

KVANTITATIV UTVÄRDERING AV RESISTIVITET, INDUCERAD POLARISATION, REFRAKTIONSMETODIK OCH SEISMISK TOMOGRAFI SOM FÖRUNDERSÖKNINGS- METODER INFÖR UNDERMARKS- BYGGNATION I BERG – EN FALLSTUDIE

Erik Meland

Eric Hegardt

Karin Höög

**KVANTITATIV UTVÄRDERING AV
RESISTIVITET, INDUCERAD
POLARISATION,
REFRAKTIONSMETODIK OCH
SEISMISK TOMOGRAFI SOM
FÖRUNDERSÖKNINGSMETODER
INFÖR UNDERMARKSBYGGNATION I
BERG – EN FALLSTUDIE**

**A quantitative evaluation of resistivity
and refraction seismic tomography as
methods for preinvestigations for
underground constructions – a case study**

Erik Meland, ÅF Infrastructure
Eric Hegardt, ÅF Infrastructure
Karin Höög, Bergab - Berggeologiska Undersökningar

BeFo Rapport 145

Stockholm 2016

ISSN 1104 – 1773

ISRN BEFO-R—145—SE

FÖRORD

Undermarksanläggningar inom infrastrukturprojekt har en stor betydelse inom samhällsutbyggnad och tunnlar förlagda i berg står för en stor andel. Som bergtekniskt underlag för projektering och utformning av undermarksanläggningar ingår ofta geofysiska undersökningar i ett tidigt skede.

Felaktiga bergkvalitéprognoser i ett tidigt skede av ett projekt kan innebära att beslut om tunnelsträckning eller utformning tas på felaktiga grunder. Under senare skeden kan en felaktig bergkvalitéprognos ge allvarliga konsekvenser så som förseningar och ökade kostnader under byggnationen.

Vid undersökning av bergkvalité i tidiga skeden används ofta traditionell refraktionsseismik som metod för att utreda de geologiska förhållandena då denna kostnadsmässigt ger mer yt- och volymtäckande information jämfört med exempelvis kärnborring. Metoden har dock svagheter, i synnerhet vid bedömning av bergkvalité mot djupet.

Under senare år har det skett en stark utveckling vad gäller geofysiska metoder för geotekniska tillämpningar, både vad gäller instrumentering och tolkning. Nya möjligheter inom elektriska metoder som resistivitet och inducerad polarisation har demonstrerats bland annat av Danielsen (2010) och Rønning et al. (2013).

Inom detta projekt har vi jämfört olika geofysiska metoders användbarhet vid upprättandet av bergkvalitéprognoser. Som objekt har valts Ulricehamnstunneln som är en del av Trafikverkets utbyggnation av Rv 40 till motorväg. Projektets mål har varit att kvantitativt kunna utvärdera hur resistivitet och seismisk gånghastighet tolkas mot den bergkvalitet som togs fram i samband med undermarksbyggnationen i projektet.

Utredningsarbetet har utförts av Erik Meland (ÅF), Eric Hegardt (ÅF/Göteborgs Universitet), Karin Höög (Bergab), Torleif Dahlin och Kristofer Hellman (Lunds Tekniska Högskola). En referensgrupp har följt projektet som stöd åt arbetsgruppen och bestod av Assen Simeonov (SKB), Erik Sturkell (Göteborgs Universitet), Kai Palmqvist (Bergab), Rikard Marek (Pöyry), Urban Åkesson (Trafikverket) och Per Tengborg (BeFo).

Projektet finansierades av Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo).

Stockholm i december 2016

Per Tengborg

SAMMANFATTNING

I samband med förundersökningar används ofta traditionell refraktionsseismik som metod för att utreda de geologiska förhållandena.

I detta projekt är huvudsyftet att jämföra olika geofysiska metoders användbarhet vid upprättandet av bergkvalitetprognoser. Projektets mål har varit att snabbt kvantitativt kunna utvärdera hur resistivitet och seismisk gånghastighet tolkas mot den bergkvalitet som togs fram i samband med undermarksbyggnationen i projektet.

Utredningen har jämfört traditionell refraktionsseismik, tomografisk refraktionsseismik och resistivitet mot utfall från kartering av bergkvalitet under tunnelns produktion.

Undersökningen har utförts vid de norra och södra tunnelrören i den 400 meter långa Ulricehamnstunneln.

Den traditionella seismiken indikerar att ca 8 % norra tunnelröret har Q-bas <1, det vill säga en p-vågshastighet under 3500 m/s. För det södra tunnelröret är motsvarande siffra 3,4 %. Detta motsvarar totalt ca 32 meter tunnel i norra röret och 14 meter tunnel i det södra röret.

Den tomografiska refraktionsseismiken indikerar att ca 0,5 % norra tunnelröret har Q-bas <1, det vill säga en p-vågshastighet under 3500 m/s. Samma gäller för det södra tunnelröret. Detta motsvarar totalt ca 2 meter tunnel i norra respektive södra röret. Samtliga uppmätta resistiviteter som representerar berg har värden >10000 Ωm vilket indikerar berg av god kvalitet.

Den traditionellt utvärderade seismiken tenderade att underskatta bergkvalitén. Zoner med tolkad p-vågshastighet <3500 m/s vilka otvetydigt innebär kraftigt uppsprucket berg har inte återfunnits på tunneldjup.

Den tomografiska modellen beräknar p-vågshastigheten i berg en bit under bergets överyta, i aktuellt fall mellan 5-10 meter. Generellt är p-vågshastigheterna i berg i modellens underkant högre än vad traditionell seismik visade, i genomsnitt ca 5500 m/s jämfört med 4900 m/s för traditionell seismik.

Den tomografiska modellen överensstämmer därmed bättre med verkligt utfall. Resistivitetsmätningen detekterade inga zoner som kunde tolkas som berg med nedsatt bergkvalitet. Den generellt höga resistiviteten indikerar snarast mycket bra bergkvalitet med låg sprickfrekvens och obefintlig grad av sprickomvandling.

För att få en säkrare bedömning av bergkvalitet mot djupet bör tomografisk refraktionsseismik i kombination med resistivitetsmätningar användas snarare än traditionell refraktionsseismik.

Bergtunnel, bergkvalitè, refraktionsseismik, resistivitet, geofysik

SUMMARY

Traditional refraction seismics is the common pre-investigation method for reconnaissance studies of rock quality in tunneling projects.

The main purpose in this project has been to investigate different geophysical methods for rock quality evaluation. The investigation aims to a quantifiable comparison between resistivity, refraction seismic p-wave velocity and geological mapping in a tunneling project.

The investigation was done at the 400 meter long Ulricehammn tunnel, comprising the two parallel northern and southern tunnels.

Results from the traditional refraction seismic survey indicates that ~8 % of the rock in the northern tunnel has $Q < 1$, indicated by p-wave velocities below 3500 m/s. Results from the southern tunnel show ~3.4 % $Q < 1$.

Results from seismic tomography indicate that ~0.5 % has $Q < 1$ with similar conditions in both the northern and southern tunnel. The rock mass also shows high resistivity $> 10000 \Omega\text{m}$, indicating good rock quality.

Results from the traditional refraction seismic survey underestimates the rock quality. None of the low velocity zones interpreted as zone of weakness were found at tunnel depth.

Results from seismic tomography can be interpreted for the top 5-10 meters of the bedrock. Generally, results from the tomographic model show p-wave velocities higher than velocities calculated in the traditional refraction seismic survey, on average 5500 m/s compared to 4900 m/s. The tomographic model thus correlates better with the results from the rock quality mapping in the tunnel.

The resistivity survey indicated no weakness zones in the rock. The high resistivity indicates good rock quality with sparse fractures with low or absent alteration.

To achieve a more reliable and accurate rock quality prognosis, a combination of seismic tomography and resistivity is emphasized rather than traditional seismic refraction surveys.

Rock tunnel, rock quality, refraction seismics, resistivity, geophysical investigations

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	Inledning	1
1.1	Samarbeten	1
1.2	Omfattning och utförande	1
1.3	Områdesbeskrivning	2
1.3.1	Geologi	2
1.3.2	Borrkärnor	3
1.4	Generella begrepp	4
2	Metod	5
2.1	Indata	5
2.1.1	Använd befintlig data, tidigare utförda undersökningar	5
2.1.2	Kompletterande geofysiska undersökningar	5
2.1.3	Tunnelkartering	7
2.2	Visualisering, datahantering och blockmodellering	7
2.2.1	Parametrar och inställningar	7
2.2.2	Uppbyggnad av databas och modell	8
2.3	Tillvägagångssätt för kvantitativ utvärdering	12
2.3.1	Seismik	12
2.3.2	Resistivitet	12
3	Resultat	13
3.1	Kvantitativ utvärdering mellan geofysiska metoder och verkligt utfall	15
3.1.1	Tunnelkartering jämfört med traditionell seismik med avseende på Q-bas och RQD	16
3.1.2	Tunnelkartering jämfört med tomografisk refraktionsseismik med avseende på Q-bas och RQD	18
3.1.3	Tunnelkartering jämfört med resistivitetsmätningar med avseende på Q-bas och RQD	20
4	Diskussion	23
4.1	Kartering och bergteknisk prognos mot verkligt utfall	23
4.2	De geofysiska undersökningarnas användbarhet vid upprättandet av bergkvalitetprognoser	23
4.2.1	Traditionell refraktionsseismik	23
4.2.2	Tomografisk refraktionsseismik	23
4.2.3	Resistivitet	24
4.2.4	Osäkerheter och felkällor	24
5	Slutsatser och rekommendationer	25
6	Referenser	27

1 INLEDNING

Felaktiga bergkvalitéprognoser vid undermarksbyggnation är en risk som kan ge allvarliga konsekvenser så som förseningar och ökade kostnader för projektet. I samband med förundersökningar används ofta traditionell refraktionsseismik som metod för att utreda de geologiska förhållandena då denna kostnadsmässigt ger mer yt- och volymtäckande information jämfört med exempelvis kärnborring. Även om traditionell refraktionsseismik (delay-time och GRM) är ett dokumenterat väl fungerande verktyg för undersökning av de geologiska förhållandena vid undermarksprojekt finns brister, i synnerhet vad gäller metodens lämplighet för att bedöma bergkvalité mot djup.

Under senare år har det skett en stark utveckling vad gäller geofysiska metoder för geotekniska tillämpningar, både vad gäller instrumentering och tolkning. Nya möjligheter inom elektriska metoder som resistivitet och inducerad polarisation har demonstrerats bland annat av Danielsen (2010) och Rønning et al. (2013). Vidare används sällan nya tolkningsmetoder för refraktionsseismisk för att prognosticera bergkvalitet i Sverige.

Utvärderingen av den praktiska tillämpningen av nya geofysiska metoder och tillvägagångssätt, samt eventuella bergkvalitéprognoser baserade på dessa, försvåras tyvärr ofta av projektens långa ledtider där de geofysiska mätningarna oftast utförs i ett tidigt skede. Det är även ovanligt med kvantitativa uppföljningar av bergkvalitéprognoser baserade på geofysiska undersökningar.

Huvudsyftet med projektet är att jämföra olika geofysiska metoders användbarhet vid upprättandet av bergkvalitéprognoser. Som objekt har valts Ulricehamnstunneln som är en del av Trafikverkets utbyggnation av Rv 40 till motorväg. Projektets mål har varit att kvantitativt kunna utvärdera hur resistivitet och seismisk gånghastighet tolkas mot den bergkvalitet som togs fram i samband med undermarksbyggnationen i projektet.

1.1 Samarbeten

Projektet har utförts i samarbete med Torleif Dahlin och Kristofer Hellman, Lunds Tekniska Högskola.

1.2 Omfattning och utförande

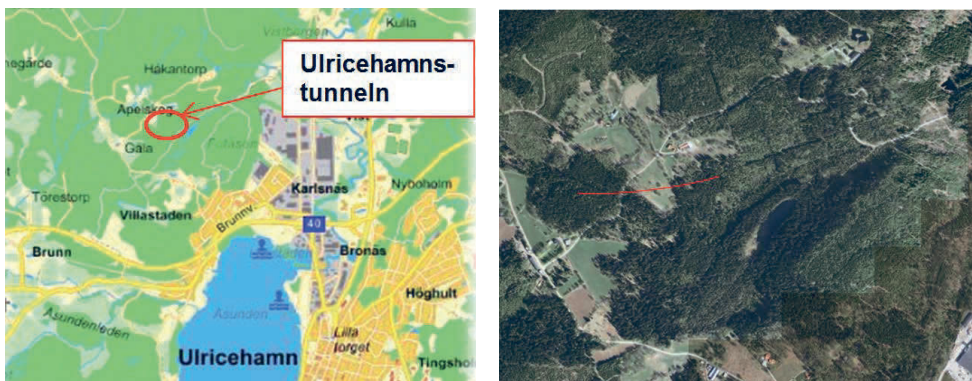
Som objekt för studien valdes ett tunnelprojekt i Ulricehamn då det för detta projekt fanns tillgängligt material från förundersökningar och projektering samt att drivning av tunneln skulle ske inom närtid.

Befintligt material från tidigare undersökningar kompletterades med ytterligare geofysiska mätningar. De mätningar som utfördes var resistivitet, IP samt refraktionsseismik. Sammanlagt mättes 1500 meter resistivitet/IP längs 3 parallella, 500 meter långa linjer, samt 450 meter refraktionsseismik längs en linje ovan det södra tunnelröret.

1.3 Områdesbeskrivning

Området är beläget ca 2,5 km nordost om Ulricehamns centrum, se Figur 1. Byggstart för Ulricehamnstunneln var våren 2013 och tunneln var färdigutspänd våren 2014. Tunneln ingår som en del i Trafikverkets projekt att bygga ut Rv 40, sträckan Dällebo-Hester, till motorväg.

Tunneln är ca 400 meter lång och består av två parallella tunnelrör, 13,7 meter breda och 7,8 meter höga, med en största bergtäckning av 20-25 meter och minsta bergtäckning om ca 5 meter. Längdmätning för tunneldelen är 11/900-12/300 (ökande längdmätning österut).



Figur 1. Översikt över området.

Markytan ovan planerad tunnel är relativt plan och består av gles skogs- och hagmark. Bergytan är övervägande jordtäckt. Jordlagren utgörs av ett tunt lager mullhaltig moränjord som underlagras av ett hårt packat moränlager på berg. Jordlagren längs mätlinjerna är naturliga med undantag för en grusväg som passerar vid 12/000 och en jordkulle, troligen en liten deponi, vid 12/150.

Djupet till fast botten eller berg varierar enligt Trafikverket (2011) mellan ca 0,5 och 3,5 m. Endast ett fåtal punkter överstiger 3m. Berg i dagen förekommer främst väster och söder om västra påslaget och är vanligt förekommande vid det östra påslaget. Ytkartering har utförts vid förundersökningar.

1.3.1 Geologi

Tunneln har i huvudsak drivits genom röd något gnejsig granit. I graniten har noterats brant stående skivor av amfibolit, se exempel i Figur 2. I den östra delen av området ökar gnejsigheten något. I två bergblottningar ovanpå tunnelns sträckning syns kontakten mellan granit och amfibolit som i båda fallen har en ca öst-västlig strykning.



Figur 2. Bild på tunnelfront där en amfibolit (svart) syns i den röda graniten.

De sprickor som vanligen påträffas i de blottade berghällarna är branta till vertikalt stående eller flacka till horisontellt liggande. De vertikala sprickorna har i huvudsak en ostnordostlig och en nordnordvästlig strykning men variationer kring dessa riktningar har noterats. I den östliga delen av tunnelsträckningen framträder även en tydlig uppsprickning av berggrunden som stupar ca 45° mot nordväst.

1.3.2 Borrkärnor

Tunnelberget har provtagits med sex stycken borrkärnor. Kärnkarteringen visar på att den dominerande bergarten är fin-medelkornig röd gnejsig granit av god kvalitet med inslag av amfibolit (metabasit). Inslagen varierar i mäktighet och förekommer i hälften av borrhålen med den största förekomsten i de mest västligt belägna borrhålen.

Kärnorna är uppspruckna och det förekommer mindre uppkrossade zoner. Flertalet av sprickytorna har järnoxidbeläggning. Järnoxidbeläggning förekommer på flertalet sprickytor längs hela kärnlängden, även nere på tunnelnivå.

De vanligaste sprickriktningarna som iakttagits vid ytkarteringen har verifierats vid sprickarteringen av borrkärnorna. I kärnorna är det dock de horisontella till flackt liggande sprickplanen som klart dominerar sprickbilden.

Med ovan beskrivna sprickgeometri förväntades bergutfall efter horisontella slag, med plant tunneltak som resultat. Dessa vanligt förekommande plana slag skärs av de förekommande östnordöst-västsydvästliga och nordnordväst-sydsydöstliga vertikala

slagen vilket kan resultera i blockutfall som då påverkar tunnelns valvform ytterligare d v s kan ge ”trappstegsformade” utfall. De medelbrant, mot nordväst, stupande sprickorna tillsammans med övriga sprickplan innebär risk för kilformade blockutfall så kallade ”kyrkor” i tak och kilformade utfall i anfang och tunnelväggar.

1.4 Generella begrepp

För att tydliggöra vad som avses med de olika parametrar som används i utvärderingen presenteras i detta kapitel i en tabell med några generella begrepp, se Tabell 1.

Tabell 1. Generella begrepp.

Generella begrepp	
Blockmodell	En tredimensionell modell uppdelad i mindre enheter, kallade block, som kan fyllas med olika data. Data i dessa blocka kan sedan extrapoleras, hanteras och jämföras med varandra genom statistiska samband.
P-vågshastighet	Hastigheten på den snabbaste seismiska vågen, tryckvågen (ofta kallad P-våg), som används vid tolkning av refraktionsseismik.
Q-bas	Q som innehåller parametrarna RQD, J_n , J_r , J_a .
Resistivitet	Ett uttryck för markens motstånd att leda ström. Anges i Ωm .
Seismisk refraktionstomografi	Ett alternativ till konventionella analysmetoder av seismisk refraktionsdata. Metoden fungerar bra i situationer där de konventionella metoderna fallerar pga. att de horisontella eller vertikala hastighetsgradienterna utgör en större del av hastighetsstrukturen. Metoden använder sig av iterativ spårning av den vågen vågen tar. Hänsyn tas därmed även till vågor som inte har kortast restid.

2 METOD

Projektet har jämfört olika geofysiska metoders användbarhet vid upprättandet av bergkvalitetprognoser genom att jämföra resultaten från befintliga och kompletterande geofysiska undersökningar mot utfall från kartering av bergkvalitet under tunnelns produktion.

Då traditionella seismiska undersökningar ingått som en del i den befintliga bergkvalitetprognosen har även en direkt jämförelse mellan bergkvalitetprognos och verkligt utfall gjorts.

Resultaten från undersökningarna har lagts in i Microsoft Access för vidare behandling i programvaran Surpac version 6.2.2 och Microsoft Excel.

2.1 Indata

2.1.1 Använd befintlig data, tidigare utförda undersökningar

Tillgängligt underlag från tidigare undersökningar inom projektet:

- Tolkad seismikdata (p-vågs hastigheter) insamlad med konventionell refraktionsseismik finns tillgänglig som sammanlagt 11 st profiler. Tre profiler går längs med tunnelsträckningen och de övriga 8 st profilerna tvärs densamma.
- Q klass (max-min) från bergtekniska prognosen.
- Q-bas parametrar, sprickfrekvens och bergart från kärborrhål (6 st).
- Markytemodell (LiDAR).

2.1.2 Kompletterande geofysiska undersökningar

Kompletterande geofysiska undersökningar utfördes för att erhålla ytterligare data att korrelera verkligt utfall mot.

Fältarbete

Samtliga mätningar utfördes i oktober 2011.

Använt koordinatsystem är RT 90 5 gonV 0:-1 och höjdsystem RH70 som var gällande koordinatsystem i Ulricehamnstunnelns förundersökningar samt under byggtiden.

Utsättning av tunnelinjen utfördes med RTK-GPS av COWI varje 50 meter för mittlinjen. Resterande utsättning har gjorts med måttband utifrån dessa. Marknivåer har tagits från gällande markytemodell framtagen i Ulricehamnsprojektet.

Refraktionsseismik

De kompletterande refraktionsseismiska mätningarna utfördes av Erik Meland och Karin Höög. En undersökningslinje om 475 meter mättes som 5 utlägg om vardera 115 meter. Utläggen överlappade varandra med 25 meter för att erhålla god datatäckning. Mätlinjen är placerad över det södra tunnelröret.

Mätningen utfördes med standardutrustning för refraktionsseismik innefattande seismograf, seismikkablar, geofoner, extern batterikälla, tändapparat och verktyg för skotthål (spett), se Tabell 2 för specifikationer.

Tabell 2. Specifikationer för använd seismisk utrustning.

Urustning	Typ/modell	Mätområde	Mät noggrannhet
Seismograf	ABEM Terraloc Pro 48 kanaler	24 bitar	0,02 ms
Geofoner	Vertikala, 10 cm konisk spets	10 Hz (egenfrekvens)	-
Tändapparat	Handlösare H1N1	-	-
Tändkapslar	Nonel, 475 ms fördröjning	-	-
Pulskälla	Dynamit, 30-100 g/skott	-	-

För tomografisk tolkning av seismisk data och beräkning av p-vågshastigheter valdes programmet Rayfract. För en utvärdering mellan olika program för tomografisk tolkning av refraktionsseismik se exempelvis (Sheehan m. fl., 2005).

Tomografisk tolkning av refraktionsseismisk data är ett alternativ till konventionella analysmetoder och fungerar bra i situationer där de horisontella eller vertikala hastighetsgradienterna utgör en större del av hastighetsstrukturen. Metoden använder sig av iterativ spårning av den vägen vägen tar, vilket innebär att hänsyn även tas till vågor som inte har kortast restid vilket teoretiskt även ger p-vågshastigheter i berg mot djupet.

Resistivitet och IP

Resistivitmätningar utfördes av Torleif Dahlin och Kristofer Hellman, Lunds Tekniska Högskola. Totalt mättes tre parallella 500-meters linjer, en linje över vardera tunnelrör samt en linje mitt emellan tunnelrören.

Mätningarna har utförts av, som en del inom Strategiskt Forskningsprojekt – FORMAS 2010-2014 Geologiska och Ekologiska Kriterier för bedömning av Uthålligt Vägbyggande i ett Miljöperspektiv. I arbetet ingår att prova olika programvaror för inversmodellering/tolkning av mätdata från de elektriska och seismiska mätningarna, och utvärdera mervärdet av att kombinera metoderna.

Mätningen utfördes med standardutrustning för resistivitmätning med CVES-förfarandet och innefattande resistivitetinstrument, elektrodkablar med 5 m uttagsavstånd, elektroder, kopplingskablar och extern batterikälla, se Tabell 3 för

specifikationer. Mätningen gjordes med multipel gradientkonfiguration (Dahlin & Zhou 2006).

Tabell 3. Specifikationer för använd utrustning vid resistivitetsundersökning.

Urustning	Typ/modell
Resistivitetsinstrument	ABEM Terrameter LS
Elektroder	Rostfria
Kablar	4 st kablar med 21 uttag vardera med c/c 5 m

Bearbetning av resistivitetsdata utfördes av professor Torleif Dahlin och doktorand Kristofer Hellman från Lunds Tekniska Högskola och skedde med programvarorna Res2dinv och Res3Dinv, där resultatet från den senare som ger 3D-modeller presenteras här.

2.1.3 Tunnelkartering

För att möjliggöra kvantitativ jämförelse mellan prognos och verkligt utfall, samt att utvärdera korrelationen mellan de geofysiska undersökningarna och det verkliga utfallet, har data från kartering av tunneln under driftskedet inhämtats.

Följande data har inhämtats från kartering av tunneln:

- Foto
- Ritningar
- Q-basparametrar (RQD, J_n , J_a , J_r)

Kartering har skett efter varje salva där det varit möjligt, vilket i huvudsak innebär var tredje meter.

För jämförelse mot Q-klass i den bergtekniska prognosen har projektspecifika värden $J_w=1$ och $SRF=2,5$ används.

2.2 Visualisering, datahantering och blockmodellering

För att möjliggöra ett effektivt sätt att hantera, jämföra och visualisera data valdes ett arbetssätt taget från gruvindustrin, där denna typ av frågeställningar ingår i det dagliga arbetet. Valet landade på programvaran Gemcom Surpac av version 6.2.2. som köptes in genom Lunds Universitet av Torleif Dahlin.

2.2.1 Parametrar och inställningar

Modellen begränsas i z-nivå av markytmodellen och djupet på modellen är satt till 104 meter för att väl täcka in tunnelvolymen. Begränsning av modellen längs x-axeln (längs tunnellingjen) är satt till 658 meter för att väl täcka in hela tunnellingden och begränsning längs y-axeln är satt till 210 meter. Se Tabell 4 för de geometriska begränsningarna.

Tabell 4. Modellens geometriska begränsningar uttryckt i koordinatsystem RT90 gonV 0:-1 och höjdsystem RH70, vilket är gällande för projektet.

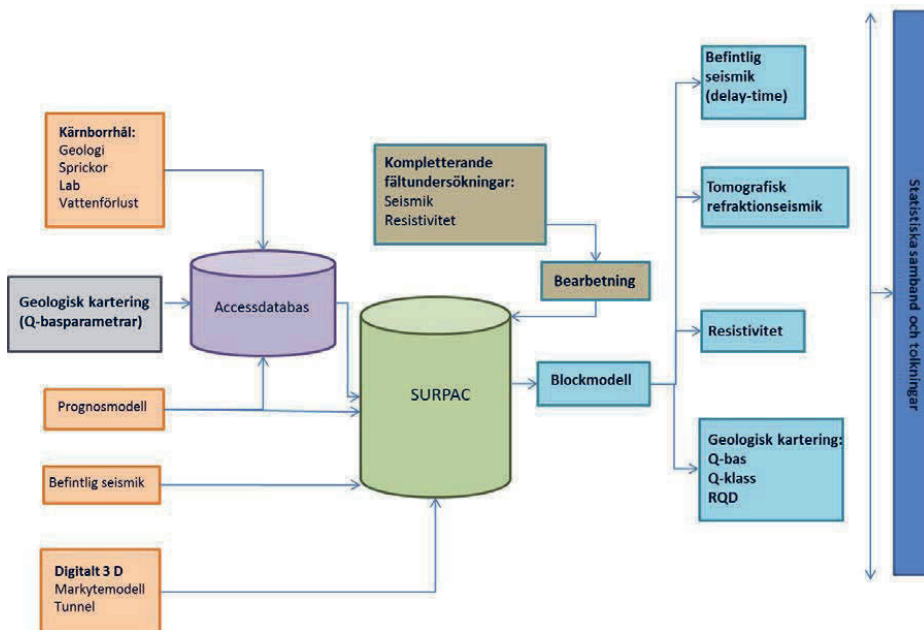
Geometriska begränsningar		
Axel	Koordinat min	Koordinat max
X	89827	90485
Y	6409460	6409670
Z	166	270

Storleken på blocken är satt till 8x8x8 meter för att erhålla en blockmängd inom modellens gränser som effektivt kan bearbetas utan att tappa för mycket upplösning i modellen. Subblockning används som standard med ett minimum av 1 meter. Tunnelvolymen representeras dock av block med en största storlek av 2x2x2 meter.

Modellen är roterad $-9,5^\circ$ runt z-axeln för att x-axeln skall hamna i tunnelinjen och därmed förenkla arbetet med modelleringen och bättre passa blockens utseende.

2.2.2 Uppbyggnad av databas och modell

Ett flödesschema över upplägget för databaser och modell redovisas i Figur 3.



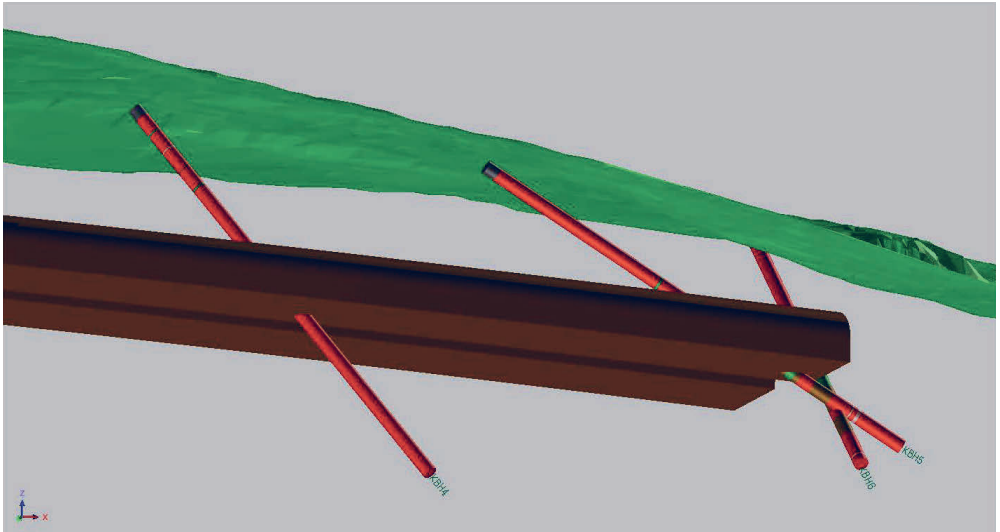
Figur 3. Flödesschema över upplägget för databas och modell.

Kärnborrhål

Följande information har lästs in:

- Borrhålskoordinater, orientering och längd
- Bergart
- Bergartsbeskrivning
- J_n , J_r , J_a , RDQ, sprickavstavstånd och Q-bas inläst per spricka

Exempel visas i Figur 4, där bergart visas för borrhålen.

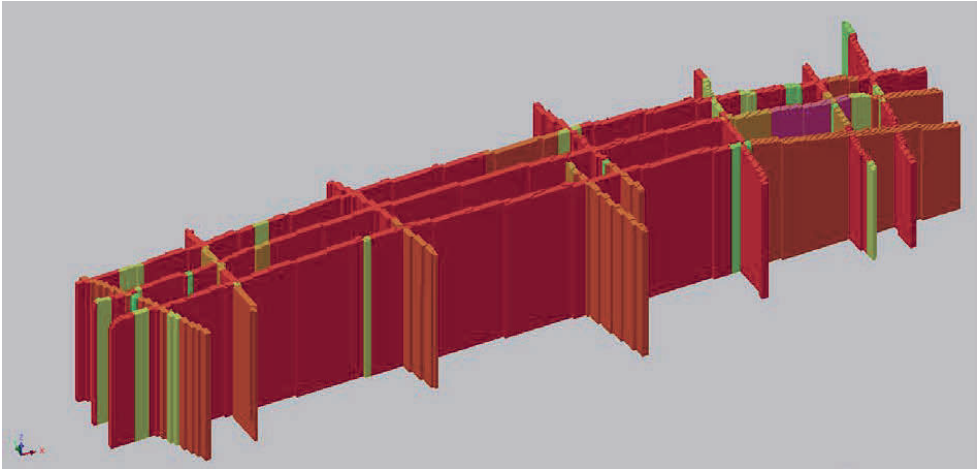


Figur 4. Figuren visar de två tunnelrörens (brun färg) lägen under markytan (grön färg). Tre av de sex kärnborrhålen syns som smalare objekt, som sträcker sig från markytan ned till en nivå under tunnelrören, och är uppfärgade med avseende på bergart.

Befintlig seismik

P-vågshastigheter från befintlig seismik har lästs in i Surpac som textfil. Hastigheterna har sedan extrapolerats till tunneldjupet och sparats i blockmodellen. Blocken inom varje tunnelvolym har sedan fyllts genom interpolationsmetoden "nearest neighbour".

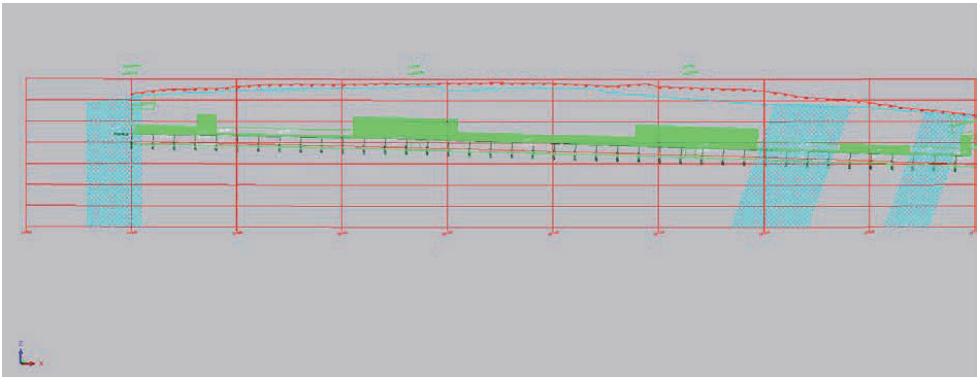
Exempel på befintlig seismik visas i Figur 5.



Figur 5. Inläst befintlig seismik där de olika färgerna representerar p-vågshastighet i berg som är extrapolerade ned till tunneldjup. Grön färg $< 3000 \text{ m/s}$, orange färg 3000-4800 m/s och röd färg p-vågshastighet $> 4800 \text{ m/s}$.

Bergteknisk prognos

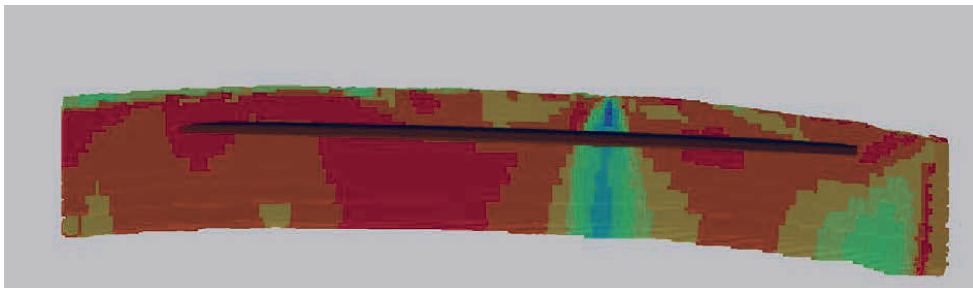
Den bergtekniska prognosritningen (DWG-format) vilken visar sektioner med prognosticerad q-klass < 4 har koordinatsatts och lästs in direkt i Surpac. Prognosticerade Q-klassintervall för varje tunnelrör längdsträcka har även lästs in via access för visualisering av intervall $Q=1-4$ och $Q=>10$, se Figur 6. Vid $Q>10$ har ett övre värde på 40 lagts in i databasen.



Figur 6. Prognosritning för norra tunnelröret. Blå partier representerar Q-klass 1-4. De gröna staplarna visar prognosticerat lägsta Q-värde inom varje Q-klass.

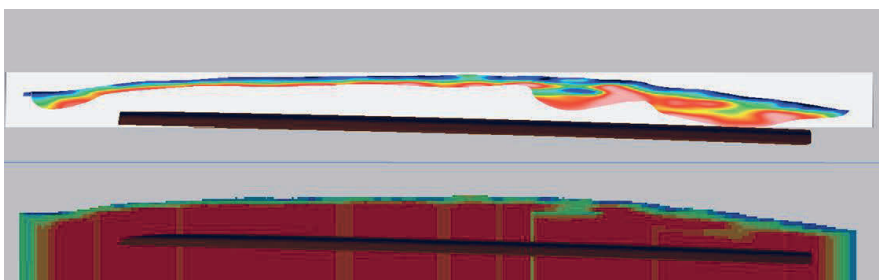
Kompletterande geofysik

P-vågshastigheter och elektrisk resistivitet har exporterats från respektive tolkningsprogramvara som textfil där varje värde är koordinatsatt. För resistivitet har sedan värdena lästs in till blockmodellen genom interpolationsmetoden "nearest neighbour" med en största sökradie på 20 meter, se Figur 7.



Figur 7. Blockmodell som visar interpolerad resistivitet. Varma färger representerar låg elektrisk ledningsförmåga vilket kännetecknar bra berg.

Tomografisk refraktionsseismik ger information om p-vågshastigheter även en bit ned i berggrunden men tolkade djup når dock ej ned till tunnelnivån. Värdena lästes därmed in i blockmodellen med interpolationsmetoden "nearest neighbour" med en största horisontell sökradie på 2 meter och en största vertikal sökradie på hela modellhöjden. P-vågshastigheter i modellen vid djupet för tunnelnivån har därmed extrapolerats ner från de djupast beräknade p-vågshastigheterna från Rayfractmodellen, Figur 8.



Figur 8. Överst visas den inlästa Rayfractmodellen och underst de till tunnelnivån interpolerade p-vågshastigheterna. Grön färg <math>< 3000 \text{ m/s}</math>, orange färg 3000-4800 m/s och röd färg p-vågshastighet >math>> 4800 \text{ m/s}</math>.

Tunnelkartering

Q-bas och RQD från tunnelkarteringen har lästs in i Surpac från Access-databasen. Block inom tunnelvolymerna har sedan fyllts med interpolationsmetoden ”nearest neighbour”, se Figur 9.



Figur 9. Blockmodell över norra tunnelröret visande Q-bas från driftskarteringen. Röd färg representerar Q-bas >10, gul färg representerar Q-bas 4-10.

2.3 Tillvägagångssätt för kvantitativ utvärdering

För att kvantifiera hur både de befintliga och de kompletterande geofysiska undersökningarna korrelerar mot verkligt utfall har en kvantitativ jämförelse utförts.

Parametrarna som sparats i blockmodellen (p-vågshastigheter, resistivitet och karterad bergkvalitet) har jämförts mot varandra för respektive block för att korrelera hur väl de stämmer överens.

Utvärderingen har gjorts grafiskt med hjälp av diagram där parvärden har jämförts mot varandra.

2.3.1 Seismik

För jämförelse av p-vågshastighet mot karterad Q-bas har p-vågshastighet omräknats till Q-bas genom samband enligt Barton (2006, 2009):

$$Q = \log V_p - 3,5$$

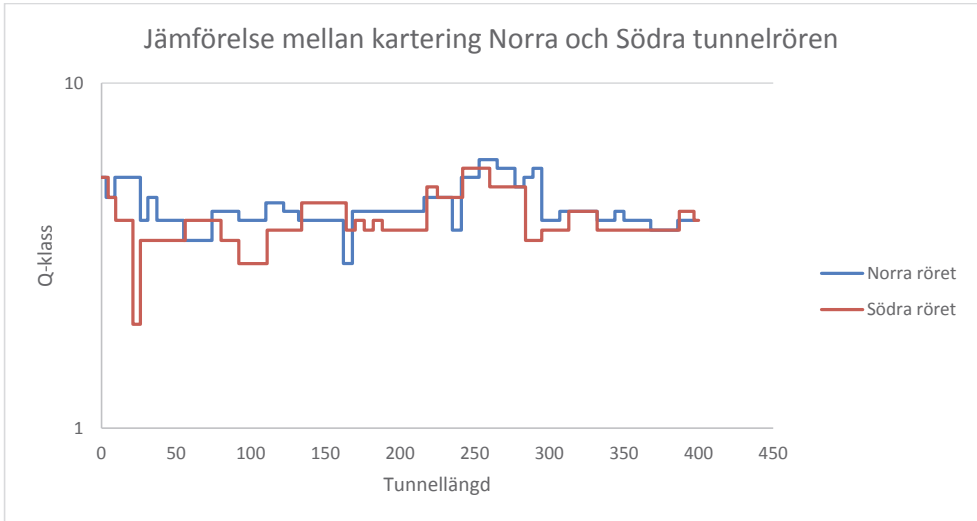
där V_p är p-vågshastigheten i berg uttryckt i km/s.

2.3.2 Resistivitet

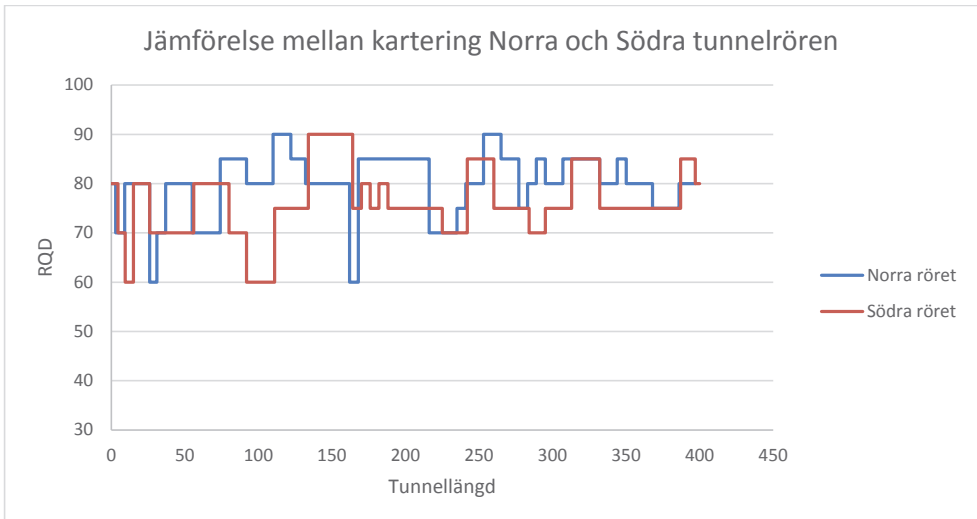
Bra sprickfritt kristallint berg kännetecknas av höga resistiviteter ofta högre än 5000 Ωm . Uppmätt resistivitet, uttryckt i Ωm plottades mot karterad Q-bas för de båda tunnelrören.

3 RESULTAT

Resultatet från kartering av tunneln visar att berget generellt är av god kvalitet med Q-klass mellan 3-6 och RQD över 60 enligt Figur 10 och 11.

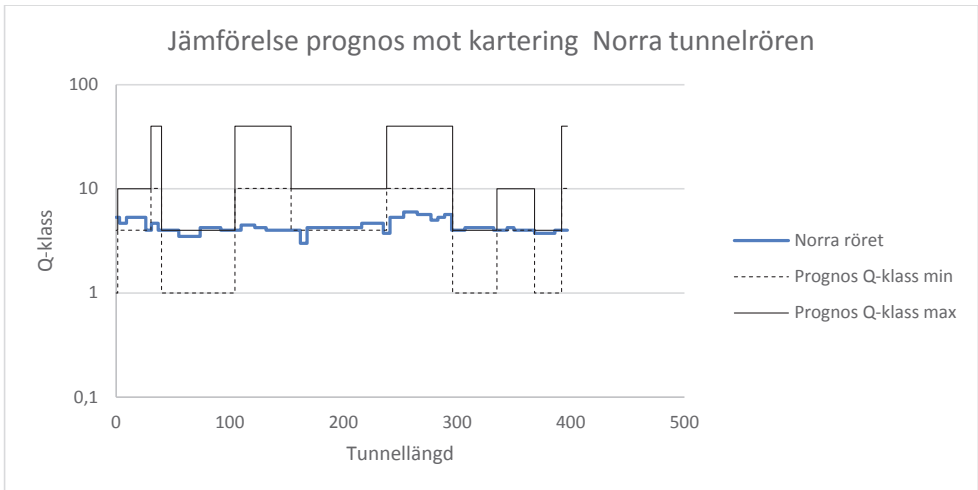


Figur 10. Karterad Q-klass under tunneldriften.

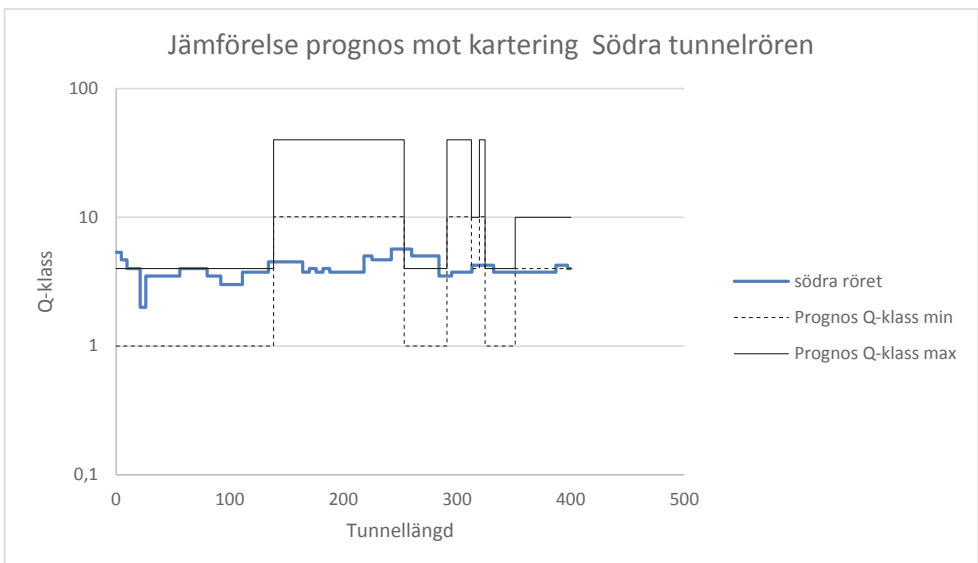


Figur 11. Karterad RQD under tunneldriften.

En jämförelse mellan karterad Q-klass och Q-klass från bergtekniska prognoser för det norra respektive det södra tunnelröret visas i Figur 12 och Figur 13.



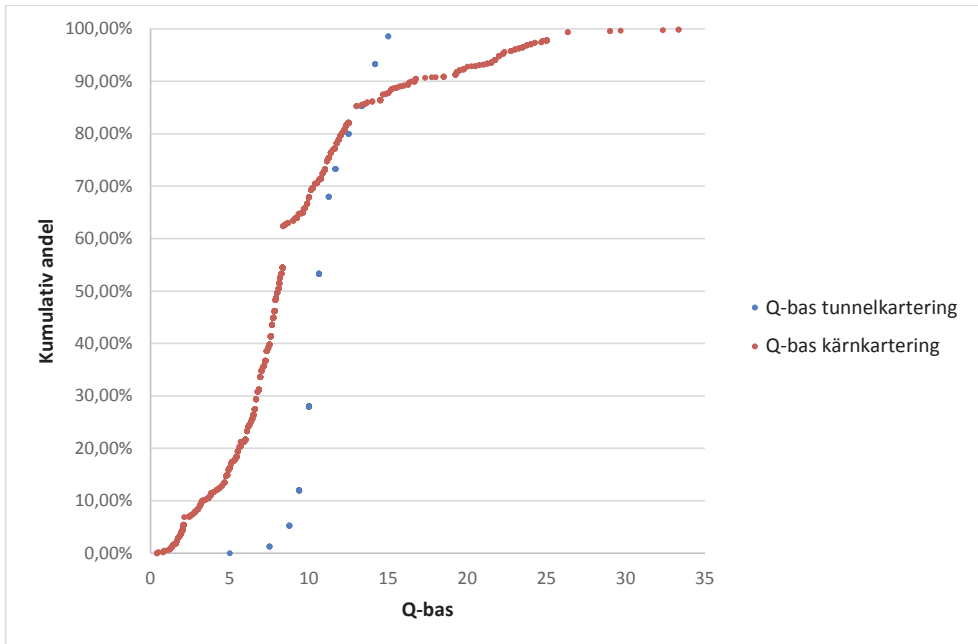
Figur 12. Jämförelse mellan Q-klass från bergteknisk prognos och kartering i norra tunnelröret.



Figur 13. Jämförelse mellan Q-klass från bergteknisk prognos och kartering i södra tunnelröret.

I den bergtekniska prognosen har traditionell refraktionsseismik ingått jämte Q-bas parametrar insamlade från borrhälar, kartering av hållar och vattenförlustmätningar. Någon egentlig redogörelse för hur den traditionella refraktionsseismiken tolkats vid bedömning av Q-klass framgår ej av bakgrundsmaterialet. Den bergtekniska prognosen överensstämmer (ligger inom max-min intervallet) längst ca 57 % av tunnellängden för norra röret respektive ca 38 % för det södra röret, vilket innebär att prognosen totalt sett stämmer på 47 % av den totala tunnelsträckan (377 meter av totalt 797 meter tunnel). Över hela tunnelsträckan visar prognosen generellt sett på bättre berg än det verkliga utfallet från tunnelkarteringen visar.

En jämförelse mellan karterade Q-basparametrar från kärnboring jämfört med karterade Q-basparametrar under tunneldriften visar dock en god överensstämmelse av den generella bergkvaliteten, Figur 14. Medel för Q-bas från tunnelkartering är 11 medan kärnkartering uppvisar ett medel för Q-bas på 9.



Figur 14. Jämförelse mellan Q-bas från tunnelkartering och Q-bas från kärnkartering.

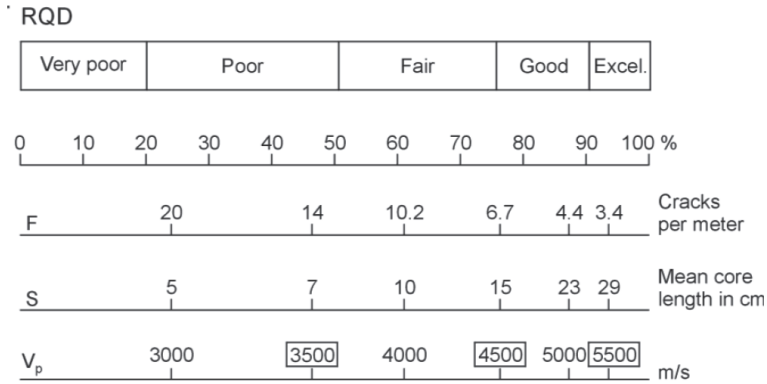
3.1 Kvantitativ utvärdering mellan geofysiska metoder och verkligt utfall

Nedan presenteras respektive metod var för sig mot verkligt utfall från tunnelkarteringen.

3.1.1 Tunnelkartering jämfört med traditionell seismik med avseende på Q-bas och RQD

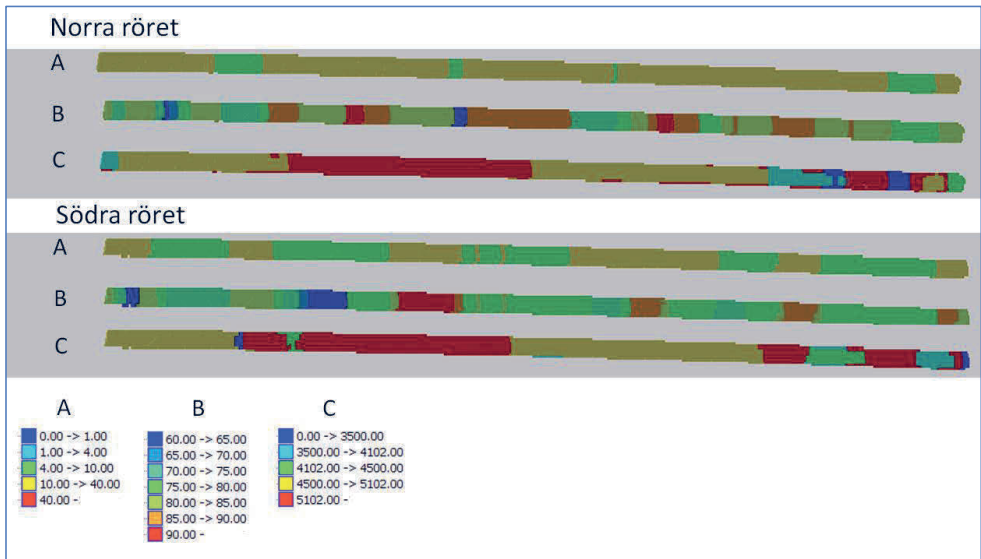
Den traditionella seismiken indikerar att ca 8 % norra tunnelröret har Q-bas <1, det vill säga en p-vågshastighet under 3500 m/s. För det södra tunnelröret är motsvarande siffra 3,4 %. Detta motsvarar totalt ca 32 meter tunnel i norra röret och 14 meter tunnel i det södra röret.

Barton, 2006 med referenser (exempelvis Sjögren m.fl., 1979), visar ett tydligt samband mellan RQD och p-vågshastighet i kristallin berggrund grundare än 20 meter, Figur 15. En p-vågshastighet <3500 m/s motsvaras av ett värde på RQD <45.



Figur 15. Samband mellan seismisk p-vågshastighet och RQD.

Resultaten från tunnelkarteringen visar inga partier med Q-bas <1 eller RQD <45, se Figur 16 samt Tabell 5.



Figur 16. Visuell jämförelse mellan karterad Q-bas och RQD samt p-vågshastigheter från traditionell seismik. A representerar karterad Q-bas, B representerar karterad RQD och C representerar p-vågshastighet.

Tabell 5. Tabell över jämförelser av tunnelkartering mot traditionell seismisk p-vågshastighet och RQD.

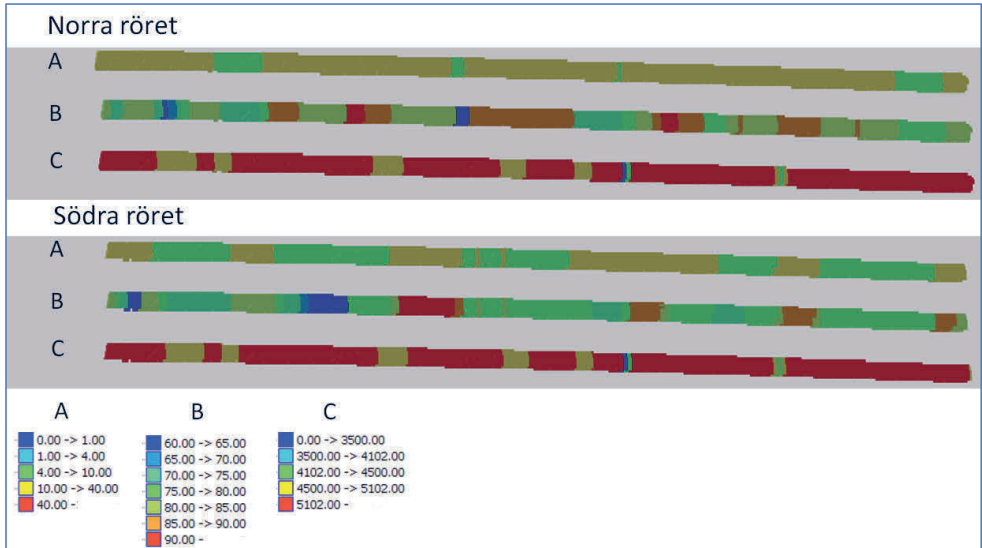
	Norra tunnelröret	Södra tunnelröret	Total tunnellängd
Sträcka karterad Q-bas<1	0	0	0
Sträcka karterad RQD<45	0	0	0
Sträcka traditionell seismik $V_p < 3500$, vilket motsvarar Q<1 och RQD<45	32	14	56

3.1.2 Tunnelkartering jämfört med tomografisk refraktionsseismik med avseende på Q-bas och RQD

Den tomografiska refraktionsseismiken indikerar att ca 0,5 % norra tunnelröret har Q-bas <1, det vill säga en p-vågshastighet under 3500 m/s. Samma gäller för det södra tunnelröret. Detta motsvarar totalt ca 2 meter tunnel i norra respektive södra röret.

Enligt sambandet mellan p-vågshastighet och RQD i kristallin berggrund grundare än 20 meter, Figur 17, motsvarar en p-vågshastighet <3500 m/s av ett värde på RQD <45.

Resultaten från tunnelkarteringen visar inga partier med $Q\text{-bas}<1$ eller $RQD<45$, se Figur 17 samt tabell 6.



Figur 17. Visuellt jämförelse mellan karterad Q-bas och RQD samt p-vågshastigheter från tomografisk refraktionsseismik. A representerar karterad Q-bas, B representerar karterad RQD och C representerar p-vågshastighet.

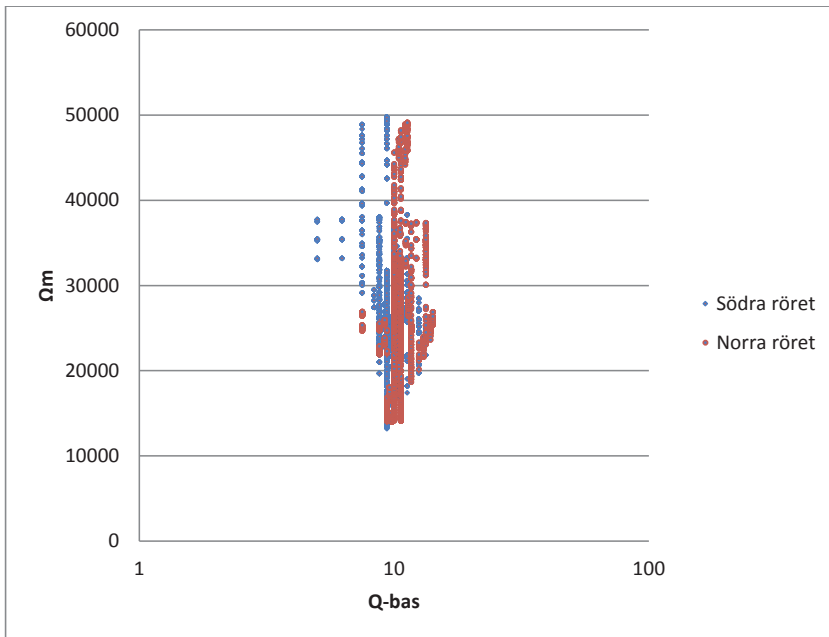
Tabell 6. Tabell över jämförelser av tunnelkartering mot tomografisk refraktionsseismisk p-vågshastighet och RQD.

	Norra tunnelröret	Södra tunnelröret	Total tunnellängd
Sträcka karterad Q-bas<1	0	0	0
Sträcka karterad RQD<45	0	0	0
Sträcka tomografisk refraktionsseismik $V_p<3500$, vilket motsvarar $Q<1$ och $RQD<45$	2	2	4

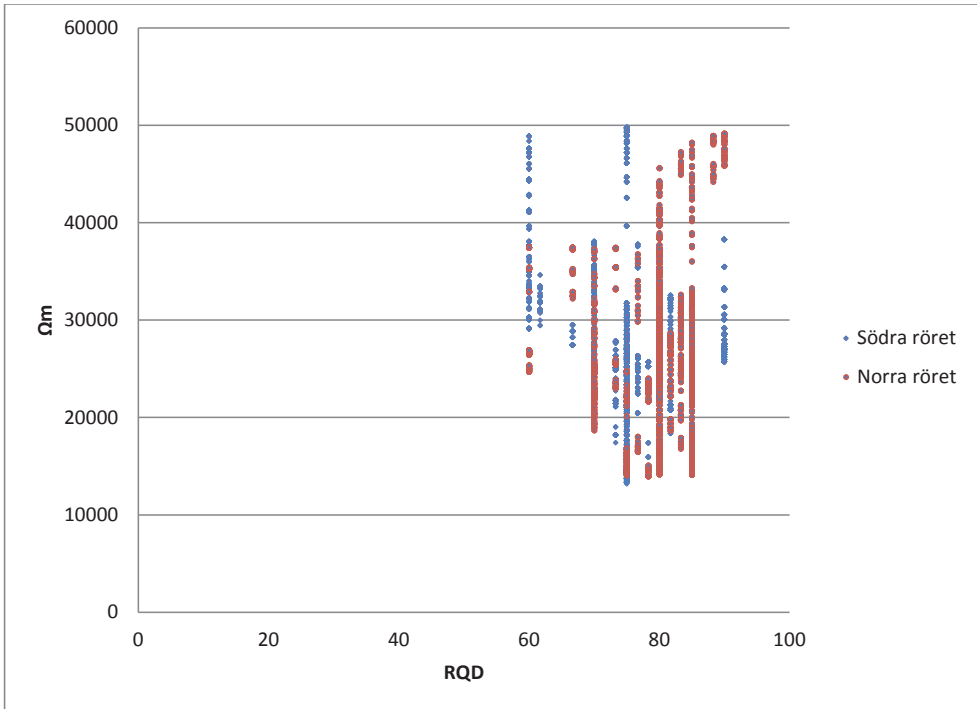
3.1.3 Tunnelkartering jämfört med resistivitetsmätningar med avseende på Q-bas och RQD

Samtliga uppmätta resistiviteter som representerar berg har värden $>10000 \Omega\text{m}$ vilket indikerar berg av god kvalitet. Resistivitetsdata för ett område togs bort, mellan koordinater E 90168 till 90217, på grund av kraftiga störningar i markytan som påverkade modellen även på djupet.

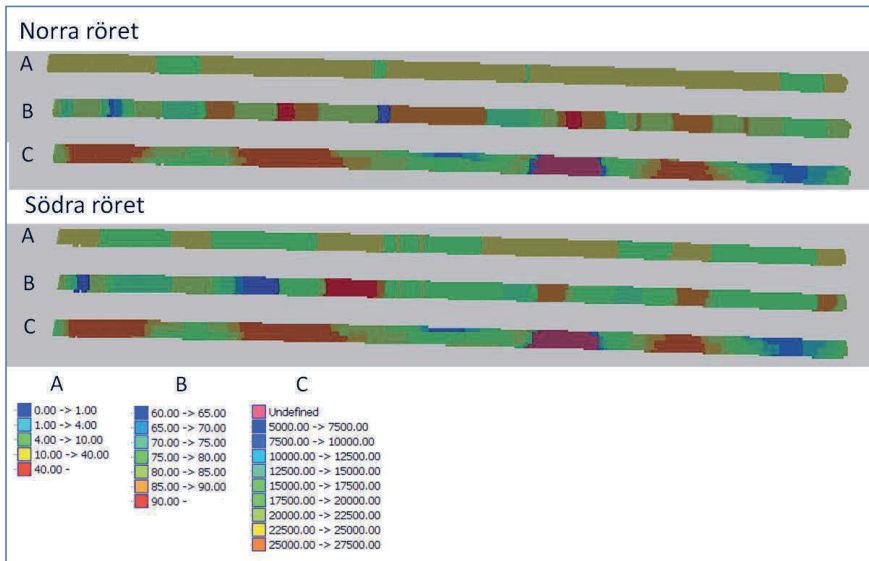
Resistiviteten i berg varierar kraftigt mellan olika miljöer. Eventuella zoner med ökad sprickfrekvens (vattenfyllda under grundvattenytan) samt sprickomvandlingar och lerfyllda sprickor förväntas synas som en relativt lägre resistivitet. Typisk resistivitet för ovittrad gnejs ligger $>1000 \Omega\text{m}$. För en kvantitativ tolkning av resultatet har antagits att områden med ökad sprickfrekvens/sprickomvandling relevant för en sänkning av bergkvalitén ligger $<5000 \Omega\text{m}$. I förekommande fall har inga områden med relativt sett lägre resistivitet identifierats. Resultaten visas i Figurer 18-20.



Figur 18. Karterad Q-bas mot beräknad resistivitet.



Figur 19. Karterad RQD mot beräknad resistivitet.



Figur 20. Visuell jämförelse mellan karterad Q-bas och RQD samt beräknade resistiviteter. A representerar karterad Q-bas, B representerar karterad RQD och C representerar resistivitet angivet som Ωm . "Undefined" är störd data som filterats bort.

4 DISKUSSION

4.1 Kartering och bergteknisk prognos mot verkligt utfall

Q-systemet är förenat med osäkerheter. Dock visar tidigare studier att bestämning av Q-parametrar är säkrare vid bra bergförhållanden jämfört med sämre bergförhållanden (Malmtorp och Lundman, 2010). I förekommande fall har bergförhållandena varit gynnsamma. Vidare har Q-parametrar J_n , J_w och SRF varit projektspecifika. RQD har mätts som linjekartering i tunnelvägg, varför endast J_r och J_a har varit föremål för bedömning. Fotodokumentation från tunnelkarteringen visar även relativt gynnsamma och enhanda bergförhållanden vilket innebär att karteringsunderlaget bedöms som pålitligt.

Den bergtekniska prognosen pekade mot bergförhållanden som var något bättre än det verkliga utfallet. Det går dock inte att spåra hur information från data som ej hämtats från Q-basparametrar från kärnkartering viktats. Vid jämförelse av karterade Q-basparametrar i borrkärnor mot tunnelkarteringen stämmer visat data god överensstämmelse dock med större spridning från borrkärnorna. Spridningen är sannolikt orsakad av skalfaktorer där kartering gjorts per salvlängd (3 meter) och borrhålskartering gjord per 1 meter.

4.2 De geofysiska undersökningarnas användbarhet vid upprättandet av bergkvalitetprognoser

4.2.1 Traditionell refraktionsseismik

Den traditionellt utvärderade seismiken tenderade att underskatta bergkvaliteten. Zoner med tolkad p-vågshastighet <3500 m/s vilka otvetydigt innebär kraftigt uppsprucket berg har inte återfunnits på tunneldjup. Detta kan förklaras med att p-vågshastigheter och Q-värde tenderar att öka mot djupet (Barton N., 2006) men ingen hänsyn tagits till detta vid tolkningen. Vidare förutsätter de seismiska undersökningarna att eventuella zoner, identifierade som områden med p-vågshastigheter <3500 m/s, är orienterade så att de påträffas i tunneln för att resultatet skall vara användbart.

I huvudsak anges meningsfullt djup för tolkning av korrelation mellan p-vågshastighet i berg och RQD och sprickfrekvens ned till ca 20-30 meters djup (Sjögren m. fl., 1979 och Sjögren, 1984). Ju större djup tunneln är belägen på, desto mindre bör korrelationen vara mellan uppmätt p-vågshastighet på markytan och bergkvalitet i tunnelnivå. I aktuellt fall är djupet till tunneltak ca 20 meter vilket ligger nära gränsen för en säker korrelation.

4.2.2 Tomografisk refraktionsseismik

Tomografisk tolkning av refraktionsseismisk data är ett alternativ till konventionella analysmetoder. Metoden fungerar bra i situationer där de konventionella metoderna fallerar på grund av att de horisontella eller vertikala hastighetsgradienterna utgör en större del av hastighetsstrukturen. Metoden använder sig av iterativ spårning av den

vågen vågen tar. Hänsyn tas därmed även till vågor som inte har kortast restid (Sheehan m. fl., 2005).

Den tomografiska modellen beräknar p-vågshastigheten i berg en bit under bergets överyta, i aktuellt fall mellan 5-10 meter. Generellt är p-vågshastigheterna i berg i modellens underkant högre än vad traditionell seismik visade, i genomsnitt ca 5500 m/s jämfört med 4900 m/s för traditionell seismik.

Den tomografiska modellen överensstämmer därmed bättre med verkligt utfall.

4.2.3 Resistivitet

Resistivetsmätningen detekterade inga zoner som kunde tolkas som berg med nedsatt bergkvalitet. Den generellt höga resistiviteten indikerar snarast mycket bra bergkvalitet med låg sprickfrekvens och obefintlig grad av sprickomvandling.

Få studier har jämfört bergkvalitet hos kristallin berggrund mot resistivitet. En publicerad rapport från Hallandsåsen (Danielsen och Dahlin, 2009) visar att gnejs av god kvalitet har en resistivitet mellan 4000-10 000 Ωm medan en zon med dålig bergkvalitet kan 250-600 Ωm .

Resultatet från resistivetsmätningarna korrelerar väl mot det verkliga utfallet.

4.2.4 Osäkerheter och felkällor

Seismisk gånghastighet påverkas av flera faktorer än bara sprickegenskaper. Viktiga faktorer att ta hänsyn till är till exempel anisotropi i p-vågshastigheter beroende på mätriktning i förhållande till sprickriktning och bergspänningsförhållanden. Vidare påverkar faktorer som E-modul och densitet p-vågshastigheten. Någon hänsyn till detta har inte tagits vid användandet av det empiriska sambandet mellan Q-bas och p-vågshastighet.

Ulricehamnstunnelns bergtäckning uppgår generellt till ca 20 meter vilket ligger nära den gräns inom vilken refraktionsseismiska undersökningar från markytan kan anses relevanta vad gäller bedömning av bergkvalitet.

5 SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

Undersökningen visar att:

- Konventionell tolkning av refraktionsseismik har i detta fall påvisat svaghetszoner som ej bekräftats vid kartering av tunneln.
- Tomografisk refraktionsseismik korrelerar bättre mot bergkvalitet i tunnelnivå men försiktighet bör tas vid tolkning där bergtäckningen överstiger 25 meter. Metoden beskriver djupare delar av bergmassan jämfört med den traditionella refraktionsseismiska tolkningen, dock ej mer än 5-10 meter djupare.
- Resistiviteten beskriver bergmassan väl och har förmåga att se mäta förhållanden på större djup, i detta fall vid tunnelnivå. I denna studie mättes flera parallella linjer för att möjliggöra en tredimensionell tolkning.
- För att få en säkrare bedömning av bergkvalitet mot djupet bör tomografisk refraktionsseismik i kombination med resistivitetsmätningar användas snarare än traditionell refraktionsseismik.

6 REFERENSER

Barton, N., 2006: Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy. Taylor & Francis group, London, UK

Barton, N. 2009: Integrating Q-logging with seismic refraction, permeability, pre-grouting, tunnel and cavern support needs, and numerical modelling of performance.

Dahlin, T., Zhou, B., 2006: Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging, Near Surface Geophysics, 4, 113-123.

Danielsen, B.E., 2010: The applicability of geoelectrical methods in pre-investigation for construction in rock. Ph. D. Thesis Lund University

Rohdewald, S.R., 1999: Rayfract manual.

Rønning, J. S., Ganerød, G. V., Dalsegg, E., Reiser, F., 2013: Resistivity mapping as a tool for identification and characterisation of weakness zones in crystalline bedrock: definition and testing of an interpretational model. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73(4), 1225-1244.

Sheehan, R. J., William. E. D., Wayne. A.M., 2005: An evaluation of methods and available software for seismic refraction tomography analyses. Journal of environmental and engineering geophysics Vol 10 (1), 21-34.

Sjögren, B., Öfthus, A., Sandberg, J., 1979: Seismic classification of rock mass quality. Geophys. Prospect., 27, 409-442.

Trafikverket (2011-04-11): Förfrågningsunderlag Teknisk beskrivning Väg 40 km 6/800-13/970, Väg 40 Borås-Ulricehamn delen Dällebo-Hester, etapp 2, Västra Götalands län handling 11.1, Objektnr 85 43 60 30, Chaosnr 2C110001



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

info@befoonline.org • www.befoonline.org
Besöksadress: Storgatan 19

ISSN 1104-1773