

## **Ballastkvalitet och prospektering efter ballastmaterial**

### **Forskningsprojekt finansierat av Formas och SBUF**

Torleif Dahlin 2013-02-13

Teknisk Geologi, LTH/Lunds Universitet, Box 118, 221 00 Lund

### **Inledning**

Ballastmaterial består av sand och grus och används för flera olika ändamål. Det används som byggnadsmaterial i främst betong, asfalt, vägkroppar, järnvägsbankar och som fyllnadsmaterial. Grovt räknat använder varje svensk 1 ton ballast per år; dvs Sverige producerar ca 9 miljoner ton ballastmaterial per år. Globalt sett är ballastproduktionen tre gånger så stor som produktionen av olja eller av kol. Ballast är en viktig del i praktiskt taget alla typer av byggnadskonstruktioner. För att konstruktionernas livslängd skall bli så lång som möjligt, samt för att underhållsarbetet skall minimeras är det viktigt att rätt typ av ballast används.

Ballastmaterial har tidigare i hög grad erhållits från grusförekomster som bildats under istiden. Efterhand har grusåsarnas betydelse som grundvattentäkter uppmärksammats mera, och bland annat därför får de inte längre exploateras i samma utsträckning som tidigare. Grusproducenter får således numera i regel inte förlängt tillstånd att bryta grus, och som alternativ börjar de i stället bryta berggrunden i närheten av de platser där tidigare täkter varit belägna. Berggrunden är emellertid inte alltid lämplig som grund till ballastmaterial. På vissa ställen har stora mängder restmaterial producerats som inte går att använda som ballast utan i stället får deponeras. Innan en täkt öppnas bör man veta att den kommer producera ballast av hög kvalitet. Metoder behövs för att prospektera efter bergmassa eller moränmassor som, om de exploateras, kommer att producera ballast av hög kvalitet.

Eftersom berget i stor utsträckning är täckt av jordmassor från istiden är det svårt att bestämma bergmassans egenskaper. Borrningar krävs därför för att få fram prover, dock är det svårt att fastställa hela bergmassans egenskaper från några få prover. Risken att missa zoner av oönskat berg med mineralsammansättning som är direkt skadlig i t.ex. betong eller för miljön är stor; eftersom man ofta borrar där berget går i dagen och inte i svackor där man skulle kunna förvänta sig sämre kvalitet. Därför behövs nya metoder utvecklas för att underlätta val av produktionsplats, vilket är syftet med forskningsprojektet.

Vidare medför jordmassorna ovanpå berget kostnader och miljökonsekvenser då dessa måste avlägsnas innan berget kan brytas, det är därför viktigt att kunna göra en bra bedömning av jordlagervolymer innan täkten öppnas eller expanderas. Det är också viktigt att kunna bedöma ifall jordlagen innehåller delar som kan användas för byggnadsändamål, och var dessa delar isåfall finns.

### **Projektidé och syfte**

Ett sätt att bedöma kvalitén på bergmassan är att använda geofysiska metoder, där olika metoder mäter olika egenskaper i berggrunden och moränen. Genom att göra en kombinerad tolkning av data från olika geofysiska metoder (t.ex. resistivitmätningar, IP och seismikmätningar) och bergkvalitetsdata från utvalda punkter, kan man få ett bättre underlag för bedömning av berggrunden och därav förutsäga kvaliteten på ballastmaterialet. Vidare skulle geofysiska metoder kunna användas för att få information som har relevans för egenskaperna i morän med avseende dess lämplighet som råvara för ballast.

Syftet med projektet är att anpassa och utvärdera geofysik, i kombination med andra metoder, för att skapa tre-dimensionella (3D) modeller av variation i jordmäktighet och bergegenskaper, som verktyg för planering och utvidgning av bergtäkter. I detta ingår att

koppla resultat från geofysiska undersökningar till bergartstyp och sprickfrekvens i berggrunden, för att skapa 3D modeller av bergets överyta och variation i bergets egenskaper. Dessa modeller skulle kunna ligga till grund för lokalisering och planering av nya täkter, samt för ekonomiskt och miljömässigt optimerad expansion av befintliga bergtäkter. Vidare ingår att analysera om de geofysiska resultaten kan användas för att bedöma kornfördelning och blockhalt i moränen.

## Genomförande

Fältundersökningar har genomförts i anslutning till fyra bergtäkter inom ramen för projektet; Olunda (Knivsta), Bäckseda (Vetlanda), Dalby (Lund) och Önnestad (Kristianstad). De tre första bergtäkterna valdes ut efter deras olika sprickfrekvens, för att se hur detta påverkar resultaten. Olunda har mycket få sprickor som är jämt fördelade; Bäckseda har högre sprickfrekvens än Olunda; Dalby har en extremt hög sprickfrekvens vilket gör att det inte är praktiskt möjligt att utföra en sprickanalys med den metoden använts. Möjlighet att få tillgång till referensdata i form av analyser av bergmaterialets lämplighet som ballastmaterial var en annan faktor vid valet av testlokaler.

Geofysiska mätningar har gjorts med metoderna resistivitet, inducerad polarisation (IP), refraktionsseismik, ytvågsseismik och magnetometri. Resistiviteten mäts genom att skicka strömpulser mellan par av elektroder som stucks ned i marken samtidigt som spänningar mäts mellan andra elektrodpar, vid IP-mätning mäts även hur spänningen avklingnar efter strömpulsen. Olika elektrodavstånd ger olika djupnedträngning. Data tolkas genom att skapa en modell av markens resistivitet m.h.a. inversion (invers numerisk modellering). På varje testlokal gjordes en 3D undersökning med resistivitet-IP genom att mäta 11 parallella linjer som kombinerades och tolkades till en 3D modell över en bergvolym på cirka 160 m x 40 m x 25 m (längd x bredd x djup). Vidare gjordes högupplösande mätningar med kort elektrodavstånd för att studera jordegenskaperna. De refraktionsseismiska undersökningarna gjordes så att de kan utvärderas med så kallad refraktionstomografisk inversion. Signalerna skapades genom att skjuta blanka hagelpatroner ned i marken och de uppkomna signalerna mättes upp med geofoner. Även här tolkas data m.h.a. inversion. Magnetometri innebär att styrkan på det jordmagnetiska fältet, och ibland också dess vertikala gradient, mäts upp med hjälp av bärbara sensorer. För närmare beskrivningar av de olika geofysiska metoderna hänvisas till litteraturen (t.ex Milsom & Eriksen 2012; Reynolds 2011).

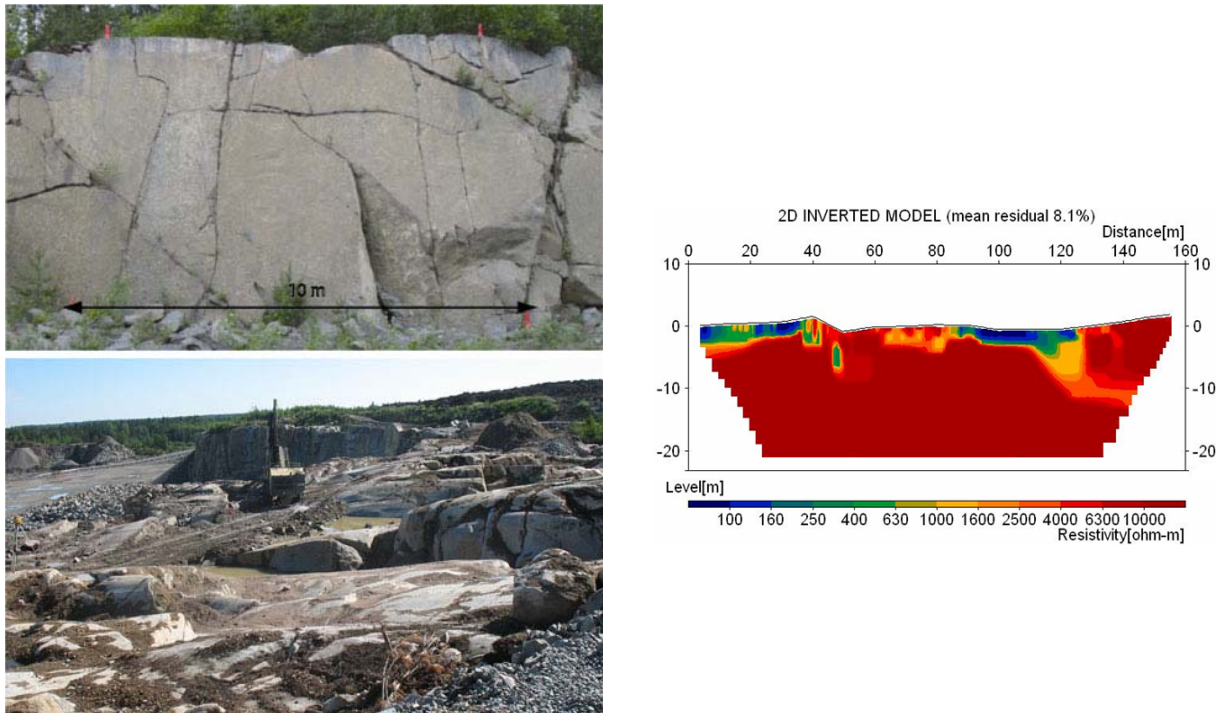
En berggrundskartering och sprickfrekvensanalys genomfördes på blottat berg på varje testlokal. Vidare gjordes geologiska undersökningar av moränen genom att provgropar grävdes och prover bestående av 1 ton morän vardera togs ut för siktanalys och klasificering genom bildanalys. Vidare gjordes blockidentifiering vid varje lokal, d.v.s. blocken identifierades och bergartsbestämdes.

För detaljer om hur fältundersökningarna genomfördes hänvisas till Magnusson et al. (2010) samt Bohlin & Landen (2009).

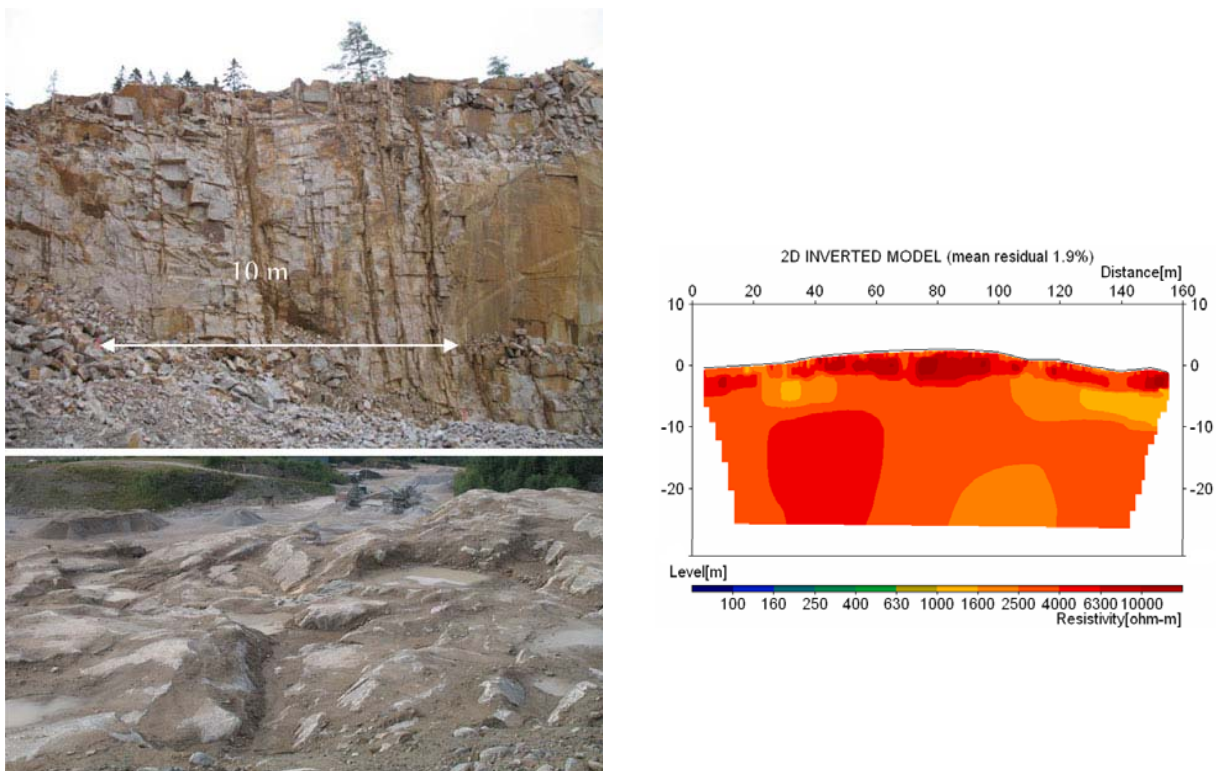
## Resultat

Exempel på resultaten från resistivitmätningarna från de tre bergtäkterna i form av vertikala (2D) snitt presenteras nedan. De visade sektionerna är skapade genom invers numerisk modelltolkning (inversion) av mätdata från utvalda tvärsnitt från 3D-dataseten.

Olunda har den högsta resistiviteten för de tre täkterna, med värden över 10 000  $\Omega\text{m}$  för berggrunden (Figur 1). De lägre resistiviteter, under 400  $\Omega\text{m}$ , tolkas som morän och lerlager (Figur 1). Detta har styrkts genom att en provgrop har grävts där djup till berggrund kunde bestämmas, samt genom att jämföra med mäktigheten av moränen runt bergtäkten.



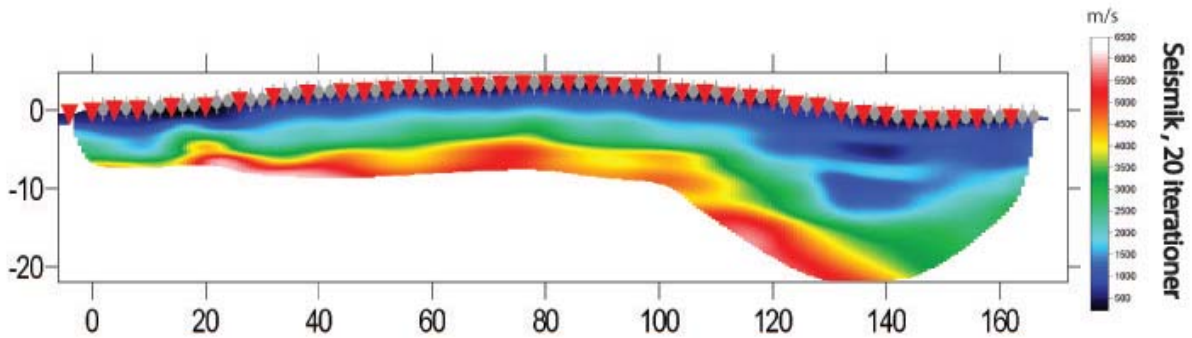
Figur 1. Foton från Olunda som visar sprickighet i berget (vänster). Sprickfrekvensindex är 0,72. Exempel på resultat i form av sektion som visar resistiviteten i ett vertikalt tvärsnitt (höger). (Magnusson et al. 2010)



Figur 2. Foton från Bäckseda som visar sprickighet i berget (vänster). Sprickfrekvensindex är 2,0. Exempel på resultat i form av sektion som visar resistiviteten i ett vertikalt tvärsnitt (höger) (Magnusson et al. 2010)

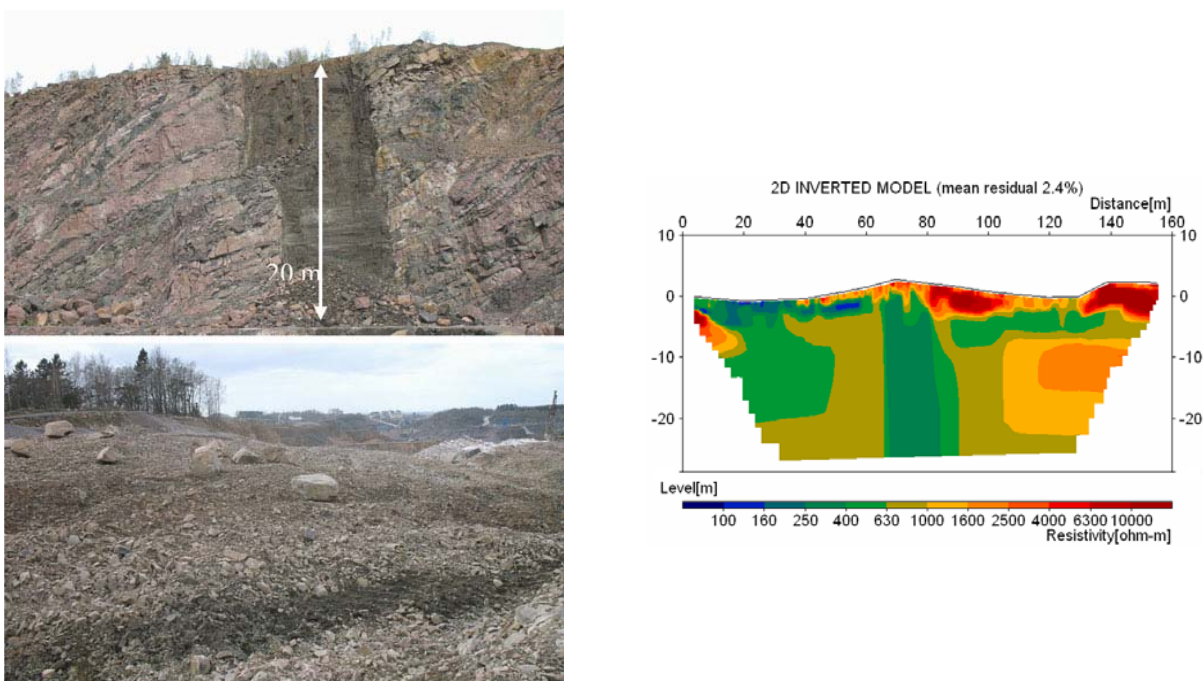
Resistiviteten för Bäckseda ligger runt 2500  $\Omega\text{m}$  för berggrunden (Figur 2). Det gick det en vägskärning längs med profilen som gjorde att man med god säkerhet kan fastställa

moränmäktigheten till att vara de översta 5 m, vars resistivitet i detta fallet är högre än berggrundens. Detta kan komplicera tolkningen, i synnerhet om berget överlagras av mer än ett lager jordmaterial. För att få en säkrare bestämning av jordmäktigheten är det i ett fall som detta av stort värde att komplettera med refraktionsseismik som är väl lämpat för att detektera djupet till berg i den typ av geologi som är aktuell vid svenska bergtäkter. Figur 3 visar exempel på resultat från refraktionsseismisk tomografi från Bäckseda.



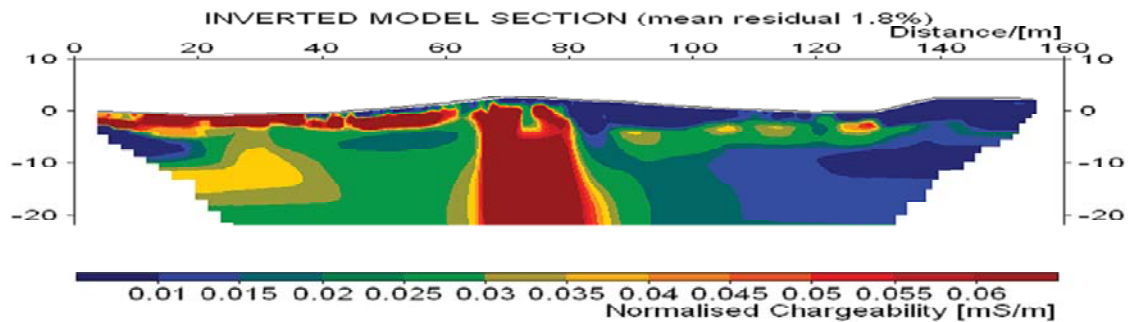
Figur 3. Exempel på resultat av refraktionsseismisk tomografi från Bäckseda (Bohlin & Landen 2009).

För Dalby ligger resistiviteten huvudsakligen i intervallet 200 - 2500  $\Omega\text{m}$  (Figur 4). Det gjordes 3 provgropar för att bestämma djup till berggrund, vilka visade att mäktigheten var mer än 4m i början av profilen, vilket är i samklang med resultat från inversionen. De andra provgroparna var placerade vid koordinat 60 m och 120 m och nådde berggrunden redan efter mindre än 1m. De högresistiva ( $\sim 10\,000\ \Omega\text{m}$ ) områdena runt koordinat 90 m och 140 m är uppsprucket berg i dagen, och tolkas som torra vilket skulle ge upphov till en högre resistivitet. För Dalby tolkas den lägre resistiviteten mellan koordinat 60-80 m som en diabasgång (se foto Figur 4).



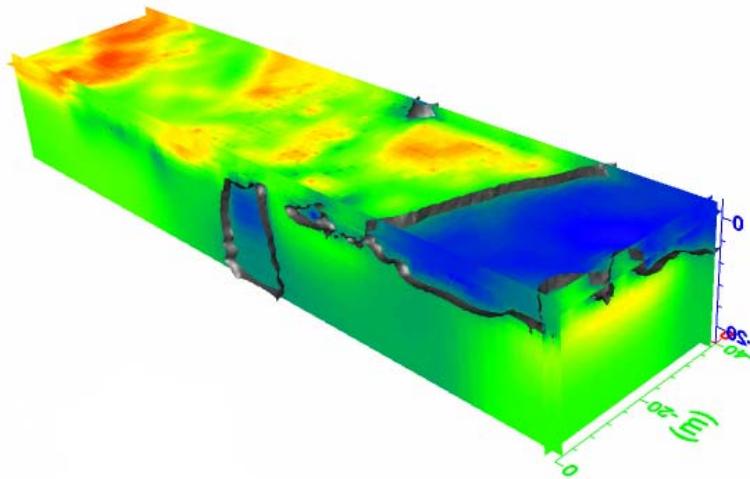
Figur 4. Foton från Dalby som visar sprickighet i berget och diabasgångar (vänster). Sprickfrekvensindex är så högt att det inte går att kvantifiera. Exempel på resultat i form av sektion som visar resistiviteten i ett vertikalt tvärsnitt (höger) (Magnusson et al. 2010)

Diabasgången framträder mycket tydligt i IP-modellen (Figur 5). Resultat från andra områden (t.ex. Hallandsåsen) visar att IP även kan indikera diabasgångar i fall då de inte kan lokaliseras med resistivitet p.g.a. liten kontrast i ledningsförmåga (Danielsen 2010).



Figur 5. Exempel på normaliserad IP-effekt från Dalby som tydligt visar läget för en diabasgång (Magnusson et al. 2010)

Modellerna från 3D inversion av resistivitetsdata ger volymstäckande bilder. Figur 6 visar en modell från Dalbytäkten, där man tydligt ser samma diabasgång som nämnts ovan som en lågresistiv (blå) zon som går tvärs genom den undersökta volymen mitt i modellen. Den ytliga lågresistiva zonen beror i detta fallet på ökad jordmäktighet med det skulle också kunna bero på ytnära vittring av berget.

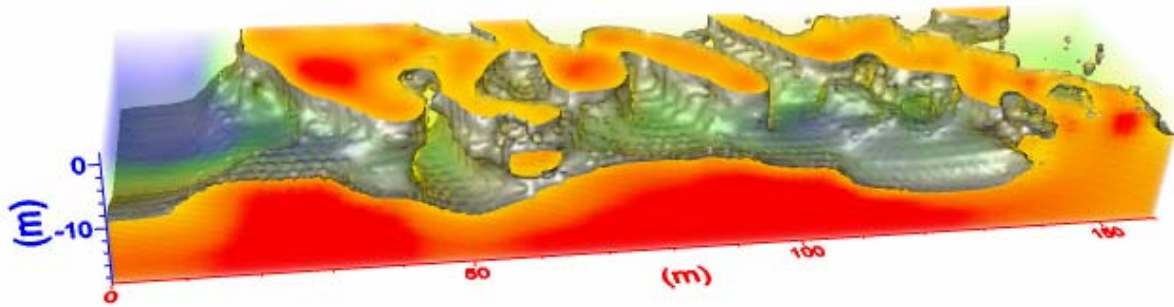


Figur 6. Exempel på 3D modell av bergets resistivitet från Dalby (blå = låg resistivitet, röd = hög resistivitet).

Figur 7 visar en visualisering av en 3D modell från Olunda. Resistivitetsintervallen har valts så att ytan är avskuren vid 10 000  $\Omega\text{m}$  och att allt med lägre resistivitet är transparent, d.v.s. jordlagren är genomskinliga.

De geofysiska resultaten har sammanställts tillsammans med bergkvalitetsparametrar från de tre bergtäkterna (Tabell 1). Detta visar tydligt att den seismiska tryckvågshastigheten varierar ganska lite mellan täkterna, vilket även gäller LA-värden och kulkvarnsvärden. Resistiviteten å andra sidan varierar kraftigt mellan täkterna, liksom sprickfrekvensen, med ett omvänt förhållande mellan dessa.

Resultaten från detaljmätning med resistivitet visar potential för karaktärisering av moränens sammansättning med avseende på lämplighet som råvara för ballastframställning. Bl.a. kan det ge indikation på blockförekomst, vilket även visats av Wisén et al. (2006).

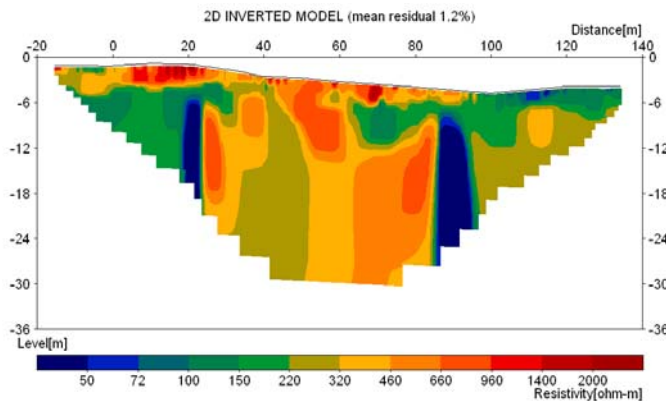


Figur 7. 3D modell av bergets överyta från Olunda.

Tabell 1. Sammanställning av geofysiska och ballasttekniska egenskaper från Olunda, Bäckseda och Dalby (modifierad från Bohlin & Landen 2009).

Parameter	Olunda	Bäckseda	Dalby
Resistivitet ( $\Omega\text{m}$ )	>10000	1500 - 6000	200 - 2500
Seismisk P-vågshastighet (m/s)	5500	4000 - 5000	5500
LA-värde	20	19	18-20
Micro Deval (mD)	9	5,3	9
Kulkvarnsvärde (AN)	12	9,8	10
Sprickfrekvens (FF)	0,8	2	$\infty$
Glimmerhalt max (%)	6 - 19	2 - 12	< 5

Resultaten från Önnestad liknar i hög grad de från Dalby, med låga resistiviteter i berget (Figur 8). Uppspruckna och vittrade zoner framträder med bitvis mycket låg resistivitet (<50  $\Omega\text{m}$ ).



Figur 8. Exempel på resistivitetsresultat från Önnestad.

Seismikdata från Önnestad har analyserats med avseende på ytvågor och skjuvvågor förutom med refraktionssesismisk tomografi, och en sammanställning av resultaten visas i Tabell 2. Som framgår av tabellen varierar de seismiska hastigheterna påtagligt mellan provgrupperna. Det är troligt att en analys av dessa och liknande resultat tillsammans med data från bergkvalitetstester skulle kunna leda fram till att man kan etablera samband mellan de geofysiska signaturerna och lämpligheten som råvara för ballastframställning. Det har visats att det finns samband mellan index för hårdhet och seismisk hastighet (Khandelwal & Ranjith, 2010), men det har ännu inte visats vetenskapligt att det finns motsvarande samband med LA-värde. Sharma & Singh (2008) har visat på stark korrelation mellan tryckvågshastighet och hållfasthet för de sju olika typer berg de testade.

Tabell 2. Sammanställning av seismiska gånghastigheter uppmätta över olika bergarter i Önnestadstälten.

Bergart	Tryckvågs- hastighet V <sub>p</sub> , (m/s)	Rayleighvågs- hastighet V <sub>r</sub> (m/s)	Skjuvvågs- hastighet V <sub>s</sub> (m/s)
Diabas (3 prover)	5500	1700 -2200	1850 - 2390
Granit grupp 1 (3 prover)	1200 - 1500	500- 900	540 - 980
Granit grupp 2 (2 prover)	4500-5500	-	-
Amfibolit (2 prover)	2500-3500	800 - 900	870 - 980

## Slutsatser och rekommendationer

De geofysiska metoderna kan användas för att skapa modeller i 3D av bergets strukturella uppbyggnad. De kan lokalisera svaghetszoner och lokala förändringar av geologin såsom förändring i bergartstyp, gångbergarter, sprickzoner, vittringszoner och berggrundens övertyta. En kombination av metoder, t.ex. resistivitet, IP och seismik ger ett säkrare resultat än att använda bara en metod. Vilken kombination av metoder som är lämpligast beror på den geologiska miljön, förekomst av storkällor och undersökningens syfte. Resistivitetsundersökning visar också potential för karaktärisering av moränens sammansättning med avseende på lämplighet som råvara för ballastframställning.

Översiktliga mätningar med snabba metoder såsom magnetometer eller induktiva elektromagnetiska metoder kan vara lämpliga för en kvalitativ skanning i tidiga skeden om större områden skall undersökas. Dessa metoder kan dock störas ut av exempelvis metallföremål och kraftledning. I fall då jordtäcket ledningsförmåga är låg kan markradar vara lämplig för jorddjupsbestämning, men man får ingen användbar djupnedträngning i finkorniga jordar.

Resistivitet och seismik ger kvantitativa resultat som öppnar möjligheter för korrelation mot de materialparametrar som är av intresse. Resistivitetsmätning är en robust metod som i princip alltid ger användbara resultat. Den är förhållandevis billig och kan konfigureras så att man får modeller i 2D (vertikala tvärsnitt) eller 3D (volymer).

Eftersom man kan göra IP-mätning samtidigt som man gör resistivitetsmätning kan det rekommenderas att alltid göra det i samband med fältmätningen eftersom det kan ge värdefull extra information kopplat till förändringar i bergmassan. IP-mätning är dock mättekniskt mycket svårare än resistivitetsmätning, och ibland gör det att resultaten blir svårtolkade eller oanvändbara. Det finns behov av vidare forskning och utveckling för att bättre kunna mäta och tolka IP-data.

Refraktionsseismik är mera tidsödande att utföra än resistivitetsmätning, men ger resultat som korrelerar mot de mekaniska egenskaperna. Mätningarna kan göras så att man även kan använda data för tolkning av ytvågs- och skjuvvågshastigheterna, vilket förväntas ge ytterligare information av värde för bedömning av de mekaniska egenskaperna. Eftersom befintlig tolkningsteknik för seismiska data endast medger tolkning i 2D (refraktionsseismik) eller 1D (ytvågsseismik) är det viktigt att placera mätlinjerna med hänsyn till de geologiska strukturerna så att man undviker problem med så kallade 3D respektive 2D effekter som kan ge missvisande resultat. Resultaten från en 3D resistivitetsundersökning är i detta sammanhanget ett utmärkt underlag för lokalisering av en seismisk undersökning.

Resultaten tyder på att det finns ett starkt samband mellan bulkresistivitet och sprickfrekvens. Resistiviteten beror främst på vatteninnehåll och lerhalt, vilket medför att osprucket torrt berg har hög resistivitet medan sprucket vattenhaltigt berg har lägre resistivitet. Lervittring kan ge

ännu lägre resistivitet. IP-data har potential att ge ytterligare information som är kopplad till sprickegenskaper och lervittring, men dagens kommersiella tolkningprogramvaror kan inte utnyttja det fulla informationsinnehållet i dessa data.

Den seismiska tryckvågshastigheten påverkas inte i någon högre utsträckning av sprickfrekvensen i de undersökta fallen. Detsamma gäller för de parametrar som används för kvalitetsklassificering av bergmaterialet. Tryckvågshastigheten bör därför kunna vara användbar för bedömning av bergets kvalitet m.a.p. lämplighet för ballastframställning. Analys av ytvågs- och skjuvvågshastigheterna förväntas kunna ge underlag för att förfina bedömningarna. I framtida projekt bör också dämpning av seismiska vågor analyseras och jämföras med sprickfrekvens och bergmekaniska egenskaper.

Ett problem i samband med ovanstående analyser är att de geofysiska egenskaperna är medelvärden över volymer av viss om än begränsad utsträckning. Bergkvalitetsindex å andra sidan baseras på laborietesting på ett antal prover tagna på olika ställen i täkterna. Eftersom bergets egenskaper varierar i 3D är det inte säkert att de representerar samma typ av bergmaterial. För att kunna etablera säkra samband mellan de olika egenskaperna skulle man behöva göra ytgeofysik åtföljt av kärnbörning och geofysisk borrhålsloggning i den undersökta volymen, samt bergkvalitetsanalys av material från borrhålen. Detta skulle kunna vara temat för ett framtida projekt.

Rörande tolkning av data finns det stor potential för att utveckla metoder för objektiv och repeterbar analys av data genom samtidig inversion av resistivitetsdata och seismisk data tillsammans med data från borrhålsloggning och laborietesting. Detta skulle kunna ge 3D modeller av bergkvaliteten m.a.p. lämplighet som ballastråvara

## Referenser

- Bohlin, E. & Landen, L. (2009) *Geofysiska mätmetoder för prospektering till ballastmaterial*, Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet, Nr. 236, 59 sid.
- Danielsen, B.E. (2010) *The applicability of geoelectrical methods in pre-investigation for construction in rock*, Doctoral thesis, Engineering Geology, Lund University, ISBN 978-91-976848-6-6, ISRN LUTVDG/(TVTG-1028)/1-187/(2010).
- Magnusson, M., Fernlund, J. & Dahlin, T. (2010) Geoelectrical Imaging for Interpretation of Geological Conditions Affecting Quarry Operations, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69:465–486.
- Milsom, J. & Eriksen, A. (2012) *Field Geophysics*, 4 ed., Wiley, ISBN 978-0-470-74984-5, 287s.
- Reynolds, J.M. (2011) *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley and Sons Ltd, ISBN: 9780471485360, 664p
- Khandelwal, M. & Ranjith, P.G. (2010) Correlating index properties of rocks with P-wave measurements, *Journal of Applied Geophysics*, 71, 1–5.
- Sharma, P.K. & Singh, T.N. (2008) A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 67, 17–22.
- Wisén, R., Linders, F. and Dahlin, T. (2006) 2D and 3D Resistivity Imaging in an Investigation of Boulder Occurrence and Soil Depth in Glacial Till, *Procs. Near Surface 2006 - 12<sup>th</sup> European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, 4-6 September 2006, Helsinki, Finland, B029, 4p.