarna, där tillgänglighet och tillgång till referensinformation som kan offentliggöras är viktiga faktorer. Bergskärningar i samband med infrastrukturprojekt väljs ut i samråd med Trafikverket och entreprenörer.

Arbetet delas upp i följande arbetspaket (WP = Work Packages) enligt nedan.

WP1. Utveckling och anpassning av metodik

Utveckling och beskrivning av en rekommenderad metodik baserad på branschens behov med en kombination av arkivstudier, fältrekognosering inklusive drönare, design av undersökningspaket, ytgeofysiska mätningar, databearbetning och tolkning. Baserat på design av borrhålsplan inkl. val av borrhålsmetoder, därefter provtagning och analys/ labtester av prover, geofysisk mätning i borrhål samt integrerad tolkning av alla data.

Leverans: Rekommenderad förundersökningsmetodik för tillämpningen.

WP2. Anpassning av ytgeofysik

Anpassning och optimering av mätutrustning, mätkonfigurationer, databearbetning, för tids- och kostnadseffektiv, samt kvalitetssäkrad, yttäckande geofysisk kartering med hjälp av ytbaserade mätningar. Syftet är att kunna kartlägga djup till berg, materialfördelning i jordlagren, variation i bergartstyp, förekomst av sprick-, kross- och vittringszoner, med tanke på bergets tekniska egenskaper som råvara för ballast samt för identifiering av grundvattenhydrauliskt viktiga zoner.

Fokus kommer huvudsakligen ligga på DCIP och seismisk tomografi, det senare med fokus på refraktions- och ytvågsseismik, för att göra det möjligt att koppla geofysiska signaturer till tekniska egenskaper såsom kornstorleksfördelning i jordlager, sprickfrekvens och vittringsgrad i berg, mekaniska egenskaper samt hydrauliska egenskaper. Vidare kommer skanning med yttäckande metoder såsom GPR (markradar) och eventuellt EM (induktiva ElektroMagnetiska) metoder att ingå för ökad yttäckning där så är lämpligt, beroende på bl.a. geologi och mätlogistik. Vidare magnetometri som stöd för lokalisering av avvikande bergenheter, t.ex. diabasgångar.

Test och utvärdering av metoderna kommer att ske med hjälp av numeriska simuleringar och mät försök i anslutning till utvalda bergtäkter och infrastrukturprojekt.

Leverans: Optimerad metod/process för ytgeofysisk kartering.

WP3. Anpassning av borrhålsgeofysik

Anpassning, utveckling och optimering av mätutrustning, mätkonfigurationer och databearbetning för borrhålstomografi med syfte att ge bättre upplösning på större djup där helt ytbaserad mätning är otillräcklig.

Fokus kommer huvudsakligen ligga på DCIP och seismik, eftersom syftet är att kunna koppla de geofysiska egenskaperna till tekniska dito, med mätning i enskilda borrhål och med mellanhålstomografi. Borrhål för sprängning nyttjas för detta med efterföljande dokumentation och provtagning av material från den utsprängda salvan. Praktiska frågeställningar inkluderar:

- hur man på ett rationellt sätt kan etablera galvanisk respektive mekanisk kontakt mellan elektroder och sensorer och borrhålsvägg
- vilken typ av signalkällor som lämpar sig bäst för seismik (aktiva och passiva mätningar och

kombinationer, hammarborrning som signalkälla, etc.)

- vilka mätgeometrier och mätsekvenser som är optimala för respektive metod.

Leverans: Optimerad metod/process för borrhålsgeofysiska undersökningar.

WP4. Utveckling och anpassning av mätutrustning och programvara

Snabb mångkanalmätning av DCIP, med optimering av mätkonfigurationer och -sekvenser, med automatiserad datakvalitetsutvärdering och signalbehandling-filtrering av data i en tids- och kostnadseffektiv process, med syfte att göra metoden ekonomiskt attraktiv. Kombinerad mätning med aktiv och passiv seismik, för att uppnå bästa möjliga upplösning och djurnedträngning.

Rationell positioneringsteknik och integration av koordinater med inmätning av sensorerna med tillräcklig precision i data är nödvändigt för att resulterande data och modeller ska kunna kopplas ihop med varandra och relateras till täktverksamheten på ett meningsfullt sätt. I dagsläget kräver detta generellt betydande manuellt arbete vilket också ger upphov till felkällor.

Leverans: Prototyputrustning och -programvara för tids- och kostnadseffektiv DCIP-seismik.

WP5. Integrerad inversmodellering och tolkning

Utveckling och anpassning av integrerad inversmodellering som kombinerar DCIP, refraktions- och ytvågsseismik, och GPR med syfte att minska osäkerheterna i modellerna, samt kvantifiera dessa. Vidare kombination av information från borrhålskartering, geofysisk borrhålsloggning och borrhålstomografi. Kombination av olika typer av data ska ske med kopplad inversion (joint inversion) med geostatistisk strukturell styrning av inversionen där a priori-information från borrhålsdata och annan relevant information kan integreras. Arbete utförs i programbiblioteket pyGIMLi med öppen källkod. Syftet är också att testa och utvärdera möjligheterna att:

- Översiktligt bedöma jordartstyp.
- Bedöma uppspricknings- och vittringsgrad samt hydrauliska viktiga zoner i berget.
- Kvantifiera bergmekaniska egenskaper.

Leverans: Programvara/algoritmer för integrerad inversmodellering av olika typer av data med strukturell styrning och osäkerhetskvantifiering.

WP6. Test och demonstration av metodik

Test och demonstration av metodik och metoder görs i anslutning till utvalda bergtäkter. I tidiga skeden av projektet kommer det huvudsakligen att göras mera avgränsade fälttester för att testa, utvärdera och verifiera utvecklade metodikkoncept och metoder. I senare skeden kommer fullskalig demonstration utföras.

Leverans: Dokumenterade testresultat och verifiering av metodik och metoder.

WP7. Dokumentation av geologi och bergkvalitet

Dokumentation av geologi och bergkvalitet görs ur ett bergmaterialperspektiv för de testområden / bergtäkter / bergskärningar som valts ut för test och demonstration.

Dokumentationen görs genom:

- Arkivdata i form av geologisk kartering, borrhningar, sjunkhastighet, etc.
- Högupplösande fotodokumentation (fotomosaiker från robotiserad fotografering), drönarfotografering och laserskanning av bergvägg före och efter utsprängning.
- Bergkvalitetsklassning (RQD, Q-värden, sprickfrekvens) före utsprängning.
- Bestämning av petrografiska och mekaniska parametrar på prover efter utsprängning. Provberegningsprocedur följer den som RISE/SGU utvecklat.

Leverans: Dokumentation av geologi och bergkvalitet för testlokalerna.

WP8. Sammanställning och utvärdering av resultat

Sammanställning och utvärdering av resultaten görs genom inläggning i databaser och analys m.h.a. GIS och statistiska analyser. I detta ingår analys av möjliga samband mellan geofysiska modellparametrar vs RQD, Q-värde, sprickfrekvens, vittringsgrad, kulkvarns-, LA-värden, vidare kornstorleksfördelning i jordlager.

Utvärdering av kostnad och nytta för olika metoder, samt uppskattning av kostnaden för olika scenarier av felbedömning av djup till berg och dålig bergkvalitet.

Leverans: Utvärdering av resultaten och dess värde. Genererade resultat arkiverade i databaser.

WP9. Rapportering och informationsspridning

Resultaten kommer presenteras i tekniska rapporter, vetenskapliga artiklar, på vetenskapliga konferenser samt artiklar i branschtidningar. Resultat från fältförsök kan komma att avidentifieras innan publicering, om det är nödvändigt med hänsyn till kommersiella intressen. Informationsspridning kommer vidare ske genom presentation på branschmöten och seminarier (exempelvis Grundläggningdagen, Bergdagarna, SBMIs branschdagar eller Trafikverkets FOI-dagar), samt på en projekthemsida.

Leverans: Rapporter, konferensbidrag, artiklar, avhandlingar, seminarier och projekthemsida.

D. Tidplan

Projektet löper över 4 år i enligt nedanstående tidplan med milstolpar markerade. Doktoranddelen är uppdelad i två steg, men licentiatexamen i slutet av andra året och doktorsexamen i slutet av det fjärde.

Integrerad förundersökning för planering och drift av bergtäckter

Aktivitet	2020		2021				2022				2023				2024	
	Kv 3	Kv 4	Kv 1	Kv 2	Kv 3	Kv 4	Kv 1	Kv 2	Kv 3	Kv 4	Kv 1	Kv 2	Kv 3	Kv 4	Kv 1	Kv 2
WP1 Utveckling och anpassning av metodik					K					U						S
WP2 Anpassning av ytgeofysik				L		S										
WP3 Anpassning av borrhålsgeofysik						L		S								
WP4 Utveckl. o. anpassn. mätutr. o. -program						P				S						
WP5 Integrerad inversmodellering och tolkning						P				U						S
WP6 Test och demonstration av metodik																
WP7 Dokumentation av geologi och bergkvalitet			D			D					D					S
WP8 Sammanställning o. utvärdering av resultat					D		D					D				S
WP9 Rapportering och informationsspridning			W, K		K, A		A, Se	Lic, R			K, A		K, A		A, Se	Dr, R

L=lägesrapport, D=datarapport, K=koncept, U=uppdatering, S=slutversion, P=prototyp, K=konferensbidrag, A=Artikel, W=websida, Se=seminarium, R=rapport, Lic=licentiatexamen, Dr=doktorsexamen.

E. Organisation

Aktiva parter

Nedanstående tabell visar alla som är aktiva i projektet

	Namn	Roll/aktivitet	Insats[%]*
Professor geofysik-ingenjörsgologi	Torleif Dahlin ¹	Projektledare, handledare	40
Ingenjörsgolog, hydrogeolog	Alfredo Mendoza ¹	Projektkoordinator, handledare: Geol.-hydrogeol. karaktärisering	60
Geofysiker-seismik, joint inversion	Roger Wisén ¹	Forskare, handledare: Anpassn. & utv. av fältmetodik, inversion	40
Geofysiker-GPR, seismik	Matteo Rossi ¹	Forskare, utvecklare: Anpassn. & utv. GPR & databearb. seismik	32
Geofysiker-DCIP-signalbeh., GIS-datab.	Per-Ivar Olsson ¹	Postdoc, utvecklare: Databearb., GIS-databaser, visualisering	72
Geofysiker-mätningenjör	Peter Jonsson ¹	Forskare, utvecklare: Utv. metodik, systemintegration	32
Utvecklingsingenjör	Per Hedblom ¹	Utvecklare: Anpassn. & utv. mätutrustn. o -programvara	100
Geolog	Joakim Robygd ¹	Doktorand: Geol. karakt., geofys. sign. vs. bergkval., GIS - databaser	100
Geofysiker	Ny Doktorand ¹	Doktorand: Geofysisk data-insamling & joint inversion	400
Geofysiker-programutveckl.	Thomas Günther ²	Forskare, utvecklare: Geostatist. constrained & joint inversion	40
Bergmaterial-mekaniker	Monica Almefeldt ³	Expert bergmaterial: Planering, styrning, utvärdering	14
Geolog, bergmaterial	Mattias Göransson ⁴	Fältmetodik, handledning: Geol. kartering, bergmtrlkaraktärisering	12
Geolog och seniorforskare	Björn Schouenborg ⁵	Fältmetodik, labprovning: Bergmtrl.karakt., datatolkning	4

* Arbetsinsats i % av årsarbetstid under projektiden

¹ Teknisk geologi, LTH / LU, ² LIAG (Leibnitz Institute of Applied Geophysics), Hannover

³ Swerock AB, ⁴ Sveriges geologiska undersökning (SGU), ⁵ RISE

Styrgrupp

Monica Almefelt Soldinger
Torleif Dahlin
Alfredo Mendoza

Referensgrupp

Helena Tellberg, Swerock AB
Sven Wallman, NCC AB
Lars Stenlid, Skanska AB
Mårten Sohlman, SBMI
Lena Persson, SGU
Urban Åkeson, Trafikverket

Jämställdhets-, genus- och mångfaldsaspekter

Såväl styrgruppen som referensgruppen har en hyggligt jämn könsfördelning med 1/3 kvinnor och 2/3 män. De aktiva projektgruppen är däremot kraftigt mansdominerad, i huvudsak beroende på att Teknisk geologi LTH trots ansträngningar att rekrytera kvinnliga forskare, lärare och doktorander fortfarande har kraftig snedfördelning. Detta kommer beaktas vid rekrytering av den nya doktoranden.

Beträffande mångfaldsaspekterna så är alla vid de svenska projektparterna av svenskt ursprung förutom en från Italien och en från Latinamerika.

F. Redovisning

Alla mätdata som samlas in i projektet arkiveras på ett systematiskt sätt tillsammans med fältanteckningar, fotodokumentation, etc. på Teknisk geologis dataserver "Massadata" som har inbyggd RAID-backup och extern backup. Efter bearbetning, kvalitetskontroll, etc., samt efter att resultaten har publicerats vetenskapligt, kommer data göras offentligt tillgängliga för forskarvärlden. Resultaten kommer också levereras till täktägaren i lämpligt digitalt format enligt överenskommelse.

Information om projektresultat kommer ske i enlighet med "WP9 Rapportering och informations-spridning" under "C. Genomförande", där rapportering till respektive finansör i enlighet med deras anvisningar ingår. Förutom Trafikverket och bergmaterialindustrin kommer konsultbranschen vara en viktig målgrupp för informations-spridningen, eftersom det förväntas vara konsulter som i många fall erbjuder den typ av undersökningar som är aktuella här.

G. Kostnader

Budgeten nedan avser finansiering av hela projektet inklusive en seniorforskare, postdoktor, utvecklare, en heltidsdoktorand och en doktorand på deltid, enligt specifikation i Bilaga 1.

Kostnader [kr]	År 2020	År 2021	År 2022-24	Totalt
Personalkostnader	1 005 166	1 723 141	4 164 258	6 892 565
Utrustning mark byggnader	142 795	244 792	591 579	979 166
Kostnader för konsulter, licenser etc	54 833	94 000	227 167	376 000
Övriga direkta kostnader inkl. resor	203 412	348 707	795 508	1 347 627
Indirekta kostnader	552 208	946 643	2 287 721	3 786 572
Totalt	1 958 415	3 357 283	8 066 233	13 381 930

H. Finansiering

Finansiering söks från Formas och SBUF parallellt med denna ansökan. Övriga kostnader täcks av LTH, Swerock, NCC, SGU och RISE som egenfinansiering. SBUF har beviljat sin del av finansieringen för 2 år hittills.

Finansiering[kr]	År 2020	År 2021	År 2022-24	Totalt
Formas	583 333	1 000 000	2 416 667	4 000 000
Trafikverket	612 500	1 050 000	2 537 500	4 200 000
SBUF	525 000	900 000	2 175 000	3 600 000
Egenfinansiering Swerock	44 625	76 500	202 675	323 800
Egenfinansiering NCC	18 958	32 500	13 542	65 000
Egenfinansiering LU	155 823	267 125	645 552	1 068 500
Egenfinansiering SGU	16 545	28 363	68 543	113 450
Egenfinansiering RISE	1 630	2 795	6 755	11 180
Totalt	1 958 415	3 357 283	8 066 233	13 381 930

I. Riskanalys

Exempel på identifierade risker och hur de hanteras följer.

En risk relaterad till budgeten är om alla finansiärer inte godkänner de inlämnade ansökningarna, vilket leder till förskjutningar i tidplanen genom försenad projektstart. För SBUF förväntas det vara relativt lätt att hantera eftersom handläggningen är snabb och det finns möjlighet att söka medel flera gånger per år. Eftersom projektförslaget har uppbackning från flera entreprenörer, varav två är medsökande, handlar det förmodligen om att lämna in en kompletterad och förtydligad projektbeskrivning vid nästa ansökningstillfälle. Ifall Formas inte beviljar ansökan finns det risk för längre fördröjning eftersom de har längre handläggningstid och glesare mellan utlysningarna, å andra sidan ökar möjligheten att få finansiering från kommande utlysningar som Smart Built Environment/Formas eller InfraSweden2030/Vinnova om projektet redan har beviljad medfinansiering från Trafikverket och SBUF.

Kompetensrelaterade risker genom att nyckelpersoner i projektgruppen lämnar projektet förebyggs genom att sörja för en god arbetsmiljö och proaktiv personalpolitik. De seniora forskarna i projektgruppen har varit knutna så länge till LTH att de inte torde vara benägna att byta bransch. De relativt sett yngre forskarna som ingår har gjort ett aktivt val att söka sig till akademien efter att ha varit verksamma i konsultbranschen, och de är starkt motiverade att verka på LTH. Utvecklingsingenjören är en kritisk resurs som vi är beroende av särskild finansiering för att kunna behålla, vilket är en riskfaktor i händelse av större förseningar av projektstarten. Vi kommer därför söka separat kompletterande finansiering från LTH/LU för att säkra upp detta under våren. En annan tänkbar risk är svårigheter att rekrytera en ny doktorand med rätt kompetens inom landet som följd av stor efterfrågan på arbetsmarknaden. Av praktiska skäl vore det att föredra om vi kan rekrytera en doktorand som talar svenska eller skandinaviska, och vi kommer därför rekrytera aktivt inom våra kontaktnät. Om det inte lyckas blir det nödvändigt att rekrytera en icke svenskspråkig kandidat, med tydliga förväntningar på och en plan för att lära sig svenska.

En risk relaterad till forskningsprocessen skulle kunna vara svårigheter att hitta lämpliga testlokaler som är tillgängliga för testmätning, och där det finns tillgång till eller möjlighet att ta fram relevanta referensdata. Detta hanteras genom diskussioner med täktägarna och referensgruppen, där den breda förankringen hos entreprenörerna och Trafikverket gör att det bör kunna lösas.

Risker relaterade till nyttiggörande och intressenter hanteras genom den breda förankringen i projekt- och referensgruppen, och informationskanaler det ger tillgång till. En grupp som dock inte är representerad är konsultföretagen, vilka i praktiken i de flesta fall torde bli utförare av utvecklad metodik och metoder. Detta hanteras förutom i publikationer via information på branschdagar, seminarier, etc., som det erfarenhetsmässigt är förhållandevis lätt att attrahera konsulter till. Vidare har projektgruppen ett omfattande kontaktnät inom konsultbranschen via tidigare anställningar och samarbeten.

En avtalsrelaterad risk skulle kunna uppstå kring otydlighet kring möjligheterna att sprida forskningsresultat p.g.a. att en täktägare anser att det är kommersiellt känslig information. Detta hanteras med tydlighet i diskussioner och avtal i samband med val av testobjekt, för att undvika att tid och resurser i onödan läggs på sådant som inte kan redovisas offentligt. Motsvarande gäller testobjekt i samband med bergskärningar, så att en embargo-period rörande informations-spridning i samband med en upphandlingsprocess inte kommer att hindra framdrift i projektet.

Risker relaterade till forskningsinfrastruktur, utöver testlokalerna som har diskuterats ovan, inkluderar bl.a. tillgång till moderna och tillförlitliga mätinstrument. Teknisk geologi på LTH har egna state-of-the-art mätinstrument för ERT/DCIP och seismik med omfattande uppsättningar mätkablar, geofoner, etc. Vidare finns moderna system för georadar, magnetisk gradiometri och geofysisk borrhålsloggning. För inmätning och utsättning finns det ett toppmodernt GNSS-system och en robotiserad totalstation, och för högupplösande panoramafotografering en robotiserad kamerautrustning. På andra institutioner inom Lunds universitet finns drönare som kan förses med kameror, laserskannare och andra sensorer, vilket projektgruppen har tillgång till via det så kallade Samverkansinitiativet.

Beträffande resurser för databearbetning, -tolkning och visualisering kommer vi arbeta med programbiblioteket pyGIMLi, med öppen källkod i Python, som centralt verktyg. En kritisk resurs i samband med det är samarbetsparten LIAG som vi av erfarenhet vet kan vara en trång sektor periodvis. Genom omfattande tidigare samarbete känner vi nyckelpersonerna väl, och har därmed bra digitala kommunikationsvägar vilka ska kompletteras med perioder med arbete tillsammans i båda ändarna. Vi har tillgång till fulla licenser för generella beräknings och modelleringsprogramvaror som t.ex. Matlab och Comsol, som kompletterar Python och pyGIMLi. Vidare finns licenser för specialiserade tolkningsprogram för ERT/DCIP samt seismik som komplement till och referens för egenutvecklade algoritmer. Förutom egna beräkningsservrar har vi tillgång till kraftfulla beräkningsresurser hos LUNARC (Center for Scientific and Technical Computing at Lund University) och SNIC (Swedish National Infrastructure for Computing).

Bilaga 1: Budgetspecifikation

Specifikation av budgeterade timkostnader för personal vid LTH.

Kategori	Timkostn exkl OH	Timkostn inkl OH	Omfattning*
Professor	730	1 080	40%
Seniora forskare / utvecklare	558	826	232%
Yngre forskare	451	667	32%
Postdoktor	442	655	72%
Adjunkt/doktorand	379	561	100%
Doktorand	316	468	400%
Genomsnitt / totalt	420	622	876%

* Arbetsinsats i % av årsarbetstid under hela projektiden (licentiat + doktorsexamen för ny doktorand).

Specifikation av kostnader för resor, fältarbete, etc. (exklusive OH). Inkluderar inte kostnader för maskiner, material, etc. för entreprenörerna som är inbakat i sista tabellen på nästa sida.

Beskrivning	Kostn/st	Antal	Kostnad
Kostnader fältarbete DCIP	13 724	15	205 861
Kostnader fältarbete DCIP i borrhål	28 724	10	287 241
Kostnader fältarbete seismik	16 427	15	246 401
Kostnader fältarbete seismik i borrhål	26 427	5	132 134
Kostnader fältarbete GPR	7 693	6	46 159
Kostnader fältarbete magnetisk gradiometer /EM	7 355	6	44 132
Deltagande i nationella seminarier, workshops, etc	6 700	8	53 600
Deltagande i konferenser, workshops, etc	19 800	8	158 400
SGUs deltagande i fältarbete	4 200	4.5	18 900
RISEs deltagande i möten och fältarbete	3 200	4	12 800
Totalt exkl. täktägarnas egeninsatser			1 205 627

Specifikation av konsulttjänster, etc. (exklusive OH).

Beskrivning	Kostn/st	Antal	Kostnad	Kommentar
Drönarfotografering	800	120	96 000	3 täkter vid 3 tillfällen à 8 timmar
Bergartsanalyser inkl tunnslip	2 000	15	30 000	3 täkter med 5 prover vardera
Mekaniska analyser	10 000	15	150 000	3 täkter med 5 prover vardera
Jordanalyser inkl kornfördelning	1 000	20	20 000	
Open access publicering	10 000	8	80 000	
Summa			376 000	

Integrerad förundersökning för planering och drift av bergtäkter

Specifikation av utrustning och programlicenser (ingen OH tillkommer).

Beskrivning	Kostn/st	Antal	Kostnad
Modiferad / förbättrad instrumenthårdvara			438 366
Elektrodkablar för borrhålsmätning	32 000	2	64 000
Bärbar dator	25 000	1	25 000
Beräkningsdator	85 000	1	85 000
Programlicens resistivitet-IP	21 700	4	86 800
Programlicens seismik	25 000	4	100 000
Programlicens Matlab, Comsol, etc	45 000	4	180 000
Summa			979 166

Kostnaderna för borrhning, materialhantering, logistiksupport, inmätning, kompletterande materialanalyser, etc. i anslutning till fälttester täcks av Swerock respektive NCC, eller annat samarbetspart, genom egeninsatser. En tänkbar fördelning av kostnaderna per undersökt testlokal summeras nedan, medan den reella kommer styras av de verkliga behoven.

Beskrivning	Kostn/st	Antal	Kostnad
Försörjning med el - framdragning och underhåll			5000
Interna transporter o lyft med fordon o lastmaskiner			15000
Borrhning	50	200	10000
Planeringsmöten och sammanställningar	800	10	8000
Provning i lab av material			15000
Inmätning av fronter och dataleverans			12000
Totalt			65000

Referenslista

- Arosio, D., Munda, S. and Zanzi, L. (2012) 'Quality control of stone blocks during quarrying activities', *2012 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Ground Penetrating Radar (GPR), 2012 14th International Conference on*, 822–826.
- Barton N. (2006) *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy*, CRC Press, ISBN 9780415394413, 756p.
- Binley, A., Slater L. D., Fukes M. & Cassiani G. (2005) Relationship between spectral induced polarization and hydraulic properties of saturated and unsaturated sandstone: *Water Resources Research*, **41**, W12417.
- Danielsen, B.E. & Dahlin, T. (2009) Comparison of geoelectrical imaging and tunnel documentation at the Hallandsås Tunnel, Sweden, *Engineering Geology*, **107(3–4)**, 118–129.
- Fechner T., Börner F. D., Richter T., Yaramanci U. & Weihnacht B.(2004) Lithological interpretation of the spectral dielectric properties of limestone, *Near Surface Geophysics*, **3**, 150-159.
- Doetsch, J., Linde, N., Binley, A. (2010) Structural joint inversion of time-lapse crosshole ERT and GPR traveltimes data, *Geophysical Research Letters* 37(24), 6pp.
- Doetsch, J., Linde, N., Pessognelli, M., Green, A.G., Gunther, T. (2012) Constraining 3-D electrical resistance tomography with GPR reflection data for improved aquifer characterization. *Journal of Applied Geophysics*, **78**, 68–76
- Grégoire, C., Hollender F. (2004) Discontinuity characterization by the inversion of the spectral content of ground penetrating radar (GPR) reflections—application of the Jonscher model, *Geophysics*, **69**, 1414-1424,
- Jonsson, P., Johansson, L., Johansson, S., Olsson, P-I., Dahlin, T. (2018) Tredimensionell bergundersökning med geoelektriska och geologiska metoder, Rapport: Stiftelsen Bergteknisk Forskning nr 185, 67p. (*In press*)
- Jordi C., Doetsch J., Günther T., Schmelzbach C., Maurer H. & Robertsson J O A. (2019) Structural joint inversion on irregular meshes, *Geophysical Journal International*, **220(3)**, 1995–2008.
- Khandelwal, M. & Ranjith, P.G. (2010) Correlating index properties of rocks with P-wave measurements, *Journal of Applied Geophysics*, **71**, 1–5.
- Magnusson, M.K., Fernlund, J.M.R. & Dahlin, T. (2010) Geoelectrical imaging in the interpretation of geological conditions affecting quarry operations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **69(3)**, 465–486.
- Maurya, P. K., Balbarini N., Møller I., Rønne V., Christiansen A. V., Bjerg P. L., Auken E. and Fiandaca G. (2018) Subsurface imaging of water electrical conductivity, hydraulic permeability and lithology at contaminated sites by induced polarization, *Geophysical Journal International*, **213**, 770-785.

Nwachukwua M.A., Nwosu L.I., Uzojjea P.A. & Nwoko A. (2017) 1D resistivity inversion technique in the mapping of igneous intrusives; A step to sustainable quarry development, *Journal of Sustainable Mining*, **16**, 127-138.

O'Driscoll R., Stuart G., Tuckwell G. & Sergeant J. (2013) Assessment of aggregate resources: an integrated geophysical approach, *Near Surface Geophysics*, **11**, 671-681.

Ronczka M., Wisén R. and Dahlin T. (2018) Geophysical pre-investigation for a Stockholm tunnel project: Joint inversion and interpretation of geoelectric and seismic refraction data with the Python BERT/GIMLi package, *Near Surface Geophysics*, **16**, 258-268.

Sharma, P.K. & Singh, T.N. (2008) A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **67**, 17-22.

Sjøgren, B., Øfsthus, A. & Sandberg, J. (1979). Seismic classification of rock mass qualities. *Geophysical Prospecting*, **27**, 409-442.