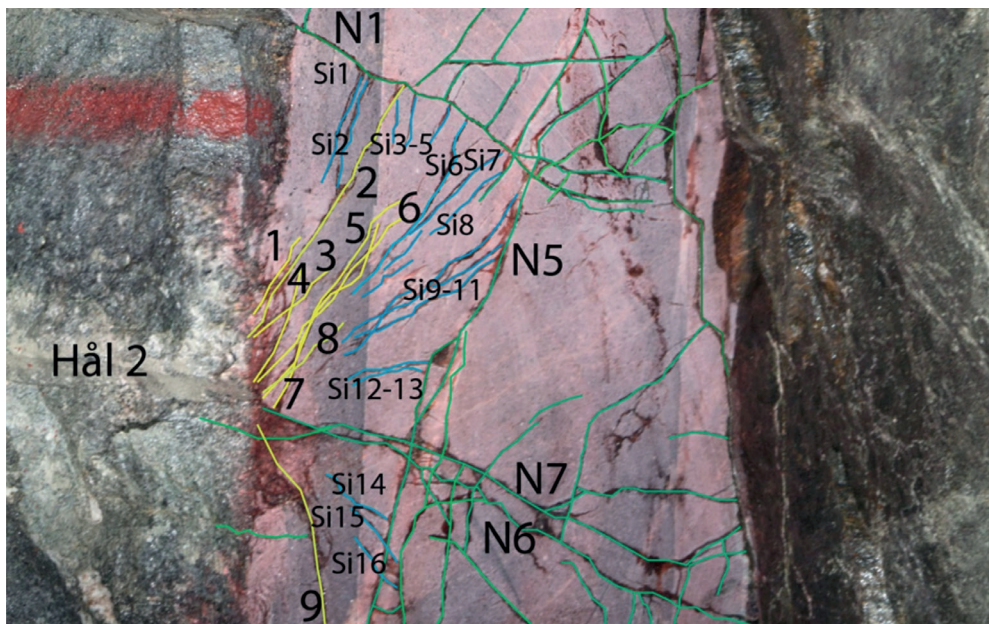




UNDERSÖKNING AV SPRÄNGSPRICKOR FRÅN MEKANISERAD LADDNING MED BULKEMULSION I ÄSPÖLABORATORIET OCH KISTATUNNELN

Henrik Ittner
Anders Bouvin
Bernt Wernby

Omslagsbild: Figur nr. 24 i rapporten.

UNDERSÖKNING AV SPRÄNGSPRICKOR FRÅN MEKANISERAD LADDNING MED BULKEMULSION I ÄSPÖLABORATORIET OCH KISTATUNNELN

**Investigation of blast fractures from mechanized
charging with emulsion in Äspö HRL and the
Kista tunnel**

Henrik Ittner

Anders Bouvin

Bernt Wernby

FÖRORD

Den sprängning som utförs i samband med bergarbeten orsakar inte bara det önskade hålrummet utan anslutande berg påverkas också. Skadezonen utgör en påverkad zon med mer eller mindre uppsprucket berg vars betydelse i samband med projektering, byggnation och drift av anläggningen inte bör underskattas. En omfattande skadezon kan innebära att den utsprängda geometrin skiljer sig väsentligt mot den önskade, vidare kan det innebära ett ökat förstärkningsbehov och ökande insatser för bergrensning. Bedömning av hur omfattande skadezonen kommer att bli p.g.a. sprängning utgår idag från en så kallad skadezonstabell som baseras på andra sprängämnen än pumpemulsion som är det vanligaste förekommande idag. Vid dagens bergarbeten används i princip uteslutande pumpemulsion vid sprängning, så här behövs ny kunskap om hur skadezonen påverkas i dessa fall.

Med stöd av en skadezonstabell som är anpassad för pumpemulsion och kontrollerad laddning, skulle skadezon och påverkan på tunnelkontur minimeras vilket innebär vinster i ekonomi, arbetsmiljö och miljö. Fördelar som kommer att bidra till en säkrare och mer effektiv tunnelproduktion med högre kvalitet.

Detta forskningsprojekt syftar till att utvärdera utbredningen av skadezonen för olika koncentrationer av emulsionssprängämne vid tunneldrivning för att få data och en ökad förståelse för hur emulsion påverkar bergmassan runt tunneln. Detta kan sedan ligga till grund för framtida arbeten med en skadezonstabell. Projektet har genomförts i två steg med kartering i två befintliga tunnlar, i Äspölaboratoriet och senare i en avlopps- och dagvattentunnel som Veidekke driver i Kista.

Fält- och utredningsarbete har utförts av Henrik Ittner (SKB), Anders Bouvin (Forcit Sweden AB) och Bernt Wernby (Forcit Sweden AB) tillsammans med flera anlitade specialister. En referensgrupp bestående av Lars Martinsson (Trafikverket), Mats Olsson (EDZ Consulting), Magnus Felldin (tidigare Veidekke), Pål Drevland (Statens Vegvesen Norge), Arild Neby (Statens Vegvesen Norge), Daniel Johansson (Swebrec/Luleå Tekniska Universitet), Ulf Nyberg (Swebrec/Luleå Tekniska Universitet) och Per Tengborg (BeFo) har bidragit med värdefulla synpunkter under arbetets gång. Projektet har finansierats av Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo) och Statens Vegvesen med kontanta medel medan SKB och Forcit gått in med naturainsats.

Stockholm
Patrik Vidstrand

SAMMANFATTNING

Den här rapporten sammanfattar resultat från ett projekt som drivits av Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) tillsammans med Forcit Sweden AB. Projektets syfte har varit att utvärdera utbredning av sprängskador från emulsionssprängämne under realistiska förhållanden vid tunneldrivning. Projektet har haft ambitionen att dokumentera hela processen vid sprängning, från sprängämnets egenskaper till laddningsmängd och påverkan på berget och med detta bidra till att öka förståelsen för vilka parametrar som påverkar utbredning av sprängskador i kvarstående berg vid laddning med emulsionssprängämne.

Fältstudier har genomförts vid två olika platser, i SKBs försöksanläggning Äspölaboratoriet och i samband med byggandet av en avlopps- och dagvattentunnel i Kista. Tunnelarna drevs med samma typ av emulsionssprängämne men med olika syften och kravbild. Fältförsöket vid Äspölaboratoriet innefattade undersökning av sprickutbredning från emulsionssprängämne i två befintliga experimenttunnlar. Tunnelarna drevs under 2012 och byggprocessen dokumenterades noggrant. Kravbilden för de nya experimenttunnlarna fokuserade på att minimera sprängskada i kvarstående berg och därför användes elektroniska sprängkapslar och simultan upptändning i konturen. I Kistatunneln genomfördes fältförsöket under byggskedet. Under försöket modifierades laddplanen i ett antal salvor. Konturhål i tunnelväggen laddades hårdare än normalt med 0,8 kg/m respektive 1,2 kg/m istället för konventionell konturladdning.

I tunnelarna öppnades totalt tio undersökningsslitsar, fem på varje arbetsplats. I slitsarna karterades sedan sprängsprickor och naturliga sprickor. Kartering av sprängsprickor visar en spricklängd upp till 24,5 cm för tunnelarna i Äspölaboratoriet och upp till 40 cm i Kistatunneln. Resultaten skiljer sig mellan de två tunnelarna, med fler detonerade hål och en jämnare fördelning av spricklängd i Äspölaboratoriet jämfört med Kistatunneln. Orsaken kan vara tändspridning i stötvågs-sprängkapslar. Här finns exempelvis möjlighet att ett mitthål av tre närliggande hål detonerar i luften när de omgivande hålen redan brutit berget. Baserat på detta finns anledning att anta att skadezonen runt tunnelkonturen skiljer sig mellan tunnlar drivna konventionellt med stötvågskapslar jämfört med simultan upptändning med elektroniska sprängkapslar. Konventionellt drivna tunnlar kan, baserat på dessa två studier, antas ha färre konturhål med fullt utvecklad sprickbildning. Spricklängden kan dock förväntas vara längre för dessa hål. Det här arbetet bekräftar behovet av fortsatta studier i olika geologiska miljöer och med olika designparametrar för borrhning, laddning och upptändning.

Nyckelord: Skadezon, Emulsionssprängämne, Laddning, Tunneldrivning, VOD

SUMMARY

This report summarizes results from a project run by the Swedish Nuclear Fuel Management Co (SKB) together with Forcit Sweden AB. The aim of the project was to evaluate the extension of blast damage from emulsion explosives under realistic conditions in tunneling. The projects ambition has been to document the blasting process, from properties of the explosive to charge concentration and the impact on the rock mass and thereby contribute to the understanding of the parameters that affect the extension of blast fractures when charging with emulsion explosives.

Field studies have been conducted at two different sites, in SKB's test facility Äspö HRL and during the construction of a wastewater tunnel in Kista. The tunnels were excavated with the same type of emulsion explosive but with different purposes and requirements. The investigation at Äspö HRL included mapping of blast fractures from emulsion explosives in two existing experimental tunnels. The tunnels were excavated in 2012 and the construction process was well documented. The construction requirements for the new experimental tunnels focused on minimizing blast damage and therefore electronic detonators and simultaneous initiation was used in the contour holes. In the Kista tunnel a field test was conducted during the construction phase. During the test, the charging plan was modified in a number of rounds. Contour holes in the tunnel wall were charged with higher charge concentration than normal, 0,8 and 1,2 kg/m respectively.

In the tunnels a total of ten investigation slots were opened, five on each site. In the slots, blast fractures and natural fractures were mapped. The results from mapping show a fracture length of up to 24,5 cm for the tunnels in the Äspö HRL and up to 40 cm in the Kista tunnel. The results differ between the two sites, with more detonated holes and a more even distribution of fracture length in Äspö HRL compared with the Kista tunnel. There is for example a possibility that a contour hole between two holes that detonate slightly earlier do not have to do much work in order to break the rock. Based on this there is reason to assume that the damage zone around the tunnel contour differ between tunnels excavated conventionally with pyrotechnical detonators compared to smooth blasting, with simultaneous initiation by means of electronic detonators. Conventionally excavated tunnels can, based on these two studies, be assumed to have fewer contour holes with fully developed fracturing. The fracture length could however be expected to be longer for those holes. This work confirms the need for further studies in different geological environments and with different design parameters for drilling, charging and initiation.

Key words: Damage zone, Emulsion explosives, Charging, Tunnel excavation, VOD.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD.....	i
SAMMANFATTNING.....	iii
SUMMARY	v
1 INLEDNING.....	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Kort om bergsprängningsteori och sprängsprickor.....	3
1.3 Metod för laddning och sprängämnets egenskaper	7
2 SPRÄNGSKADEUNDERSÖKNING I ÄSPÖLABORATORIET.....	9
2.1 Platsförhållanden	9
2.2 Krav och toleranser.....	10
2.3 Sprängdesign	12
2.4 Laddning och kalibrering.....	13
2.5 Borring.....	14
2.6 Omskjutningar av konturhålen i studien.....	15
2.7 Uttag och kartering av slitsar.....	16
3 FÄLTFÖRSÖK OCH SPRÄNGSKADEUNDERSÖKNING I KISTATUNNELN.....	21
3.1 Inledning.....	21
3.2 Sprängdesign	21
3.3 Laddning av försökssalvor.....	22
3.4 Uttag och kartering av slitsar.....	23
4 RESULTAT	29
4.1 Laddningsprecision i TAS04 och TASN (Äspö).....	29
4.2 Sprängsprickor.....	29
4.3 Terminering för sprängsprickor i Kistatunneln	30
4.4 Mätning av VOD i Kistatunneln och Kankbergsgruvan	32
5 DISKUSSION OCH SLUTSATSER.....	35
6 ERKÄNNANDEN	39
7 REFERENSER.....	41

BILAGA I RESULTAT FRÅN KARTERING AV SPRÄNGSPRICKOR ÄSPÖ.....	43
BILAGA II RESULTAT FRÅN GEOLOGISK KARTERING ÄSPÖ.....	53
BILAGA III RESULTAT FRÅN KARTERING AV SPRÄNGSPRICKOR KISTA.....	64
BILAGA IV VOD-MÄTNINGAR I KISTA OCH KANKBERG	76
BILAGA V BORRPLAN OCH TÄNDPLAN.....	80

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

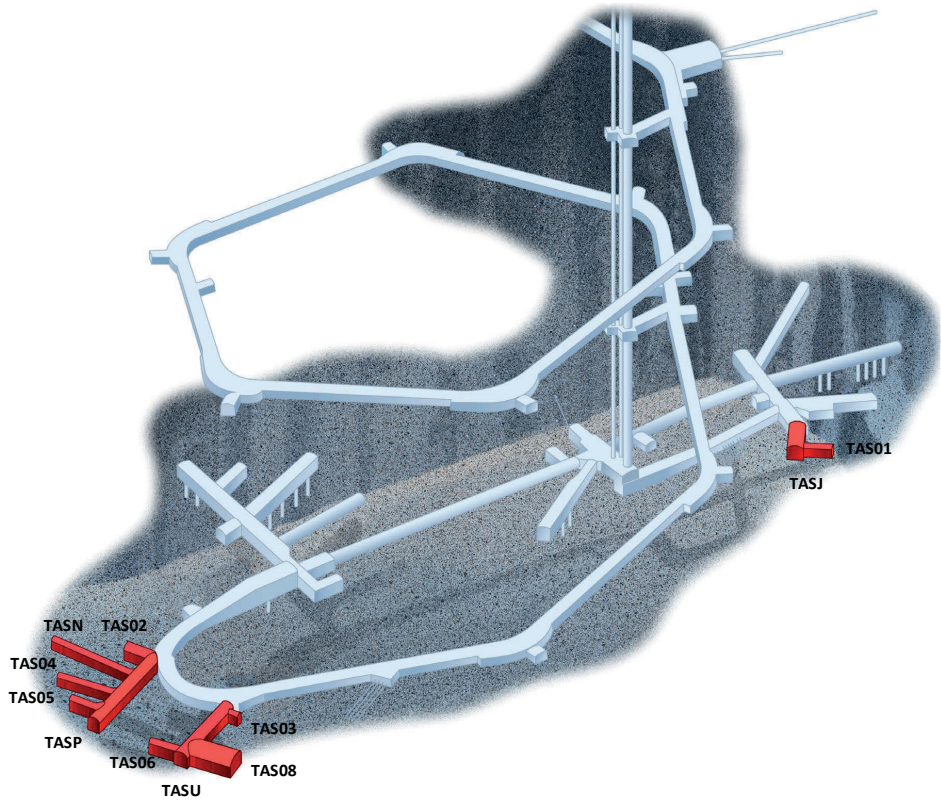
Begränsning av sprängskada i kvarstående berg är en viktig kvalitetsfaktor som kan minska behov av bergförstärkning och underhåll i en berganläggning. Frågeställningen är också viktig för långsiktig säkerhet i samband med byggandet av SKBs planerade slutförvar för använt kärnbränsle.

Den här rapporten redovisar resultat från BeFo-projektet *Underlag till skadezonstabell för emulsionssprängämne i bergtunnlar*, som är ett sammarbetsprojekt mellan Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) och ForcIt Sweden AB. Projektet syftar till att utvärdera utbredning av sprängskador från emulsionssprängämne under realistiska förhållanden vid tunneldrivning. Fältstudier har genomförts vid två olika sites, två försökstunnlar i Äspölaboratoriet och i samband med byggandet av en avlopps- och dagvattentunnel i Kista. Tunnlarna har drivits med samma typ av emulsionssprängämne.

Data för spricklängder från emulsionssprängämne finns sedan tidigare framtaget främst för klenare laddningar ovan jord, exempelvis Ouchterlony et al. 2010. Teoretisk spricklängd från större laddningar kan beräknas genom extrapolering. Projektets ambition har därför varit att dokumentera hela processen vid sprängning, från sprängämnets egenskaper till laddningsmängd och påverkan på berget och med detta bidra till att öka förståelsen för vilka parametrar som påverkar utbredning av sprängskador i kvarstående berg vid laddning med emulsionssprängämne.

Vid fältförsöken har slitsar sågats ut i sektioner med synliga borrhypor. På de sågade ytorna har sedan sprängsprickor karterats vid borrhyporna. Fältförsöket vid Äspölaboratoriet innefattade undersökning av sprickutbredning från emulsionssprängämne i två befintliga experimenttunnlar. Tunnlarna (Figur 1) drevs under 2012 och byggprocessen dokumenterades noggrant. Kravbilden för de nya experimenttunnlarna fokuserade på att minimera sprängskada i kvarstående berg och därför användes elektroniska sprängkapslar och simultan upptändning i konturen. I Kistatunneln genomfördes fältförsöket under byggskedet. Under försöket modifierades laddplanen i ett antal salvor. Konturhål i tunnelväggen laddades hårdare än normalt med 0,8 kg/m respektive 1,2 kg/m istället för konventionell konturladdning. Tunneln drevs av Veidekke med Stockholm Vatten som beställare och laddning genomfördes med emulsion och stötvågssprängkapslar.

Figur 2 visar påslaget för arbetstunneln i Kista, där det andra fältförsöket genomfördes. Figur 3 visar Kistatunneln vid sektion ca 0/604 m.



Figur 1. Underjordsdelen av Äspölaboratoriet med Utbyggnadsprojektets tunnlar markerade i rött. Totalt drevs 308 m nya tunnlar inom projektet.



Figur 2. Tunnelpåslag för arbetstunneln i Kista, där fältförsöket genomfördes.

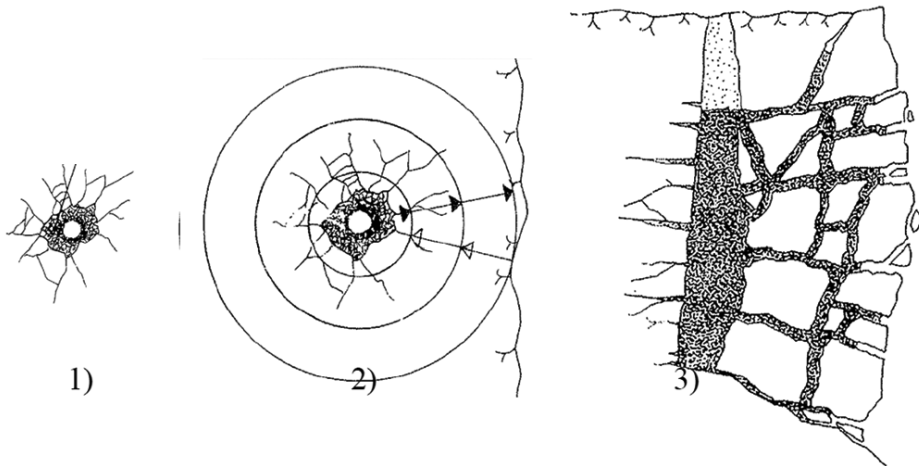


Figur 3. Vändficka i Kistatunneln, sektion ca 0/604 m.

1.2 Kort om bergsprängningsteori och sprängsprickor

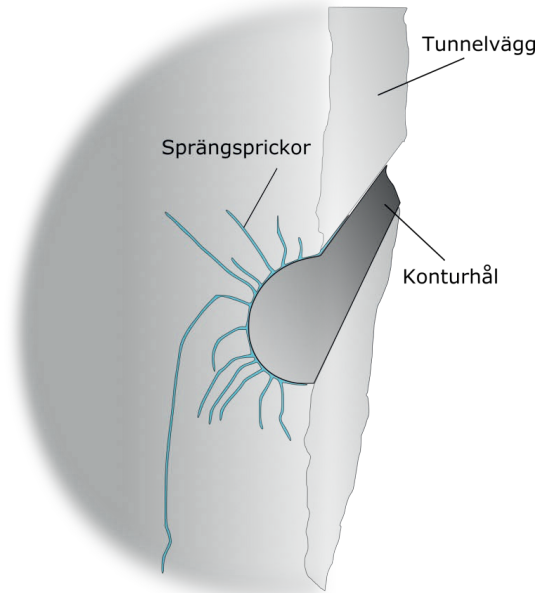
Förloppet vid sprängning sker i tre steg. Figur 4 nedan illustrerar förloppet (Olofsson, 1990).

1. Detonationen skapar ett mycket högt tryck som krossar berget närmast borrhålsväggen varvid borrhålet börjar expandera.
2. Tryckvågen propagerar från borrhålet ut i den fasta bergmassan. När tryckvågen når den fria ytan reflekteras den till en dragvåg. Dragvågen överstiger bergets draghållfasthet och ger upphov till töjningsinducerade sprickor i berget mellan borrhålet och den fria ytan.
3. Gaser som frigörs under detonationen av sprängämnet tränger in i sprickorna och utvidgar dessa och börjar bryta upp bergmassan. Borrhålet expanderar ytterligare vilket ger volymökning åt gaserna som nu kastar fram berget.



Figur 4. Förloppet vid sprängning (Olofsson, 1990).

Efter sprängning kan sprängskador studeras genom att en sektion av tunnelkonturen sågas ut och sprickor runt kvarstående borrhålet karteras. Fördelen med den här metoden gentemot indirekta metoder, exempelvis geofysik, är att definitionen på sprängskada är tydlig som de sprickor som utgår radiellt från borrhålet., Figur 5.



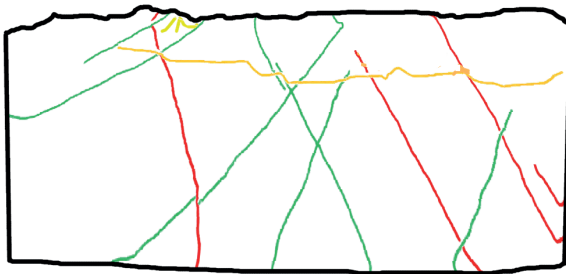
Figur 5. Definition av sprängsprickor som de sprickor som utgår radiellt från borrhålet.

Även om principen är densamma som i Figur 5 varierar graden av sprängskador med parametrar som laddningskoncentration, frikopplingsgrad, initieringstid och geologi. Figur 6 visar exempel på sprängsprickor från kontur respektive bottenladdning i TASN. Den här studien fokuserar på sprängsprickor från pipladdningen, till höger i Figur 6 visas ett exempel.



Figur 6. Exempel på sprängsprickor från bottenladdning (till vänster) och kontur (till höger) i TASN, Äspö.

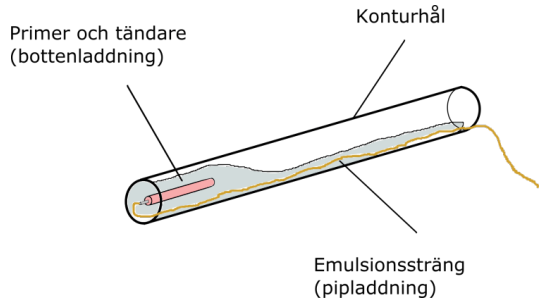
En kombination av sprängning och spänningsomfördelning i samband med bergguttaget kan påverka bergets naturliga sprickor och öppna nya. Figur 7 visar ett exempel från karteringen som har gjorts inom det här projektet.



Figur 7. Kartering av snittyta i sula TAS04. Gröna linjer avser naturliga sprickor, röda linjer avser naturliga sprickor som återöppnats på grund av bergguttaget. Öppna sprickor som saknar sprickfyllnad och kan vara spränginducerade är markerade med orange.

1.3 Metod för laddning och sprängämnets egenskaper

Emulsionssprängämnet Forcit K810 är speciellt framtaget för mekaniserad underjordsladdning. Underjordsladdning innebär ofta högt ställda krav på ingående råvaror samt på laddutrustningens förmåga att vid varje enskilt tillfälle producera ett högkvalitativt sprängämne. De råvaror som transporteras till arbetsplatsen är okänsliggjord matrisemulsion (ADR 5.1) samt gasningsmedel, N9. Då matrisen inte klassificeras som sprängämne kan den transporteras med en lägre transportklass, ADR 5.1. Dessa råvaror fylls på laddenheten inför laddning. När salvan laddas blandas emulsionen och gasningsmedlet i laddenheten, och doseras i borrhålet via en laddslang. De båda råvarorna, K810 och N9, reagerar tillsammans varvid gasbubblor bildas i emulsionen och förändrar emulsionens startdensitet från ca 1,4 kg/dm³ till önskat värde kring 0,8-1,2 kg/dm³. Densitetsförändringen innebär att emulsionen går från oxiderande vara till explosiv vara i borrhålet. Figur 8 visar laddning med slangdragare i Kistatunneln och ett strängladdat konturhål.



Figur 8. Laddning med slangdragare i Kistatunneln (vänster) och strängladdat konturhål (höger).

Emulsionssprängämnets slutliga densitet, laddkoncentration (kg/m) och borrhålsdiameter påverkar detonationshastigheten, VOD. Eftersom alla hål laddats med kontrollerad laddning och emulsionen därmed tillåts expandera radiellt i borrhålet kommer egenskaper som gasvolym, viktstyrka och energi i teorin alltid vara de samma. Dock skall det noteras att när volym och VOD varierar så varierar också trycket i borrhålet vilket har direkt koppling till påverkan på berget. Egenskaper för sprängämnet som användes under utbyggnadsprojektet på Äspö och i Kistatunneln presenteras i Tabell 1.

Tabell 1. Egenskaper för F-rör och K810 vid givna densiteter. Se Tabell 5 för en jämförelse med uppmätt densitet för K810 under utbyggnadsprojektet. Värdena gäller för K810 i borrhål Ø 41 mm – 51 mm.

Sprängämne	Densitet [kg/dm³]	Energi [MJ/kg]	VOD [m/s]	Viktstyrka (ANFO 1,0)	Gasvolym [l/kg]	Strängens diameter [mm]
F-rör 17x500	1,10	2,4	2200	0,58	406	-
K810 0,35 kg/m	0,99	2,9	2100	0,78	1020	20
K810 0,4 kg/m	0,99	2,9	2300	0,78	1020	23
K810 0,5 kg/m	0,99	2,9	3500	0,78	1020	25
K810 1,2 kg/m	0,99	2,9	4100	0,78	1020	39
K810 1,8 kg/m	0,99	2,9	4200	0,78	1020	48 (Fullt hål)

2 SPRÄNGSKADEUNDERSÖKNING I ÄSPÖLABORATORIET

SKBs berglaboratorium på Äspö, utanför Oskarshamn, byggdes i början av 1990-talet ned till nivån -450 meter. I anläggningen bedrivs forskning och utveckling med realistiska förutsättningar som en förberedelse inför byggandet av ett slutförvar för använt kärnbränsle. Anläggningen används också för viss forskning och teknikutveckling inom programmet för låg och medelaktivt avfall.

Under 2012 byggdes Äspölaboratoriet ut för att tillgodose behovet av utrymmen för framtida experimentplatser. Nya tunnlar byggdes på -410 och -450 m nivån. De nya tunnarna drevs med emulsionssprängämne (Kemitti 810) och laddning utfördes med en laddutrustning modell Forcit laddenhet 201 med slangdragarenhet för strängladdade håltyper. Mycket tid och resurser lades på uppföljning och styrning av utförandet, bland annat genom utförandekrav (t.ex. borrh- och laddningstoleranser), kontrollprogram och dokumentation av arbetet. Dokumentation av sprängarbetena omfattade uppföljning av borrhprecision och laddningskoncentrationer per hål med hjälp av loggerdata och fältobservationer.

BeFo har tagit fram en rapport som behandlar erfarenheter från laddning med emulsionssprängämne (Olsson och Niklasson, 2011). I rapporten används utbyggnadsprojektet på Äspö som referens.

2.1 Platsförhållanden

Berggrunden på Äspö består av diorit korsad av gångar av granit och pegmatit. Typiska bergmekaniska parametrar för det intakta berget visas i Tabell 2.

Tabell 2. Bergmekaniska parametrar för intakt berg från laboratorietester utförda på kärnor av Äspödiorit från Äspölaboratoriet.

Parameter	Medelvärde	Intervall
En-axiell tryckhållfasthet, UCS [MPa]	211	187 – 244
Crack Initiation Stress [MPa]	121	80 – 160
Young's modulus [GPa]	76	69 – 79
Poisson's tal	0,25	0,21 – 0,28
Indirekt draghållfasthet [MPa]	14,9	12,9 – 15,9
Friktionsvinkel, intakt berg [°]	49	
Kohesion, intakt berg [MPa]	31	
Densitet [kg/m ³]	2750	2740 – 2800

Spänningssituationen In-Situ på Äspö har beskrivits av bland andra Christiansson & Jansson

(2003). Den dominerande horisontalspänningen, σ_1 , är Nordväst-Sydostligt orienterad och uppskattades till 24 ± 5 MPa. Resultaten baseras på spänningstester i två ortogonala borrhål på -450 m nivå. På -410 m nivå, där tunnarna i den här studien byggdes, är uppskattningen att σ_1 ligger i det lägre intervallet. Vertikalkomponenten uppskattades ligga i intervallet 15-20 MPa och den mindre horisontalspänningen uppskattades till 11-13 MPa på nivån -420 till -450 m i anläggningen.

2.2 Krav och toleranser

SKBs krav på bergschakt, som tillämpades i utbyggnadsprojektet på Äspö, är relaterade till KBS-3 metoden för deponering av använt kärnbränsle. Metoden innebär deponering av använt kärnbränsle i kopparkapslar, 500 m under mark i ett system av deponeringstunnlar. Kopparkapslarna skall placeras i vertikala hål, borrade i tunnelgolvet. Tunnarna kommer sedan att återfyllas med bentonitlera (SKB, 2011).

Kraven på deponeringstunnarna omfattar bland annat geometri och begränsning av sprängskadezon. Kravet på sprängskador är formulerat som en gräns för axiell transmissivitet kring deponeringstunnarna i Kärnbränsleförvaret. Den specifika kapaciteten ($Q / \Delta p$) för skadezonen, mätt från ett pilothål i läge för ett deponeringshål, ska vara sådan att den motsvarar en transmissivitet om maximalt $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ (Posiva SKB 2017).

Geometrikravet är relaterat till återfyllningen, där målet är en jämn densitet och att minimera materialanvändning. Till detta kommer också krav på spårbarhet och dokumentation relaterat till arbete i en kärnteknisk anläggning.

Krav för bergschakt under utbyggnadsprojektet på Äspö omfattade:

- Stickning < 25 cm.
- Maximalt 30 % överberg.
- Inget underberg.
- Borrtoleranser enligt Tabell 3.
- Laddningstoleranser enligt Tabell 4.

Inledningsvis tillämpades stickning 25 cm och ansättning på konturen. Under projektet reviderades kravet till 30 cm och påhuggen flyttades ut 10 cm utanför teoretisk kontur för transporttunnarna och 5 cm i experimenttunnarna på grund av att berget inte bröt ut som önskat.

Tabell 3 visar utförandekrav på borrhålsprecision och Tabell 4 toleranser för laddning. Laddningstoleranserna definierades efter vad laddutrustningen klarat vid kalibrering innan utbyggnadsprojektet startade.

Tabell 3. Borrtoleranser som tillämpades i projektet.

Borrtoleranser kontur och hjälpare	Radiell avvikelse
Maximal tillåten avvikelse från teoretiskt påhugg	$\pm 7 \text{ cm}$
Maximal tillåten avvikelse från teoretisk slutpunkt	$\pm 20 \text{ cm}$

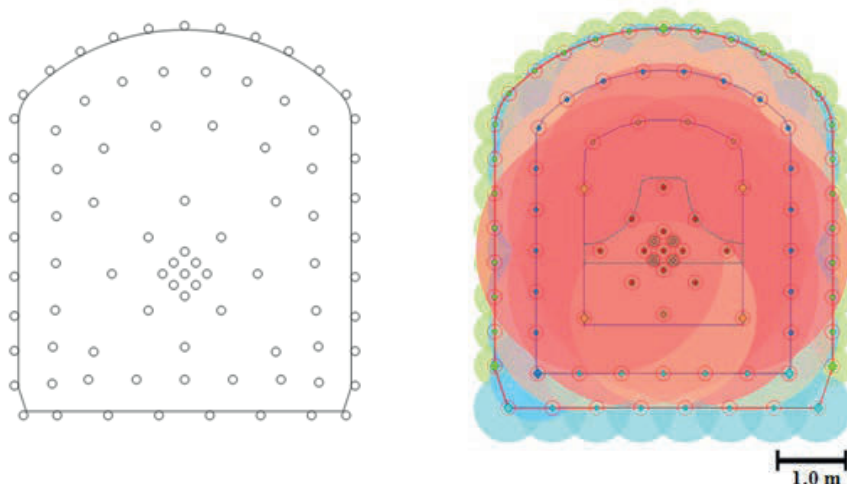
Tabell 4. Laddningstoleranser som tillämpades i projektet.

Håltyp	Laddningstoleranser
Konturhål och sulhål	$\pm 0,05 \text{ kg/m}$
Hjälpare	$\pm 0,05 \text{ kg/m}$
Strosshål	$\pm 0,10 \text{ kg/m}$
Kilhål	$\pm 0,10 \text{ kg/m}$

2.3 Sprängdesign

Sprängdesignen som användes i projektet baserades på tidigare arbeten med skonsam sprängning på Äspö (Karlzén och Johansson, 2010) och (Olsson et al. 2004). Figur 9 visar hålsättning och teoretisk utbredning av sprängskador enligt Ouchterlony et al. 2010 för experimenttunnlarna TASN och TAS04. Tabell 5 visar teoretisk pipladdning och bottenladdning (K 810). Specifik laddning enligt laddplanen var $2,63 \text{ kg/m}^3$ och teoretisk, specifik borrarning uppgick till $3,62 \text{ m/m}^3$ för 81 salv- och 4 grovhål ($\varnothing 48$ och $\varnothing 102 \text{ mm}$).

Teoretisk salvlängd uppgick till 4,5 m. I praktiken nåddes en indrift av knappt 4 m per salva i dessa två tunnlar (indriften definierades från salvans navigationsplan). Skadezonsteori tillämpades som ett designkriterium vid utformningen av borr-, ladd- och tändplaner och modifieringar i utförandet kontrollerades av beställaren innan tillämpning i entreprenaden. Initiering gjordes med elektroniska sprängkapslar i konturen och stötvågssprängkapslar i övriga delen av salvan.



Figur 9. Hålsättning (till vänster) och teoretisk utbredning av sprängsprickor enligt Ouchterlony et al. 2010 (till höger) för experimenttunnlarna TASN och TAS04. Cirkelns olika färger representerar olika håltyper och radien representerar teoretisk utbredning av den längsta sprängsprickan.

Tabell 5. Teoretisk pipladdning och bottenladdning (uppmätt i fält) för olika håltyper. Pentex 25F har använts som primer.

Håltyp	Pipladdning [kg/m]	Bottenladdning [kg]
Konturhål	0,35	0,4

Hjälpare och sulhål	0,5	0,5
Strosshål i TAS04/TASN	1,2	-
Kil/strosshål	1,8*	-

*Fulladdat hål utan slangdragning.

I salva 3 i TASN initierades konturen innan resten av salvan tändes, så kallad förspräckning. Bakomliggande orsak var att resterande hål oavsiktligt inte kopplats in. I övrigt skilde sig sprängdesignen inte från övriga salvor, dvs konturen laddades med 0,35 kg/m och initierades med elektroniska sprängkapslar.

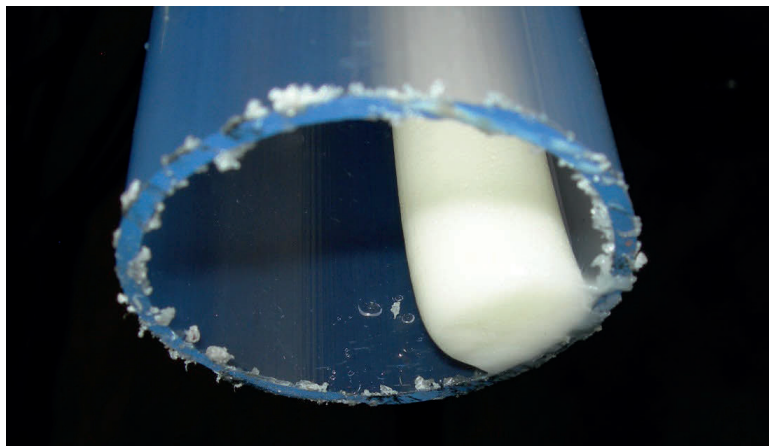
2.4 Laddning och kalibrering

Forcit Laddenhet 201 (Figur 10) med slangdragarenhet användes för strängladdning. Emulsion (K810) tillsammans med gasningsmedel (N9) användes som sprängämne i salvorna. F-rörladdning Ø17 har använts till konturhål i tak och vägg vid omskjutningar eller vid funktionsproblem med slangdragarenheten. i-kon VS användes som elektronisk tändare och Nonel LP som stötvågssprängkapslar. Vid vattenförekomst i nedåtriktade borrhål (i praktiken främst sulhålen) har hålen försetts med plaströr (Ø 40 mm), som förslutits med ett lock i botten för att förhindra vatteninträngning.



Figur 10. Forcit Laddenhet 201 och laddning med slangdragarenhet i TASJ.

Laddutrustningen kalibrerades varje månad av Forcit. Kalibreringsdata analyserades och därefter gjordes eventuella justeringar. Funktionen verifierades sedan genom ett antal mängd- och densitetsprov. Laddning i transparenta plexiglasrör (Figur 11) tillämpades för kontroll av bottenladdning och laddkoncentration i pipladdning.



Figur 11. Laddning i plexiglasrör i samband med kalibrering.

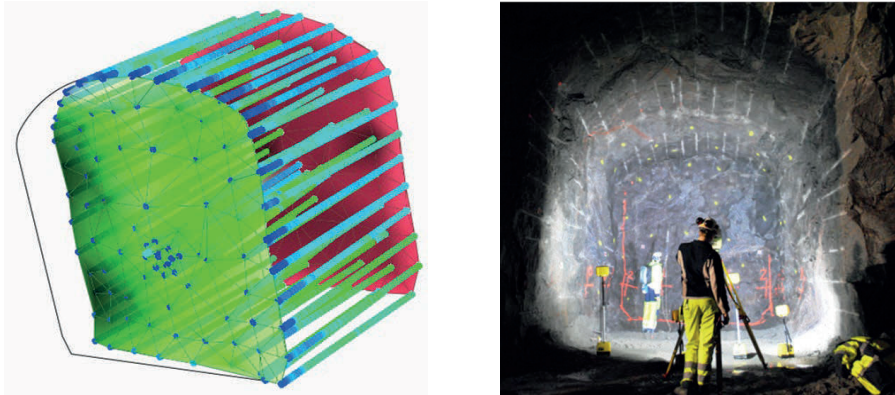
Laddenheten kalibrerades för att ge sprängämnet en medeldensitet så nära $1,0 \text{ kg/dm}^3$ som möjligt. De densitetsvärden som uppmättes under projektet presenteras i Tabell 6.

Tabell 6. Medeldensitet för K810 från kalibrering under projektet.

Kalibrering (2012)	8/2	13/3	10/4	15/5	14/6	8/8	6/9	11/10	15/11
Densitet [kg/dm ³]	1,02	0,98	1,05	0,99	0,98	1,01	0,95	0,99	1,02

2.5 Borrning

I projektet användes en fabriksny tvåbommsrigg från Sandvik med typbeteckning DT 920i. Riggen var utrustad med mjukvaran iSURE. Uppföljning gjordes på hur väl de uppsatta borrhålsbottenarna innehölls genom inmätning av påhugg och borrhålsbottenar samt visuell kontroll i maskintillverkarens program iSURE. Figur 12 visar exempel från uppföljningen. Varje salva dokumenterades med fotogrammetri.



Figur 12. Exempel på visualisering av MWD-data från borrhoggen och inmätning av borrhålsbottnar under utbyggnadsprojektet.

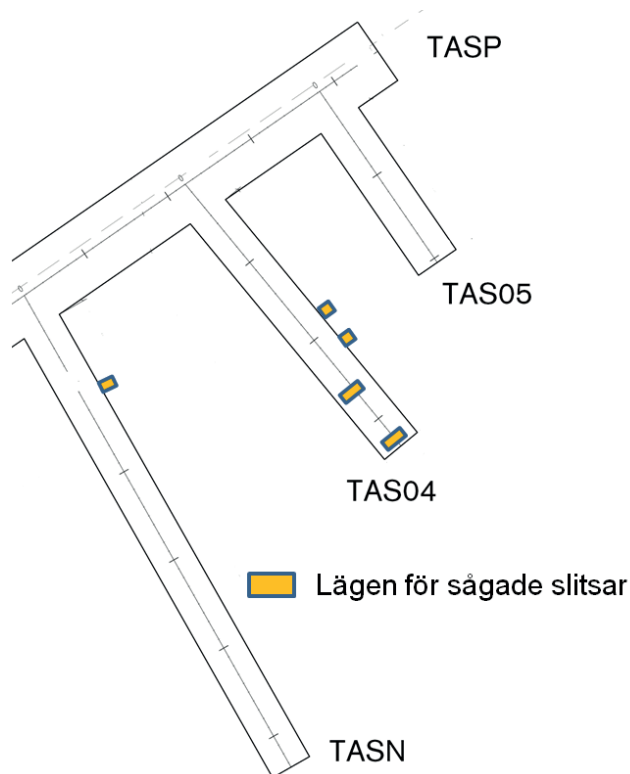
2.6 Omskjutningar av konturhålen i studien

Flertalet omskjutningar av enskilda hål har gjorts under drivning av TASN och TAS04 men endast ett hål som ingår i studien har skjutits om. Ca 1 m av hål nr 1 i slitsen TASN 13 m har skjutits om med 17 mm F-Rör.

2.7 Uttag och kartering av slitsar

Totalt fem slitsar sågades ut i experimenttunnlarna TASN och TAS04 (Figur 13). Två separata karteringar gjordes, en där sprängsprickor karterades och en geologisk kartering för att klassificera övriga sprickor.

Inspektion av sektioner i TAS04 och TASN genomfördes i september 2014. Baserat på inspektionen av möjliga lägen och genomgång av data från tunneldrivningen gjordes en prioriteringslista innehållande 9 möjliga lägen från vilka fem valdes ut baserat på kriterierna slät yta, antal synliga borrhypor och spårbarhet i dokumentation av laddning.



Figur 13. Lägen för sågade slitsar i experimenttunnlarna TASN och TAS04 på nivån -410 m (ej i skala). Dessa två tunnlar har en geometri som motsvarar den för deponeringstunnlar i det planerade slutförvaret för använt kärnbränsle.

Sågningen gjordes med en startklinga som sedan kombinerades med klingor om $\varnothing$ 1200 mm och $\varnothing$ 1600 mm för att nå ett maximalt teoretiskt slitsdjup om ca 70 cm. Efter att snittets yttre kanter sågats, sågades ett antal längsgående snitt som sedan kunde tas ut för att blottlägga två karterbara ytor. Figur 14 och 15 visar arbetsplatsen vid sågning i TASN och TAS04. Tabell 7 redovisar slitsarnas placering, djup och antalet synliga borrhypor.



Figur 14. Sågning av slits i väggen, TASN sektion 13 m.



Figur 15. Pågående arbete med uttag av slits i sulan, sektion 34 m i TAS04.

Tabell 7. Slitsarnas placering, djup och antalet synliga borrpipor.

Tunnel	Sektion [m]	Placering	Djup	Antal synliga borrpipor i snitten (ut och in relativt tunnelriktningen)	
				Ut	In
TAS04	18	Vänster Vägg	50 cm	3	2
TAS04	22	Vänster Vägg	50 cm	3	4
TAS04	25,5	Sula	70 cm	1	-
TAS04	34	Sula	70 cm	2	-
TASN	13	Vänster vägg	70 cm	3	4

Slitsarnas ytor rengjordes och sprayades därefter med penetrantvätska för att synliggöra sprickorna. Berguttag kan påverka det befintliga spricksystemet och återöppna läkta eller fyllda naturliga sprickor. Figur 16 visar karteringen av sprickorna.



Figur 16. Kartering av sprängsprickor. TAS04, sektion 34 till vänster och sektion 13 i TASN till höger.

Sprickorna klassificerades enligt nedan (Olsson, 2014).

- **Sprängsprickor**

Sprängsprickor saknar per definition sprickfyllning. De utgår från borrhålet och består av radiella sprickor samt ofta av ett antal korta sprickor närmast borrhålsväggen.

- **Naturliga sprickor**

Dessa sprickor kan förekomma i olika varianter men har funnits i berget innan berguttaget. En del av dessa sprickor är helt fyllda men har trots detta tagit penetrantvätska. Andra naturliga sprickor kan delvis ha öppnats av berguttaget, skrotning, de bergmekaniska förhållandena på platsen eller genom uttaget av slitsarna. Slutligen förekommer även helt öppna naturliga sprickor. De sistnämnda kan ha funnits innan berguttaget, eller helt öppnats av berguttaget.

- **Sprickor som uppkommit vid expanderbultning**

Vid användning av expanderbultar har ett antal kortare sprickor uppstått utgående från borrhålen.

Geologisk kartering

Vid den geologiska karteringen klassificerades sprickorna enligt nedan:

- Naturliga sprickor. (Sluten naturlig spricka)
- Sprickor som kan ha återöppnats på grund av berguttaget. (Delvis öppen naturlig spricka)
- Öppna sprickor som saknar sprickfyllnad och kan vara spränginducerade. (Öppna sprickor som saknar sprickfyllning)

Sprickkarteringen skiljer på öppna och mekaniskt öppna sprickor baserat på förekomsten av sprickfyllnad. Återöppnade sprickor har någon typ av synlig sprickfyllnad medan mekaniskt öppnade sprickor saknar synlig sprickfyllnad. Sprickor karterades som öppna eller delvis öppna om de uppvisade sprickapertur eller vattenflöde annars karterades de som slutna.

De sågade slitsarna domineras av Äspödiorit med undantag för TAS04 25,5 m som domineras av fin- till medelkornig granit. Tunna ådror av fin- till medelkornig granit påträffades också i TAS04 18 m och TAS04 22 m. Definitionen av mekaniskt öppnade sprickor är att ingen sprickfyllnad påträffats och sprickan därför kan ha öppnats på grund av berguttaget. Ingen tydlig koppling mellan borrhörpipor och sprickor definierade som mekaniskt öppnade kunde ses under kartering. Samtliga slitsar ligger i tunnelsektioner där bergklass enligt RMR-systemet bedömts till ca 60, dvs. "medelbra" till "bra" berg. Tabell 8 visar en sammanställning av den geologiska sprickkarteringen och RMR från kartering under utbyggnadsprojektet.

Tabell 8. Sammanställning av den geologiska sprickkarteringen.

Tunnel/Sektion	Totalt	Slutna	Delvis öppna	Återöppnade	Mekaniskt öppnade	RMR
TASN 13 m	34	10	0	17	7	62
TAS04 18 m	16	8	0	4	4	56
TAS04 22 m	15	5	0	6	4	60
TAS04 25,5 m	41	17	5	13	6	60
TAS04 34 m	31	5	0	19	7	63

Resultatet är mycket bra för laddning med strängemulsion och den begränsade sprickbildningen tyder på en mycket bra borrhälsnoggrannhet, en låg laddningskoncentration och att hålen detonerat momentant. Konturhålen har initierats med elektroniska sprängkapslar och dessa har en mycket låg tändspridning vilket tidigare undersökningar visat ge kortast sprickbildning (Olsson och Ouchterlony, 2003).

3 FÄLTFÖRSÖK OCH SPRÄNGSKADEUNDERSÖKNING I KISTATUNNELN

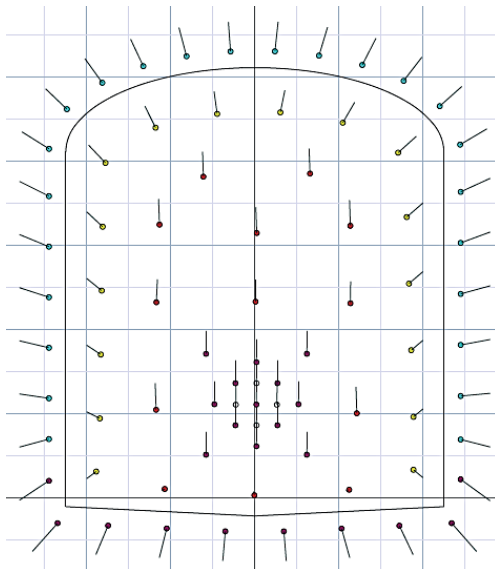
3.1 Inledning

Byggandet av en ny dag- och avloppstunnel påbörjades i Kista under 2015 mot bakgrund av exploatering och dagvattenproblem som tidigare förekommit i området. Det befintliga dag- och avloppsvattensystemet behövde byggas ut och ledningar förläggas i en 1,2 km lång bergtunnel. Den nya tunneln drivs av Veidekke med Stockholm Vatten som beställare.

För laddning användes emulsion (K810) och en laddutrustning modell ECM II med slangdragarenhet för strängladdade håltyper. Bergarten i området är främst gnejsgranit med inslag av pegmatit. Ett antal sprickzoner finns i området med en huvudsaklig strykning NW. Ytterligare zonersträcker sig NS, VNV och NNO. Berget i tunneln är uppsprucket med många kraftiga sprickor och slag, speciellt i sektioner med mindre bergtäckning.

3.2 Sprängdesign

Figur 17 visar hålsättning och teoretisk tunnelkontur för Kistatunneln. Tabell 9 visar teoretisk pipladdning. Specifik laddning enligt laddplanen var $2,11 \text{ kg/m}^3$ och teoretisk, specifik borrhning uppgick till $3,28 \text{ m/m}^3$ för 80 salv- och 4 grovhål (Ø 48 och Ø 102 mm). Teoretisk borrhlängd uppgick till ca 5,2 m. Stickning i konturen var ca 35 cm och ansättning av kontur och bottenhål gjordes ca 20 cm utanför teoretisk kontur.



Figur 17. Hålsättning för Kistatunneln. Hålens färger representerar olika håltyper i laddplanen.

Tabell 9. Teoretisk pipladdning för olika håltyper. Forprime har använts som primer.

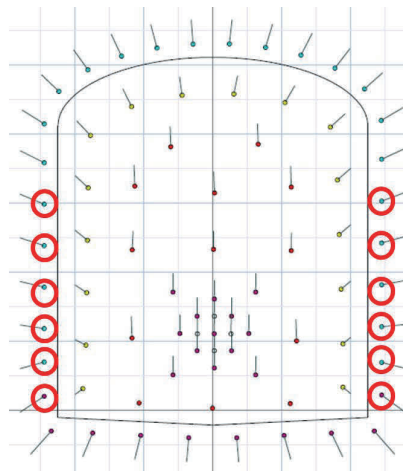
Håltyp	Antal hål	Pipladdning [kg/m]
Konturhål	24	0,35
Hjälpare	16	0,5
Kil/Strosshål/Sulhål	17/13/10	1,8*

*Fulladdat hål utan slangdragning.

Tunnelns teoretiska sektion har en area om ca 22,77 m². Salvorna initierades med stötvågssprängkapslar. För borring användes en Sandvik tvåbommsrigg. Riggen var utrustad med mjukvaran iSURE.

3.3 Laddning av försökssalvor

Laddning av försökssalvor genomfördes vid totalt tio tillfällen under våren 2016. I salvorna strängladdades fyra till sex vägghål med 0,8 kg/m eller 1,2 kg/m vid respektive tillfälle. Figur 18 visar ett exempel på försöksuppställning från salva vid stuffläge 0/672 m. Från dessa salvor identifierades sedan möjliga lägen med synliga borrhåll för sågning och kartering. Några sektioner identifierades också för en möjlig referenssektion för konturladdning.

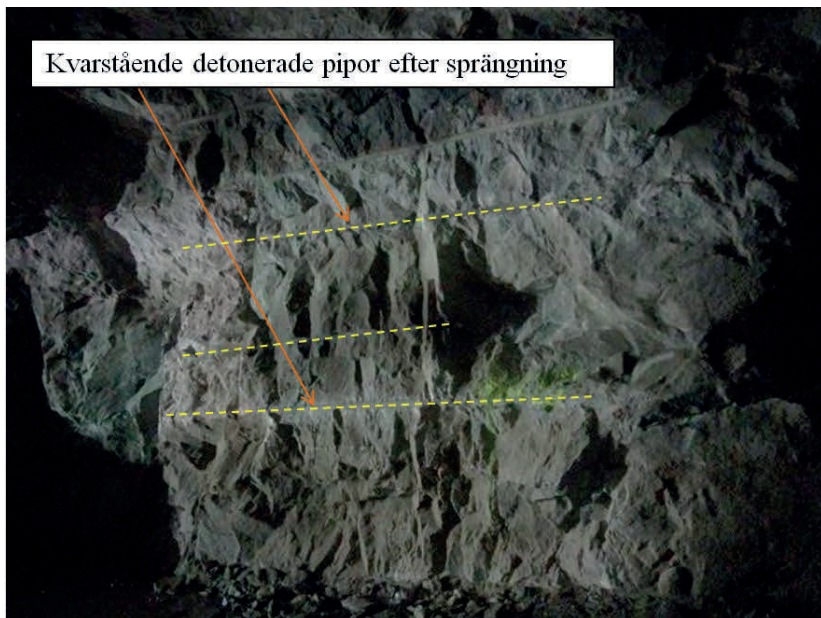


Figur 18. Försöksuppställning vid stuffläge 0/672 m. Rödmarkerade hål laddades med 0,8 kg/m.

Vid sektion 0/604 genomfördes en strossning med laddningskoncentration 1,2 kg/m i en vändficka. Strossningen genomfördes med totalt sju hål. Hålen borrades 5,2 m med stickning liknande salvorna. Fem hål (inklusive bottenhålet) laddades med 1,2 kg/m och två hål upp mot anfanget laddades med 0,5 kg/m. Upptändning gjordes med Exel LP-serien 150 ms (1 1/2) och strossen initierades i samband med tunnelsalva, Figur 19. Efter sprängning kvarstod tre pipor, två av dessa bedömdes ha detonerat, Figur 20.



Figur 19. Fem hål (inklusive bottenhålet) laddades med 1,2 kg/m i sektion 0/604 m. Koppling och upptändning av strossen gjordes med Indet shock TS 150 ms.



Figur 20. Resultat efter sprängning. Av tre kvarstående pipor bedömdes två vara detonerade.

3.4 Uttag och kartering av slitsar

Totalt fem slitsar sågades ut i Kistatunneln. Sprängsprickor karterades sedan runt kvarstående borrhålor på de frisågade ytorna. En inspektion av möjliga lägen för sågning genomfördes

under juli 2016. Baserat på inspektionen av möjliga lägen gjordes en prioriteringslista innehållande tio möjliga lägen från vilka fem valdes ut baserat på kriterierna slät yta och antal synliga borrhypor. Kontroll gjordes också visuellt att borrhyporna i aktuella sektioner detonerat. En utmaning vid val av sektioner var att ofta endast ett fåtal borrhypor kvarstod efter sprängning på grund av slag parallellt tunnelväggen.

Sågningen gjordes med en startklinga som sedan kombinerades med en klinga om Ø 1200 mm för att nå ett maximalt teoretiskt slitsdjup om ca 50 cm. Efter att snittets yttre kanter sågats, sågades ett antal längsgående snitt som sedan kunde tas ut för att blottlägga två karterbara ytor. Figur 21 och 22 visar arbetsplatsen vid sågning av slits i sektion 0/604 m och 0/623 m. Tabell 10 redovisar slitsarnas placering, djup och antalet synliga borrhypor.

Tabell 10. Slitsarnas placering, laddning i salvan och antalet synliga borrhypor ut och in relativt tunnelriktningen.

Sektion [m]	Placering	Planerad laddning	Antal synliga borrhypor i snitten	
			Ut	In
0/565	Höger vägg	1,2 kg/m	4	3
0/604	Stross höger sida i vändficka	1,2 kg/m	-	2
0/623	Vänster vägg	0,8 kg/m	1	1
0/635	Höger vägg	Kontur (planerad 0,35 kg/m)	2	2
0/670	Höger vägg	0,8 kg/m	1	2



Figur 21. sågning av slits i sektion 0/604 m.



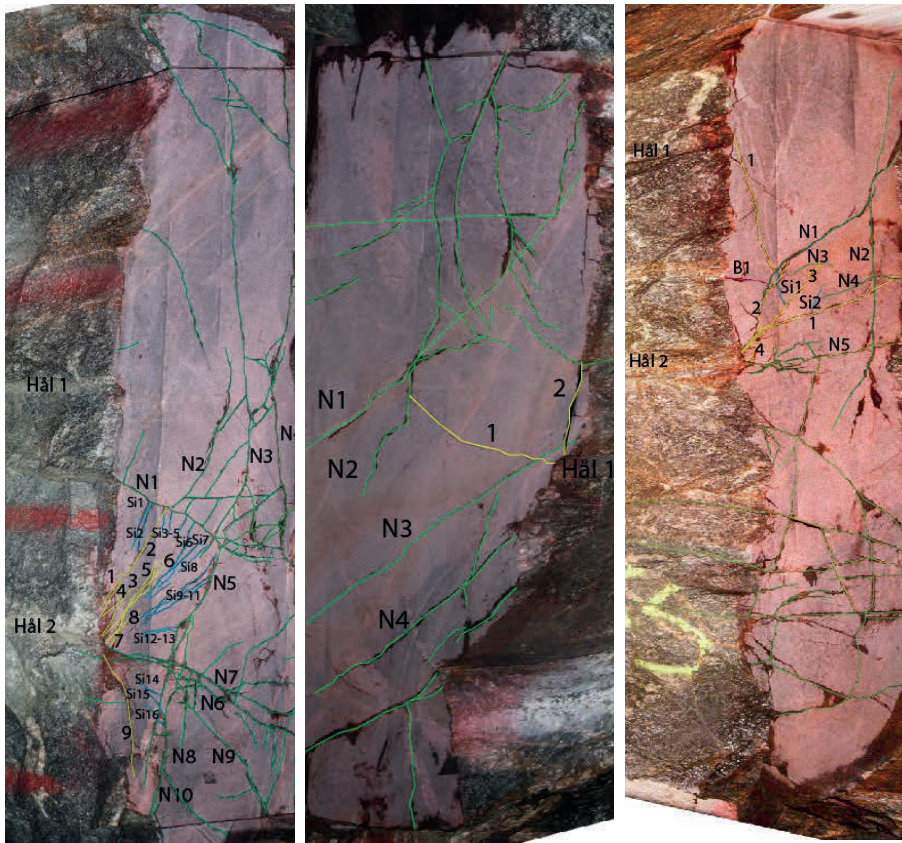
Figur 22. Arbetsplatsen vid sågning av slits i sektion 0/623 m.

Slitsarnas ytor rengjordes och sprayades därefter med penetrantvätska för att synliggöra sprickorna. Sprickor klassificerades som sprängsprickor, spränginducerade sprickor, naturliga

sprickor eller sprickor som uppkommit från expanderbultarna vid uttag av slitsarna. För sprängsprickor noterades längd, riktning, och terminering. Figur 23 visar kartering i sektion 0/635 m. Figur 24 visar tre av de karterade ytorna i sektionerna 0/604, 0/635 in och 0/623 ut.



Figur 23. Kartering i Kistatunneln sektion 0/635 m.



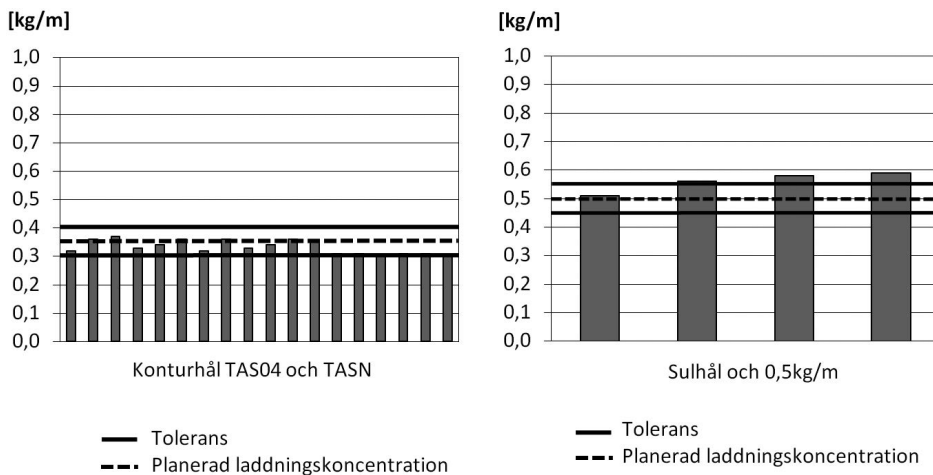
Figur 24. Resultat från karteringen i sektionerna 0/604, 0/623 ut, 0/635 in. Sprickors klassificering noteras med en bokstav i figuren. N= Naturlig spricka, S=spränginducerad spricka och B=Spricka orsakad av expanderbult.

Efter sågning av slits i vändfickan vid sektion 0/604 (jämför med Figur 6) kunde en detonerad borrpipa konstateras. Flertalet sprängsprickor karterades tillsammans med spränginducerade sprickor. Dessa kan ha uppstått när tryckvågen reflekterats mot naturliga sprickor, parallella med borrpipan. Snittet i sektion 0/623 innehåller trots den större laddkoncentrationen endast ett enda kortare spricka. Slits i sektion 0/635 sågades som en referens till de sektioner med större laddning som ingick i försöket. Karteringen konstaterade långa sprickor relativt tidigare erfarenhet.

4 RESULTAT

4.1 Laddningsprecision i TAS04 och TASN (Äspö)

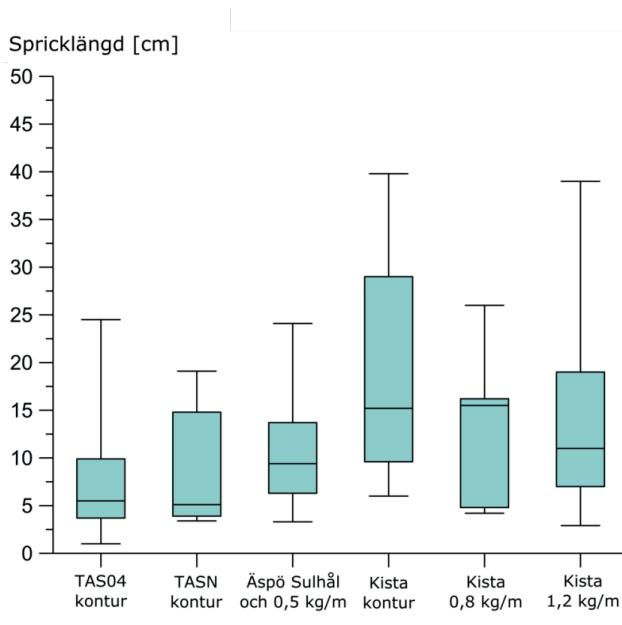
Laddenheten registrerade löpnummer, håltyp, och massa i en laddlogg. Massa för en enskild loggning kunde inte direkt kopplas till ett specifikt hål i borrplanen. För att möjliggöra spårbarhet av respektive laddning per hål kopplat till borrplanen dokumenterades laddföljden som tillämpats för salvan. Laddning per hål kunde sedan spåras till borrloggens registrering av hållängd och därefter kunde laddningskoncentrationen beräknas. En styrd laddsekvens krävdes för att möjliggöra utvärdering av utförande mot laddlogg. Figur 25 visar utvärderade laddningskoncentrationer från de kontur- och bottenhål som identifierats i slitsarna.



Figur 25. Utvärderade koncentrationer och toleranser för planerad laddning 0,35 och 0,5 kg/m. Notera att hål 1 i slitsen TASN 13 m av misstag laddades som ett bottenhål under entreprenaden.

4.2 Sprängsprickor

Nedan finns en sammanställning av karteringen för de fem slitsarna. Figur 26 visar längd för samtliga spräng- och spränginducerade sprickor för respektive slits och Tabell 11 visar antalet sprickor för samtliga enskilda karterade borrpipor.



Figur 26. Fördelning av spricklängd för samtliga spräng och spränginducerade sprickor karterade i respektive slits.

Table 11. Antalet sprickor medelvärde och standardavvikelse

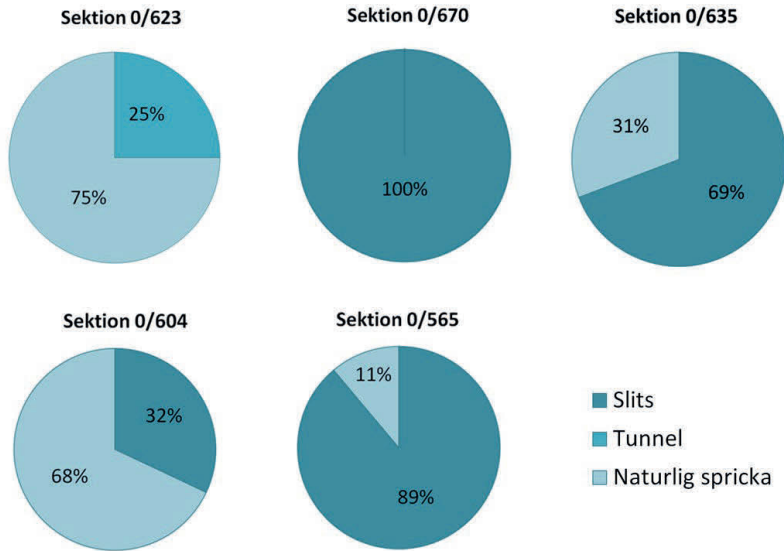
Tunnel och håltyp	Medelvärde/ Standardavvikelse
Äspö konturhål	3,00/2,09
Äspö Sulhål och 0,5 kg/m	5,25/5,19
Kista kontur	3,25/1,71
Kista 0,8 kg/m	1,33/0,58
Kista 1,2 kg/m	4,50/3,11

4.3 Terminering för sprängsprickor i Kistatunneln

I samband med kartering i Kistatunneln noterades spräng- och spränginducerade sprickors terminering. Tre kategorier av terminering identifierades:

- ”Slits” sprickor som terminerar i berget i den sågade ytan i slitsen.
- ”Tunnel” sprickor som terminerar mot slitsens rand in mot tunneln.
- ”Naturlig spricka” sprickor som terminerar i en naturlig spricka.

Terminering för sprängsprickor karterade i respektive slits presenteras i Figur 27.



Figur 27. Terminering för spräng- och spränginducerade sprickor i respektive slits. Termineringen redovisas som "Slits" "Tunnel" eller "Naturlig spricka". "Slits" innefattar de sprickor som terminerar i berget i den sågade ytan i slitsen, "Tunnel" samlar sprickor som terminerar mot slitsens rand in mot tunneln och "Naturlig spricka" de som terminerar i en naturlig spricka.

4.4 Mätning av VOD i Kistatunneln och Kankbergsgruvan

Vid några av försökssalvorna i Kista gjordes mätningar av detonationshastighet (VOD). Vid mättillfällena förspräcktes instrumenterade konturhål innan resten av salvan initierades. För att komplettera VOD-mätningar från Kistatunneln gjordes ytterligare mätningar i samband med takfällning i Kankbergsgruvan under september 2016. Vid det senare tillfället användes, som i Kistatunneln, emulsion (K810) och laddenhet modell ECM II.

Kankbergsgruvan ligger i Bolidenområdet nordväst om Skellefteå, och är en äldre zink- och koppargruva som återtagits i drift för brytning av guld och tellur under 2012. Gruvans djup är idag ca 500 m.

Mätningarna gjordes på -380 m nivån i samband med takfällning i Norra rampen Inslag 380. Figur 28 visar laddning med den aktuella utrustningen.



Figur 28. Laddning av takfällning i Kankbergsgruvan.

Fem hål laddades i nedre delen av takfällningen, Figur 29. Laddning planerades till 1,2 kg/m utan avladdning (laddtrucken inställd på 1205 g/m). Det första hålet laddades dock ca 1,8 kg/m.



Figur 29. Laddad och kopplad takfällning i Norra rampen inslag 380.

Tabell 12 visar en sammanställning av resultaten. VOD-data registrerades med en mätutrustning modell MicroTrap. För mätningen användes kabeln MREL *VOD probecable-LR* "blå". See Bilaga IV.

Tabell 12. Resultat från mätning av VOD i Kistatunneln och Kankbergsgruvan.

Laddningskoncentration	Upptändning [m/s]	Medelhastighet [m/s]	Kommentarer
Kista kontur 0,35 k/m	2532	1534	Uppmätt på ca 4,8 m
Kista kontur 0,35 kg/m	1540	-	Låg hastighet efter 0,8 m
Kista 0,8 kg/m	4758	2752	
Kankberg 1,2 kg/m	4472	4002	
Kista Kilhåll	5571	4682	
Kankberg Kilhåll	4615	4615	

5 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

Resultatet från karteringen tyder på att sprängsprickor ofta är orienterade mot närliggande borrhypor, varför karterad spricklängd inte är direkt synonym med djupet av sprängskada i berget. Begreppet ger en konservativ uppskattning av möjligt sprängskadedjup.

Är den längsta karterade sprickan en bra definition för utbredning av sprängskador? Ett större statistiskt urval ger eventuellt en längre längsta spricka och därmed en större utbredning av sprängskador för ett sprängämne i en viss bergart enligt denna definition.

5.1 Resultat från Äspölaboratoriet

Den längsta sprängsprickan som kartlades för laddningskoncentrationen 0,35 kg / m och 0,5 kg / m hade en längd av 24,5 cm respektive 24,1 cm. Det finns generellt en spridning i resultaten med få sprängsprickor längre än 20 cm. Den observerade spricklängden är kortare jämfört med resultaten från Kistatunneln. De beräknade laddningskoncentrationerna (Figur 25) indikerar god laddningsprecision för de hål som ingår i studien. De flesta hål som karterats i slitsarna bedöms vara detonerade. En av de karterade borrhyporna i en väggslits i TAS04 visade inga sprängsprickor på någon av slitsens sidor och bedömdes därför inte ha detonerat.

Laddning av sulhålen genomfördes i plaströr (Ø 40 mm) för att undvika brott i strängen på grund av vatten i hålen. Detta resulterade i en lägre frikopplingsgrad jämfört med endast strängen. Det är sannolikt att en stor andel av sulhålen varit helt eller delvis vattenfyllda, vilket reducerar frikopplingsgraden ytterligare. Vid tidigare studier, utförda med Gurit, har vattenfyllda hål resulterat i 3-4 gånger längre spricklängd jämför med ett torra hål (Olsson och Ouchterlony, 2003).

Det faktum att samtliga slitsar ligger i tunnelsektioner där bergklass enligt RMR-systemet bedömts till ca 60 ("medelbra" till "bra" berg) gör att det är möjligt att jämföra data från de olika slitsarna och anta en relativt likartad påverkan från geologin.

Resultatet är mycket bra för laddning med strängemulsion och den begränsade sprickbildningen tyder på en mycket bra borrhypgrannhet, en låg laddningskoncentration och att hålen detonerat momentant. Kontur- och sulhålen har initierats med elektroniska sprängkapslar och dessa har en mycket låg tändspridning vilket tidigare undersökningar visat ge kortast sprickbildning (Olsson och Ouchterlony, 2003).

5.2 Resultat från Kistatunneln

Det var relativt svårt att välja ut sektioner för sågning beroende på avsaknad av halvpipor och bomt berg. I samband med kartering konstaterades flera hål där detonationen kan misstänkas inte givit fullt utslag, främst för pipor karterade i sektion 0/623 och 0/670, dvs laddade med 0,8 kg/m. Resultatet från laddning med 1,2 kg/m karterade i sektion 0/565 och 0/604 är mer tillfredställande men också i dessa snitt finns halvpipor som inte detonerat. Här skiljer sig

resultaten från Kistatunneln i en jämförelse med studien vid Äspölaboratoriet (Ittner och Bouvin, 2015), där flertalet hål detonerat och spricklängden var mer jämnt fördelad mellan karterade halvpipor.

Orsaken kan vara tändspridning i stötvågs-sprängkapslar. Här finns exempelvis möjlighet att ett mitthål av tre närliggande hål detonerar i luften när de omgivande hålen redan brutit berget. Baserat på detta finns anledning att anta att skadezonen runt tunnelkonturen skiljer sig mellan tunnlar drivna konventionellt med stötvågs-kapslar jämfört med simultan upptändning med elektroniska sprängkapslar. Konventionellt drivna tunnlar kan, baserat på dessa två studier, antas ha färre konturhål med fullt utvecklad sprickbildning. Spricklängden kan dock förväntas vara längre för dessa hål.

Vid jämförelse mellan referens-slitsen i sektion 0/635 m och övriga sektioner är resultatet, med långa sprickor från den minsta laddningskoncentrationen, ganska överraskande. Resultaten är dock jämförbara med andra studier, exempelvis pipladdning i konturen i Norsborgsdepån (Olsson et al. 2015). Möjliga orsaker till de långa sprickorna kan vara geologin, där en svaghet i berget kan påverka hur enskilda sprängsprickor propagerar, en större laddningskoncentration än planerat eller att hålen varit vattenförande.

Resultat från 1,2 kg/m omfattar fyra karterade borrhörpipor. Sektionerna med denna laddningskoncentration uppvisade det högsta antalet sprängsprickor. I sektion 0/604 m observerades ett 15-tal spränginducerade sprickor (Se Figur 24). Dessa kan ha uppstått när tryckvågen reflekterats mot naturliga sprickor, parallella med borrhörpipan. I en av sektionerna fanns en kraftig zon av pegmatit, vilket i tidigare undersökningar visat sig kunna fungera som ett filter och reducera sprickantalet och spricklängder. Möjligen skulle antalet sprickor och spricklängder för denna laddningskoncentration varit ännu högre i en annan bergart.

I samtliga snitt dominerar de naturliga sprickorna. De var antingen helt slutna, delvis öppnade eller helt öppnade. Det är svårt att bedöma hur dessa sprickor påverkats av bergguttaget men troligen har en del av dessa sprickor öppnats helt eller delvis vid tunnelsprängningen. Mätvärden för VOD var lägre jämfört med tidigare referensvärden för de lägre laddningskoncentrationerna, exempelvis de som presenteras i Tabell 1. Samtidigt överensstämmer projektets mätvärden relativt väl för de större laddningarna med tidigare uppmätta värden för dessa koncentrationer. Flera av mätresultaten för de lägre laddningskoncentrationerna innehåller störningar som gör kurvorna svåra att utvärdera. Orsaken kan vara kopplad till strängladdningens beteende i produktionen och bör studeras vidare.

5.3 Laddning med emulsionssprängämne

Erfarenheten från utbyggnadsprojektet på Äspö är att det är möjligt att genomföra laddning med strängemulsion med hög precision och att dokumentera och följa upp arbetet med modern loggerutrustning. Metoden som användes för utvärdering innebar omfattande handpåläggning. När den här rapporten skrivs har metoden automatiserats i Forcits

laddutrustning ECM II, vilket innebär att laddkoncentrationer redovisas i laddloggen. Fortfarande finns ingen automatisk koppling mellan laddlogg och borrhålplan.

Många parametrar samverkar vid drivning av tunnel. Parametrar som ofta underskattas vid tunneldrivning med emulsionsteknologi är ingående råvarors kvalitet och det system (laddutrustning) som tillverkar och distribuerar emulsionssprängämnet i varje borrhål. För att säkerställa effektiv och tillförlitlig tunneldrivning med repeterbarhet krävs höga krav gällande hela systemet. Det innebär full kontroll på råvaror in till emulsionsfabriken, full kontroll på processparametrar under produktion, lagerhållning och logistik. Laddutrustningen skall producera högkvalitativt emulsionssprängämne med samma kvalitet vid varje enskilt tillfälle. Vidare skall laddutrustningen dosera exakt rätt mängd sprängämne i borrhålets olika delar (bottenladdning, pipladdning och avladdning) samt utföra detta exakt beroende på salvans olika håltyper. Det innebär att laddutrustningen måste ta över delar av laddoperatörens traditionella arbete och istället utföra detta automatiskt.

Emulsionssprängämnen kallas ofta som en produkt med liknande egenskaper oavsett producent och typ av laddningsutrustning. Detta är inte helt fallet på grund av företagsspecifika kvitton, kvalitet och laddningsutrustning. När det gäller Äspö kalibrerades laddningsutrustningen en gång i månaden och kunde uppvisa en laddningskoncentration med en noggrannhet på +/- 5 till 10% upprepade gånger.

6 ERKÄNNANDEN

Författarna vill tacka Mats Olsson (EDZ Consulting AB) som har genomfört kartering av undersökningsslitsarna och assisterat projektet med goda råd. Tack riktas också till Veidekkes personal vid Kistatunnel och SKBs personal på Äspölaboratoriet som hjälpt projektet under fälttestet och bistått arbetet på olika sätt. Ett varmt tack riktas till Statens Vegvesen och Stiftelsen Bergteknisk Forskning, BeFo, som finansierat projektet.

Ett speciellt tack riktas till projektets referensgrupp som bidragit med viktiga synpunkter under arbetets gång.

7 REFERENSER

Christiansson, R., och Jansson, T. 2003. A test of different stress measurement methods in two orthogonal bore holes in the Äspö Hard Rock Laboratory (HRL), Sweden. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 40 (7–8):1161–1172.

Ittner H., Bouvin A. 2015. Underökning av sprängsprickor från mekaniserad laddning med bulkemulsion i bergtunnel. BeFo-rapport 144. Stiftelsen Bergteknisk Forskning. Stockholm.

Karlzén R., Johansson E. 2010. Slutrapport från drivningen av TASS-tunneln. SKB R-10-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Olofsson, S., O. 1990. Applied Explosives Technology for Construction and Mining, Ärla: APPLEX.

Olsson, M., Rydén, N., Åkeson, U. 2015. Skadezonsutbredning vid skonsam sprängning. Trafikverket Rapport 2015:067.

Olsson M., Niklasson B. 2012. Tunnel drivning med pumpemulsion-Erfarenheter av sprängämne, utrustning och laddningsarbete. BeFo Rapport 115.

Olsson M. 2014. EDZ I TASN och TAS04. PM.

Olsson M., Niklasson B., Wilsson L. Andersson C., Christiansson R. 2004. Experiences of blasting of the TASQ tunnel. SKB R-04-73, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Olsson M., Ouchterlony F. 2003. Ny skadezonsformel för skonsam sprängning. SveBeFo Rapport 65. Stockholm.

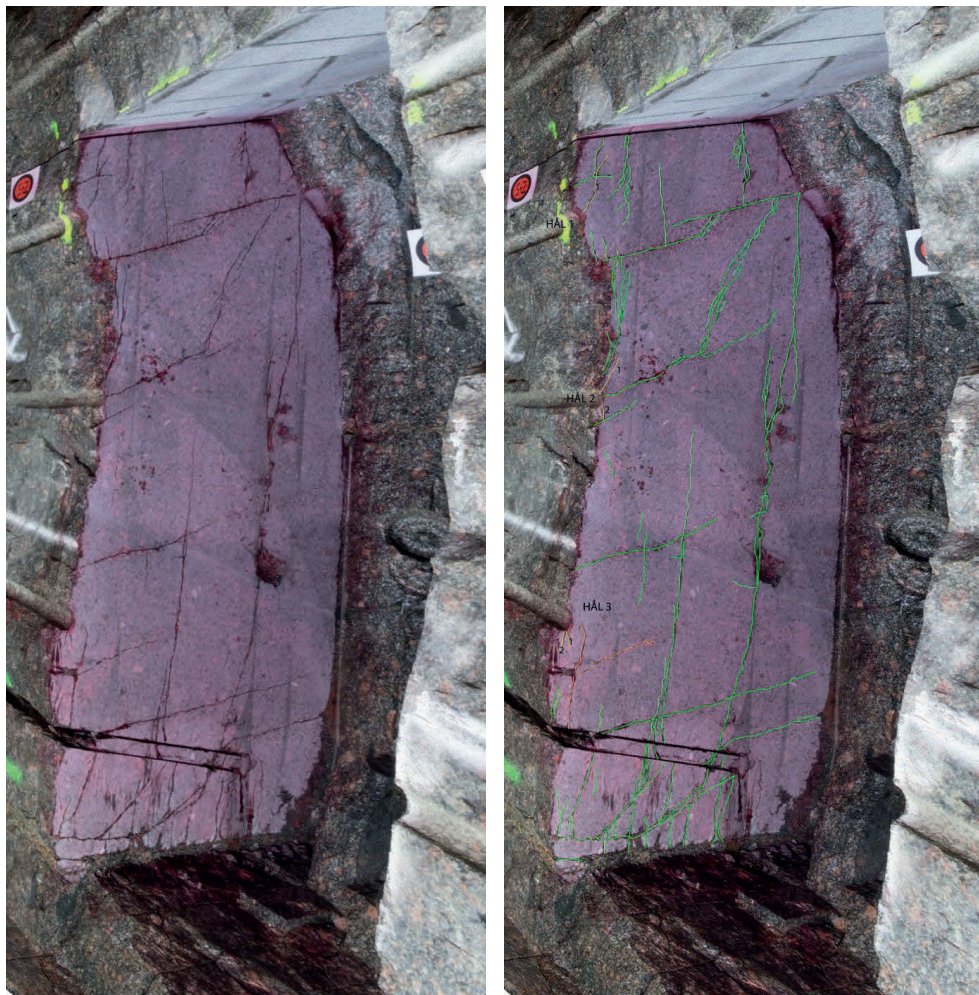
Ouchterlony, F., Olsson, M., Svärd, J. 2010. Crack length or blast damage from string emulsion and electronic detonators. Rock fragmentation by blasting-Sanchidrián (ed.) Taylor and Francis Group, London.

Posiva SKB 2017. Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. Posiva SKB Report 01.

SKB, 2011. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. Technical Report TR-11-01. Svensk Kärnbränslehantering AB. Uppdaterad 2012-12. Stockholm.

BILAGA I RESULTAT FRÅN KARTERING AV SPRÄNGSPRICKOR ÄSPÖ

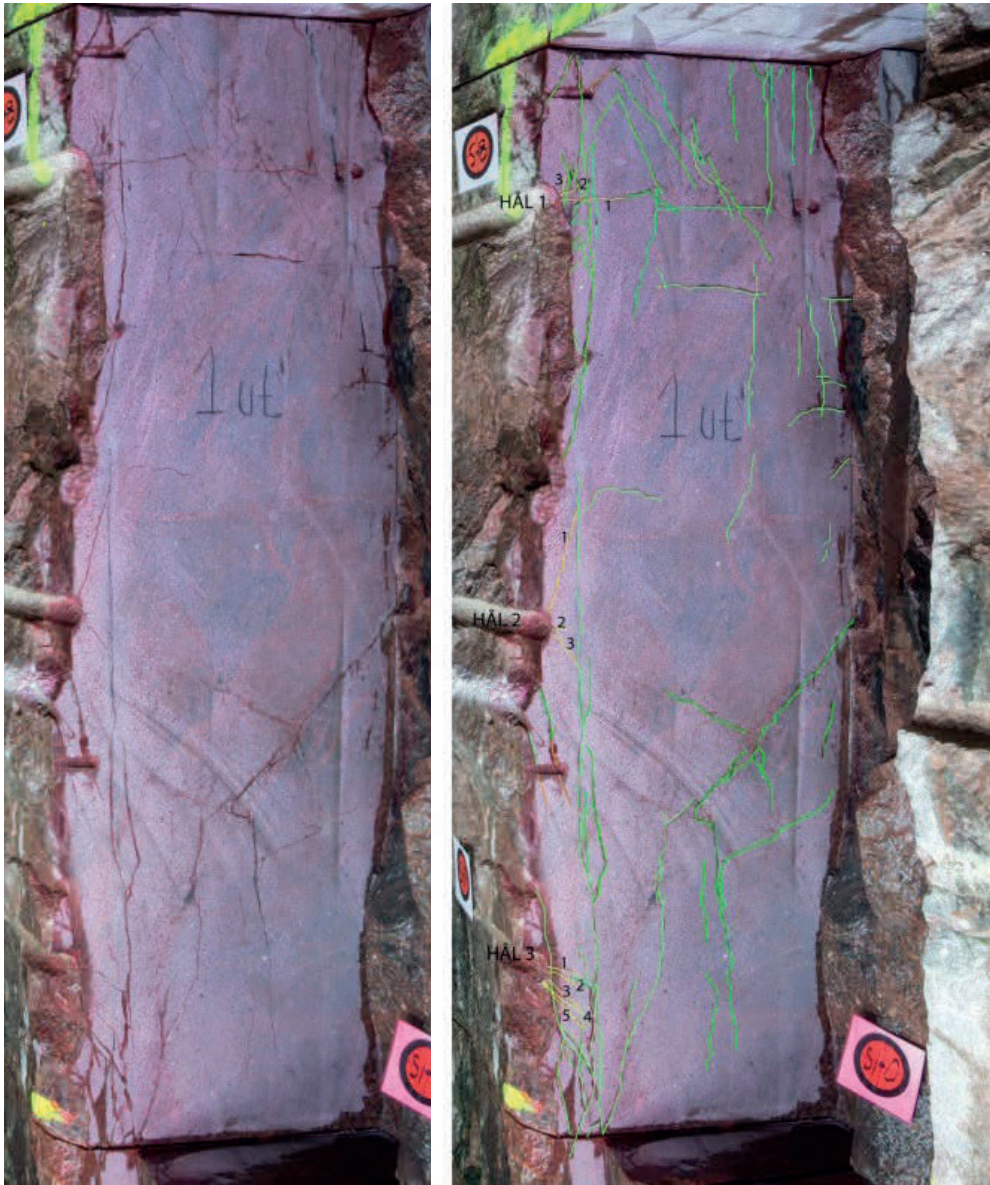
I den här bilagan presenteras resultat från kartering av sprängsprickor för samtliga slitsytor. Figur 30 till 39 visar ytorna med och utan tolkade sprickor efter applicering av penetrantvätska. Snitten är namngivna med tunnel, sektion och riktning **ut** respektive **in** ur tunneln. Gröna linjer avser tolkade naturliga sprickor och gula linjer avser tolkade sprängsprickor.



Figur 30. Snittytan TASN 13 m **ut** med penetranter samt med inlagda spricktyper.



Figur 31. Snittytan TASN **in** med penetranter samt med inlagda spricktyper.



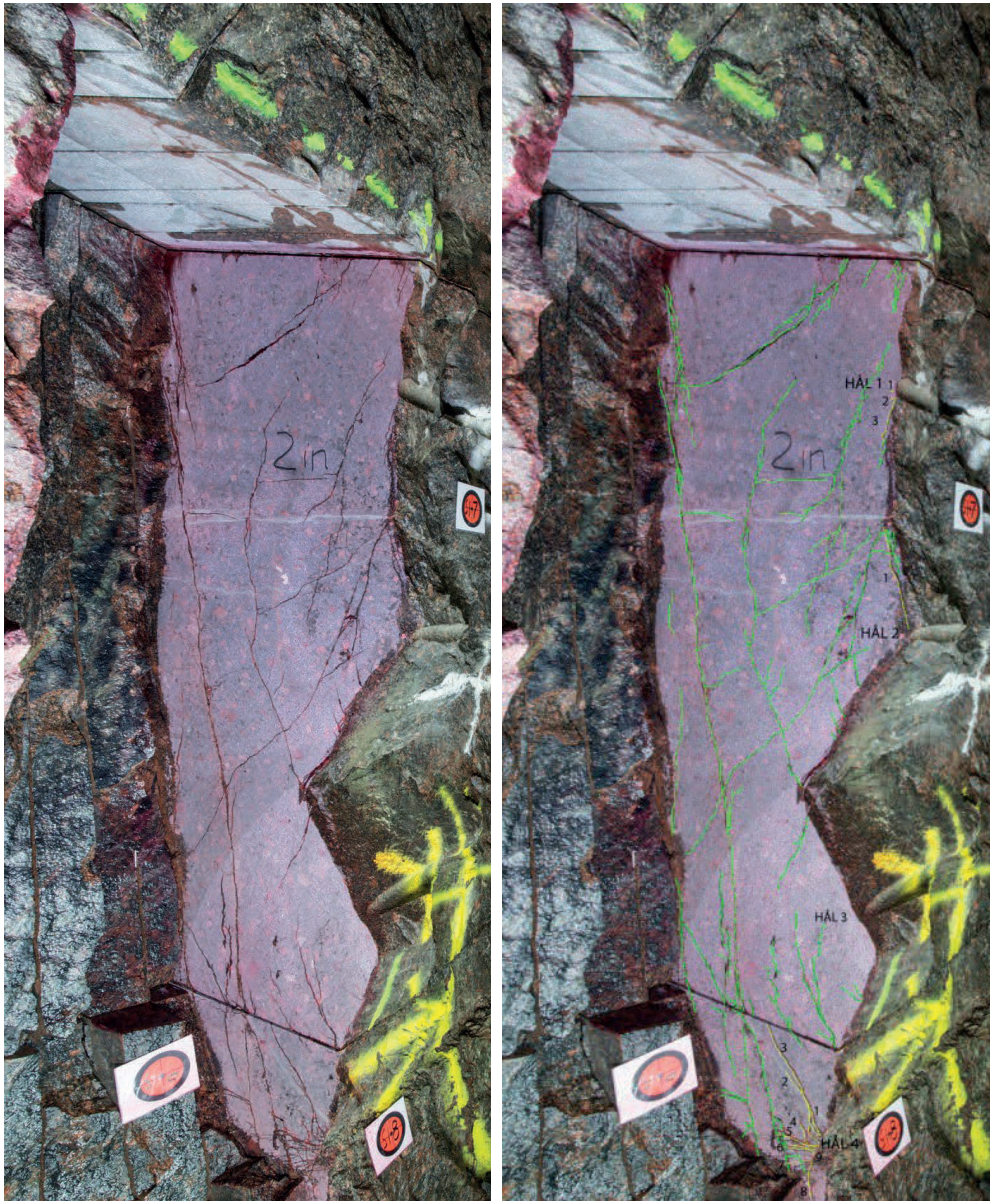
Figur 32. Snittytan TAS04, sektion 18 **ut** med penetranter samt med inlagda spricktyper.



Figur 33. Snittytan TAS04, sektion 18 in med penetranter samt med inlagda spricktyper.



Figur 34. Snittytan TAS04, sektion 22 **ut** med penetranter samt med inlagda spricktyper.



Figur 35. Snittytan TAS04, sektion 22 in med penetranter samt med inlagda spricktyper.



Figur 36. Snittytan TAS04, Sula sektion 25,5 ut med penetranter samt med inlagda spricktyper.



Figur 37. Snittytan TAS04, Sula sektion 25,5 in med penetranter samt med inlagda spricktyper.



Figur 38. Snittytan TAS04, Sula sektion 34 **ut** med penetranter samt med inlagda spricktyper.



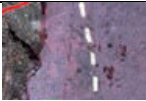
Figur 39. Snittytan TAS04, Sula sektion 34 in med penetranter samt med inlagda spricktyper.

BILAGA II RESULTAT FRÅN GEOLOGISK KARTERING ÄSPÖ

I den här bilagan presenteras resultat från geologisk kartering av samtliga slitsytor. Figur 40 till 49 visar ytorna med och utan tolkade sprickor efter applicering av penetrantvätska. Samtliga av de på bilderna synliga sprickorna är inte karterade eftersom den geologiska karteringen genomfördes innan penetrantvätska påförts.

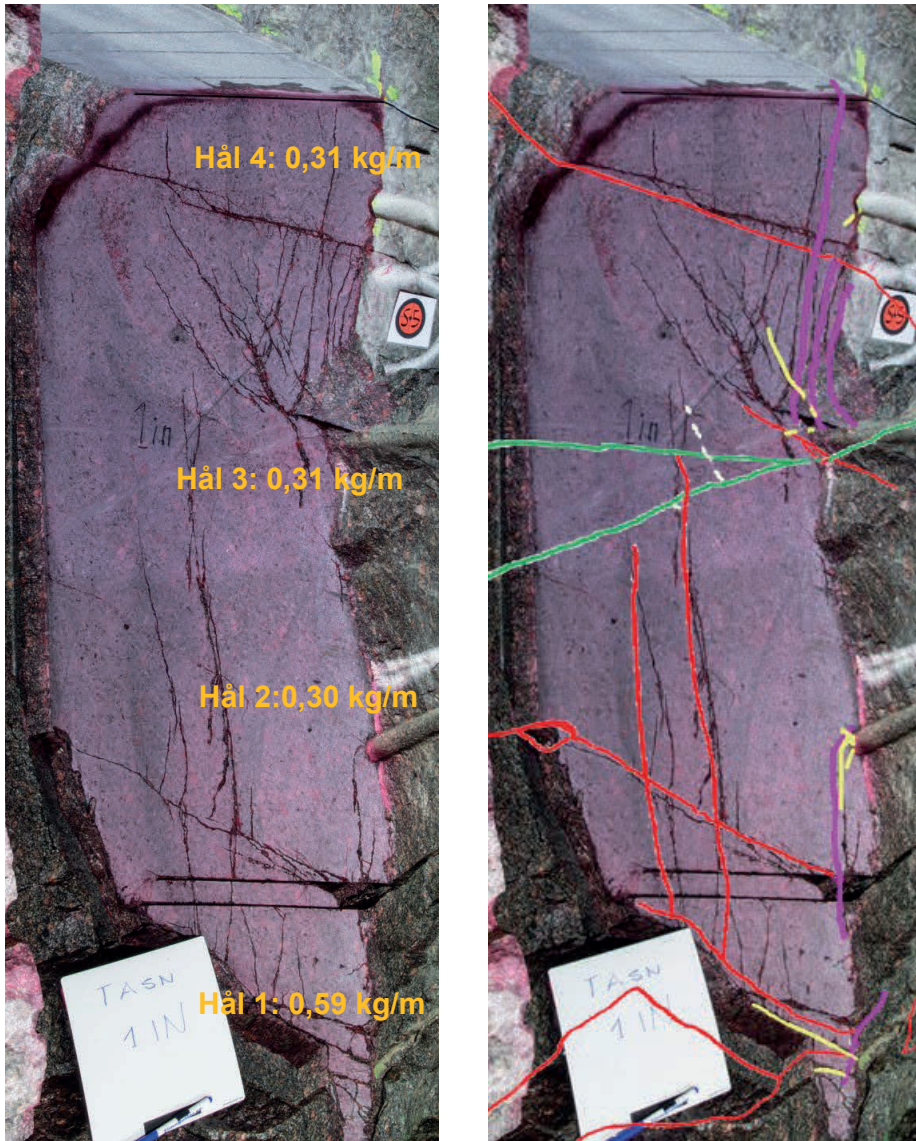
Karteringen är utförd i 3D med karteringsverktyget RoCS (Rock Characterization System), vilket kan bidra till att samtliga sprickmarkeringar inte ligger exakt i motsvarande sprickspår när 3D-kartingen projekteras på ett 2D-foto av respektive snitt. De färgade sprickspåren har gjorts tjockare än de faktiska sprickorna för att underlätta för läsaren.

Snitten är namngivna med tunnel, sektion och riktning **ut** respektive **in** ur tunneln. Laddningskoncentrationer och hål-ID enligt borrarplan (jämför bilaga III) är angivna bredvid respektive borrarpipa. Tolkade sprickor är färgkodade enligt nedan:

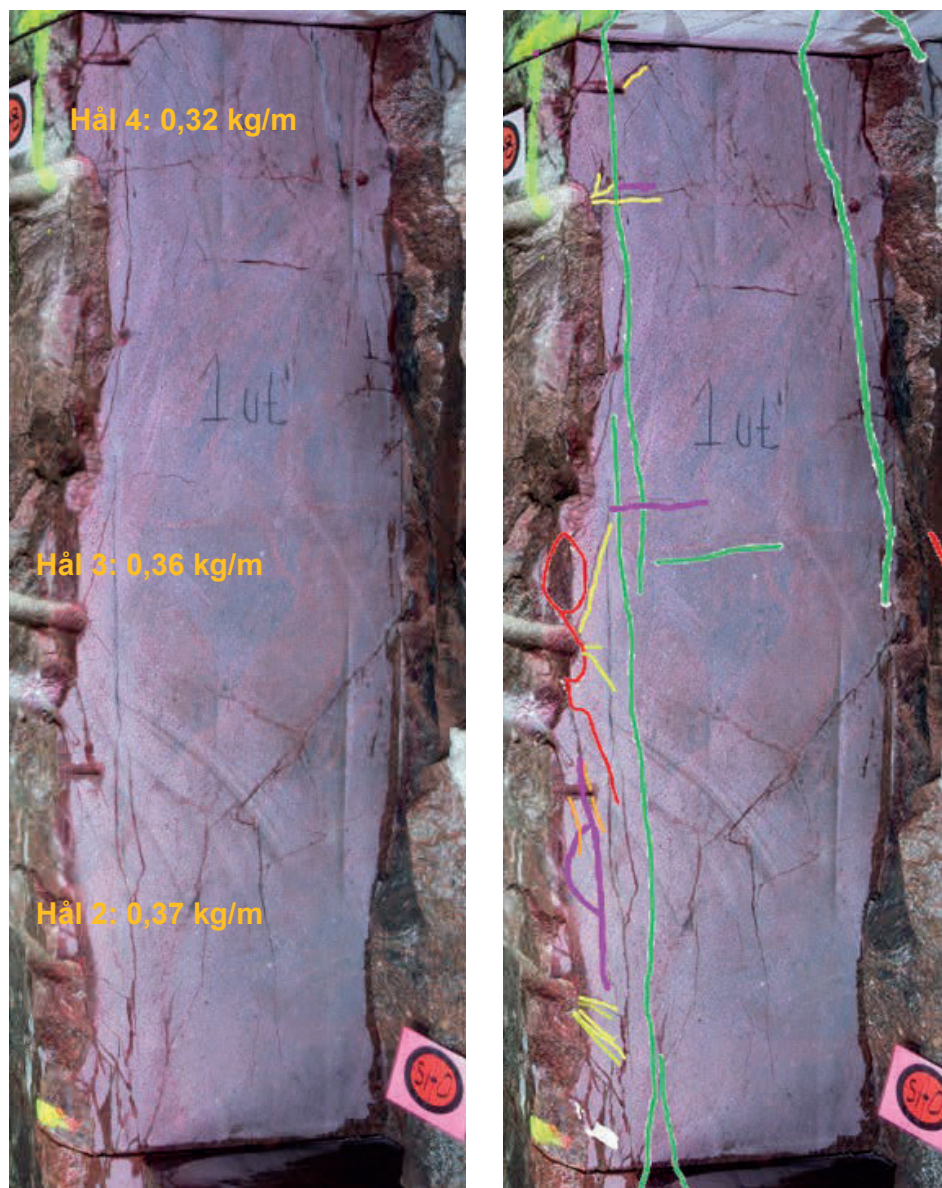
	Naturliga sprickor som karterats i slitsarna.
	Sprickor som återöppnats på grund av berguttag.
	Öppna sprickor som saknar sprickfyllnad och kan vara spränginducerade.
	Sprängsprickor enligt definition i kapitel 1.2.
	Gång med finkornig granit eller pegmatit.
	Sprickor som uppkommit vid uttag av slits eller orsakats av expandrar är markerade med orange.



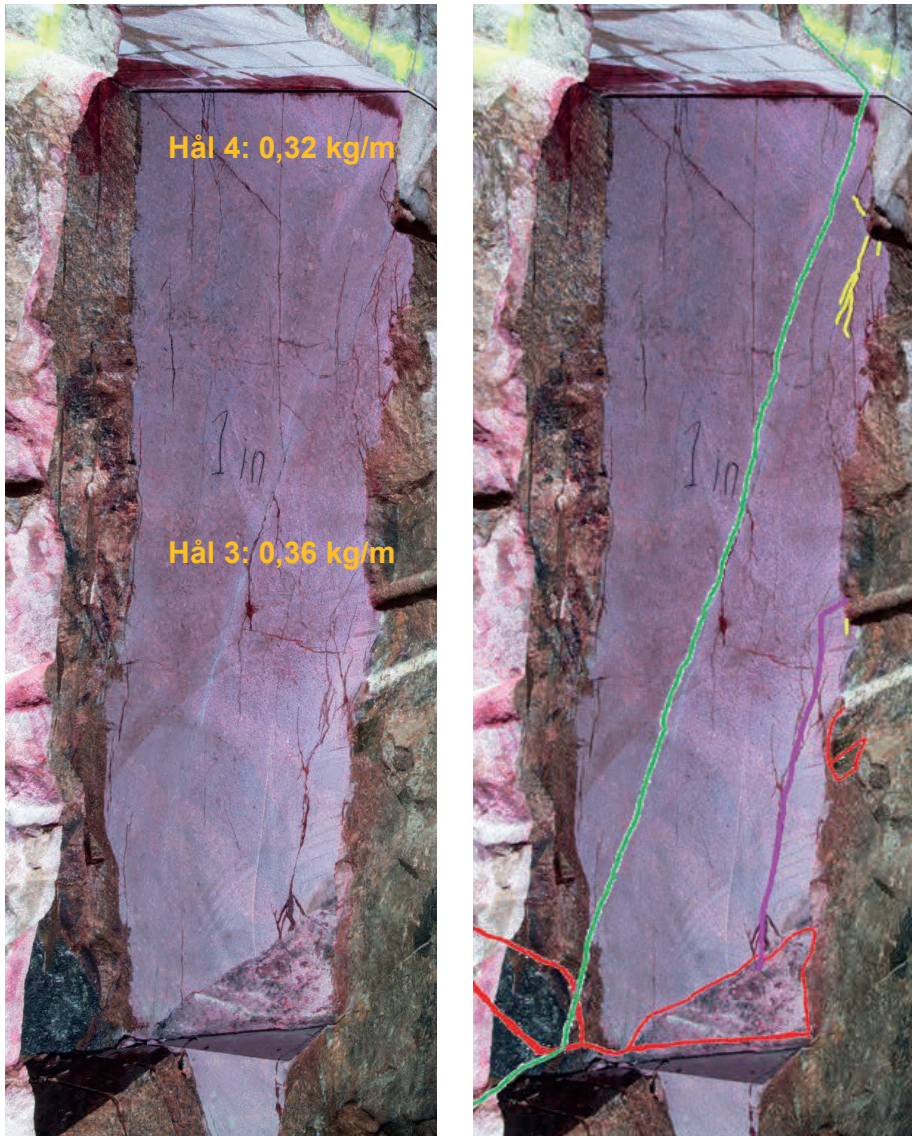
Figur 40. Snittytan TASN sektion 12 m, riktning **ut** med penetrantvätska samt tolkade spricktyper.



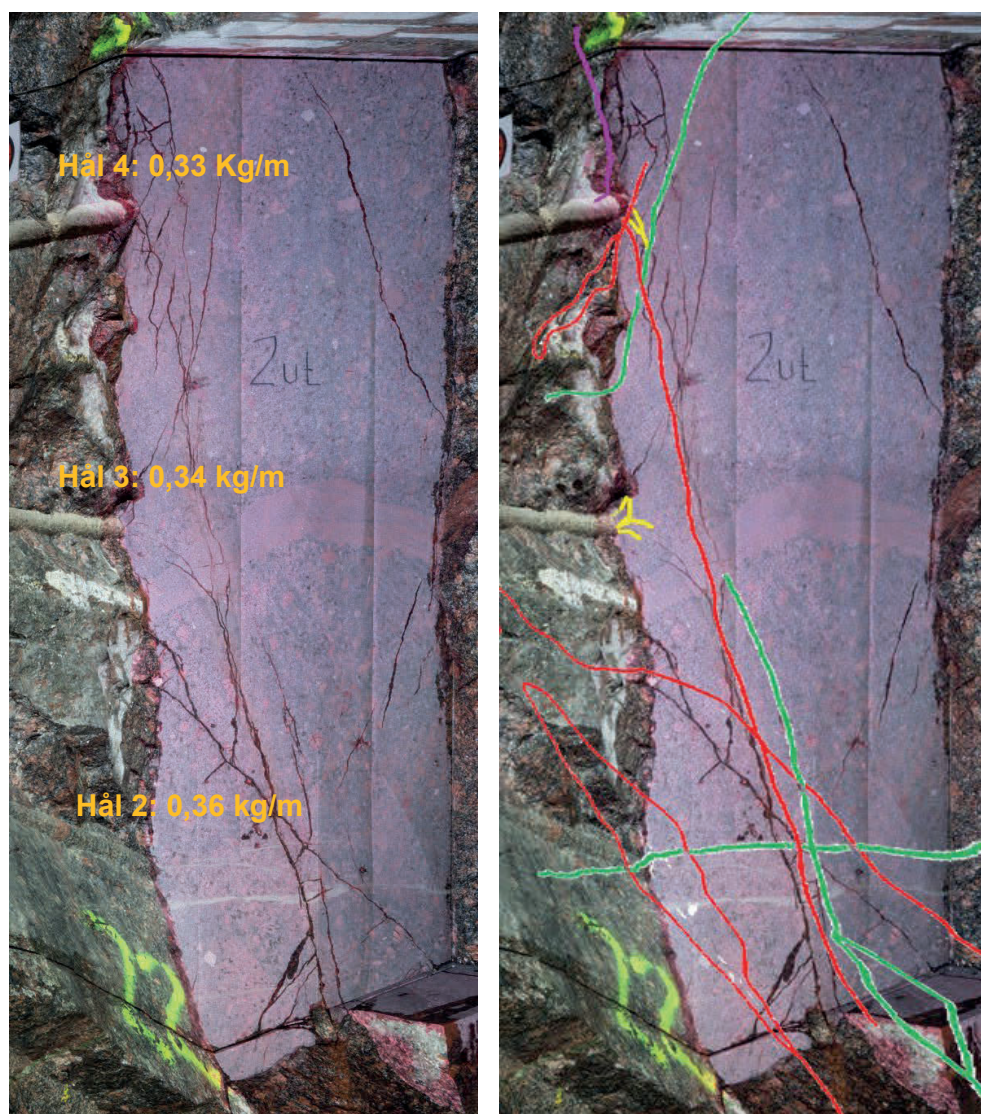
Figur 41. Snittytan TASN sektion 12 m, riktning **in** med penetrantvätska samt tolkade spricktyper.



Figur 42. Snittytan TAS04, sektion 18 m riktning **ut** , med penetrantvätska samt tolkade spricktyper.



Figur 43. Snittytan TAS04, sektion 18 m, riktning **in** med penetrantvätska samt tolkade spricktyper.



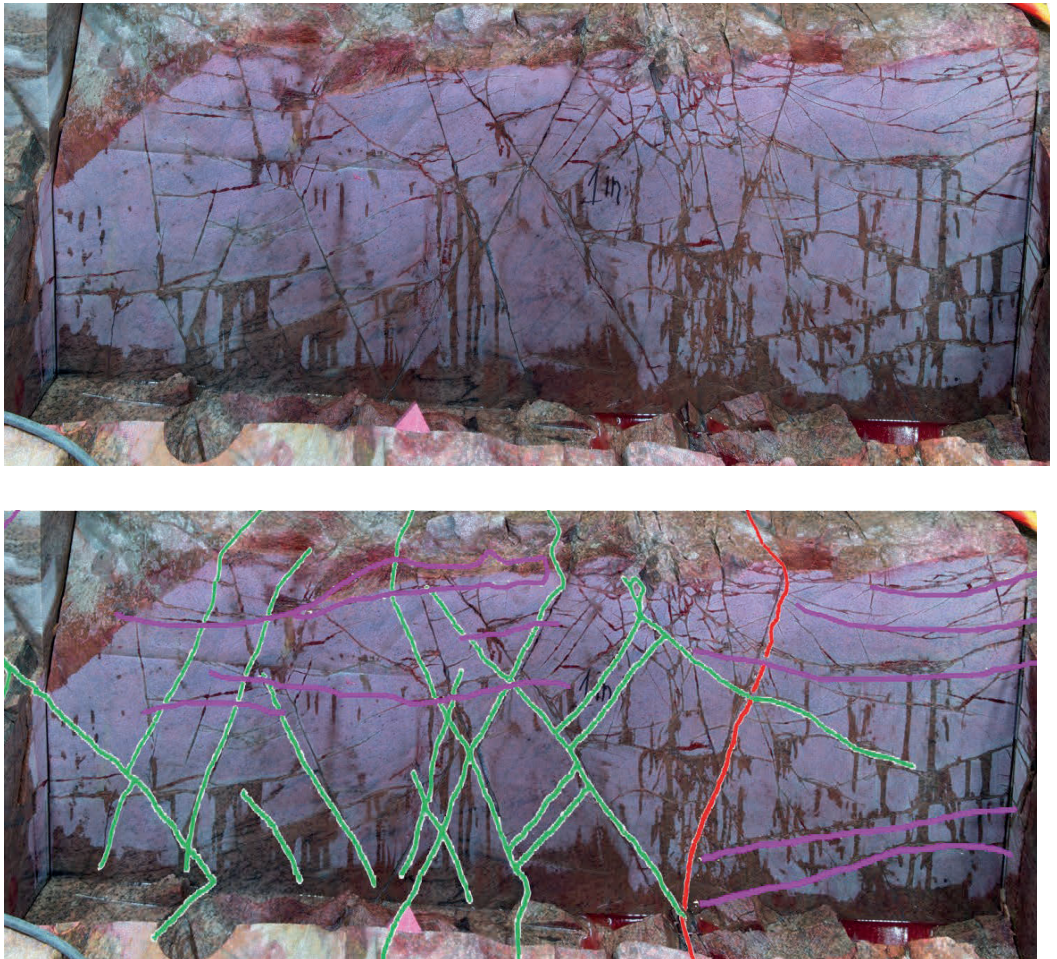
Figur 44. Snittytan TAS04, sektion 22 m riktning **ut** med penetrantvätska samt tolkade spricktyper.



Figur 45. Snittytan TAS04, sektion 22 m riktning **in** med penetrantvätska samt tolkade spricktyper.



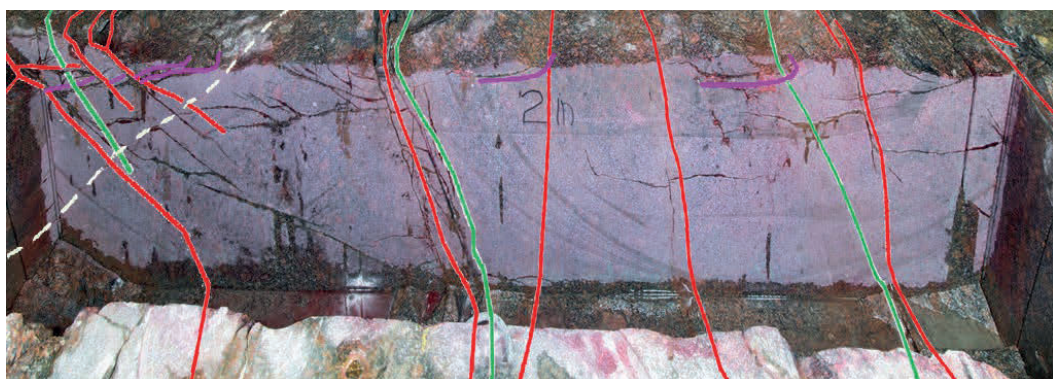
Figur 46. Snittytan TAS04, Sula sektion 25,5 m, riktning **ut** med penetrantvätska samt tolkade spricktyper.



Figur 47. Snittytan TAS04, Sula sektion 25,5 m, riktning **in** med penetrantvätska samt tolkade spricktyper.



Figur 48. Snittytan TAS 04, Sula sektion 34 m, riktning **ut** med penetrantvätska samt tolkade spricktyper.



Figur 49. Snittytan TAS 04, Sula sektion 34 m riktning in med penetrantvätska samt tolkade spricktyper.

BILAGA III RESULTAT FRÅN KARTERING AV SPRÄNGSPRICKOR KISTA

I den här bilagan presenteras resultat från kartering avsprängsprickor för samtliga slitsytor i Kistatunneln. Figur 50 till 57 visar ytorna med och utan tolkade sprickor efter applicering av penetrantvätska. Snitten är namngivna med tunnel, sektion och riktning **ut** respektive **in** ur tunneln. Gröna linjer avser tolkade naturliga sprickor och gula linjer avser tolkade sprängsprickor. Blå linjer markerar spränginducerade sprickor.

N= Naturlig spricka

S=spränginducerad spricka

B=Spricka orsakad av expanderbult

SEKTION 565

Denna sektion var hög och tvärade 3 halvpipor samt ett helt laddat hål. För att underlätta karteringen indelades sektionen i en övre och en nedre del.

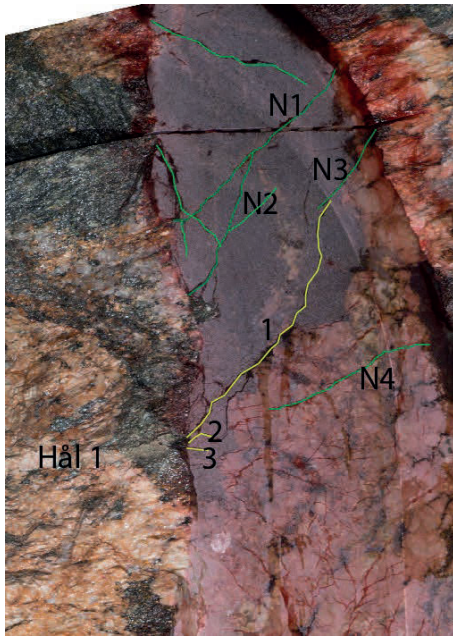
Berget under hål 1 bestod mestadels av pegmatit och var därför genomkorsat av en mängd naturliga sprickor, se Figur 50 och Figur 51. Pegmatiten brukar fungera som ett filter för sprickor och det var även tydligt här med få sprängsprickor.

Snittyta in

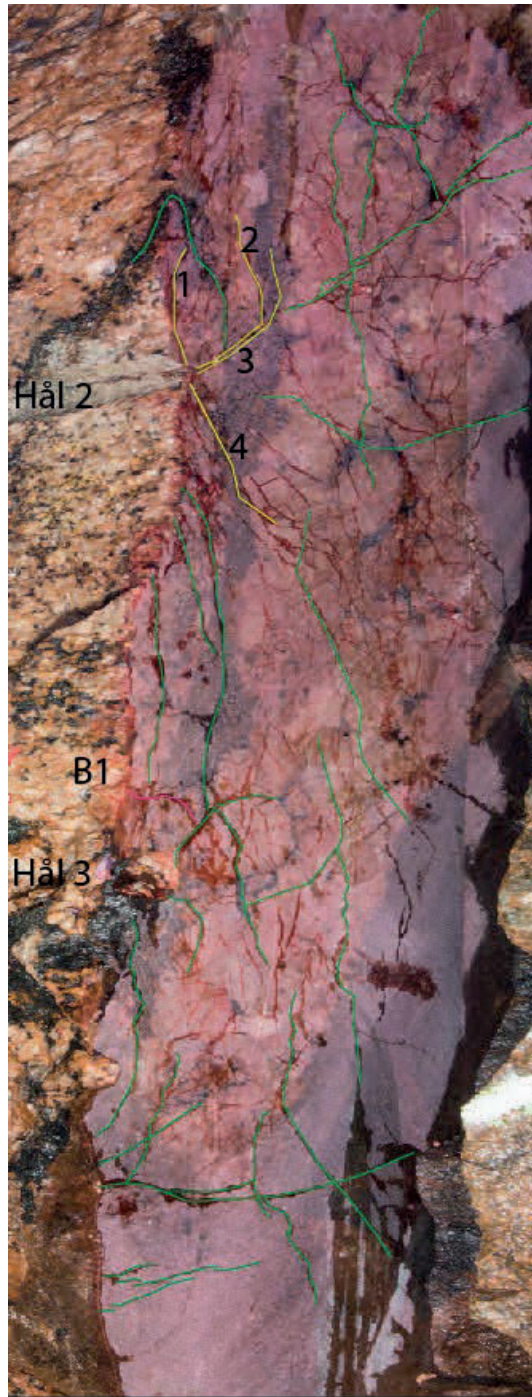
Det var endast ett fåtal sprängsprickor från hål 1 och hål 2 med spricklängder på som kortast 2,9 cm och som längst 39 cm. Nära hål 3 finns en spricka från en expanderbult som användes vid fastsättning av sågen. Hål 3 var fyllt med sprängämne och har således inte detonerat och hade därför inga sprängsprickor.

Snittyta ut

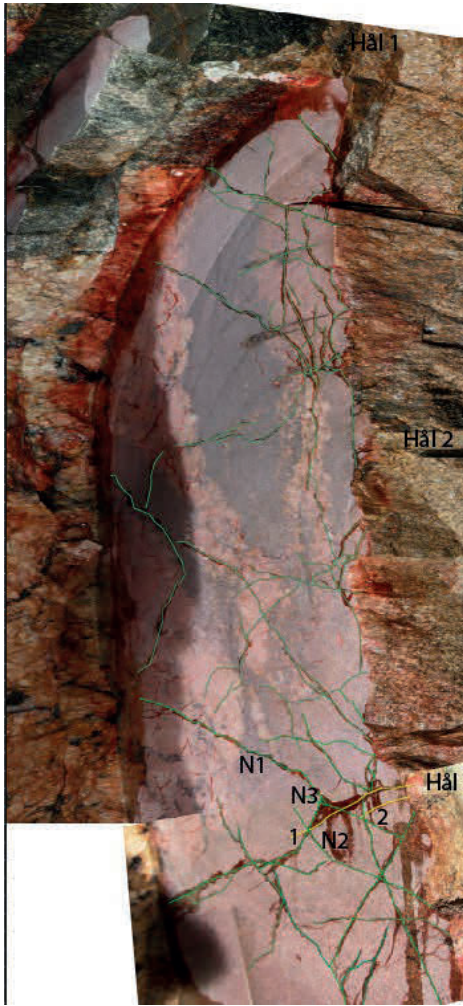
Hål 1 ligger i översta delen av snittet. Detta hål var fullt med sprängämne och har därför inte detonerat. Hål 2 har antagligen inte detonerat ty det fanns inga sprickor från detta hål. Från hål 3 fanns två sprängsprickor, varav den längsta sprickan var 19,5 cm. Hål 4 har inte detonerat. Även detta hål var fyllt med sprängämne.



Figur 50a. Sektion 565 övre in



Figur 50b. Sektion 565 nedre in



Figur 51a. Sektion 565 övre ut

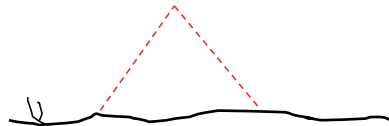


Figur 51b. Sektion 565 nedre ut

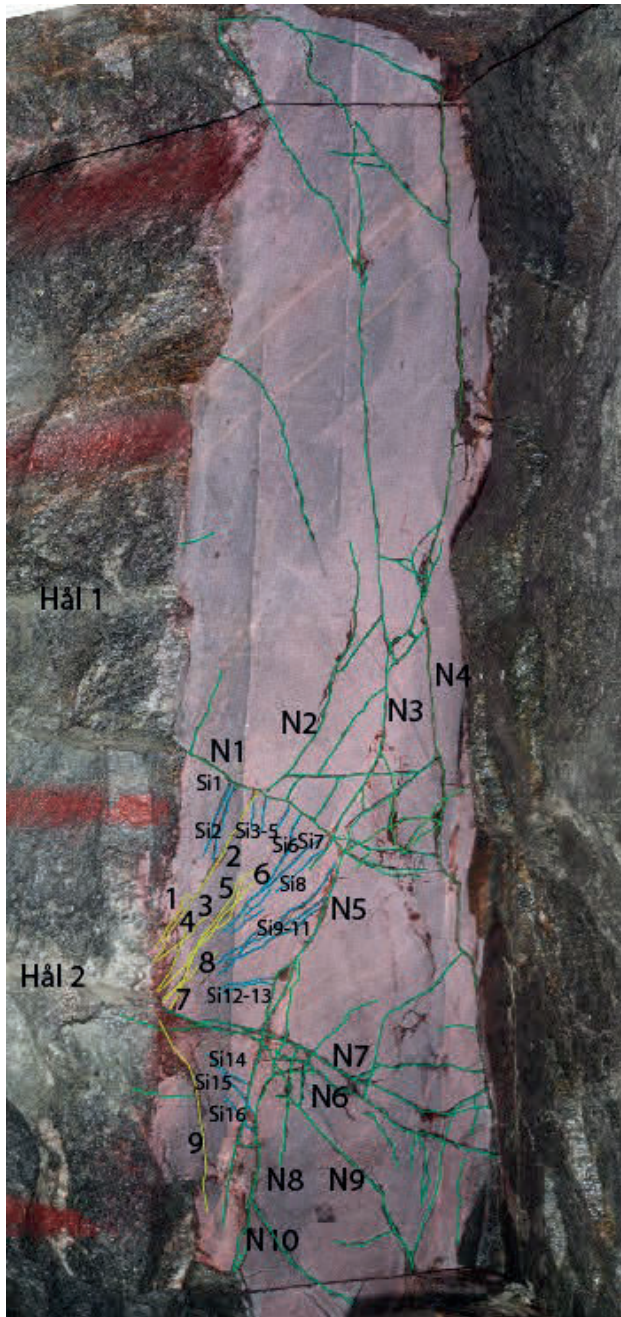
SEKTION 604 in

Denna sektion tvärades av sprickor/slag som bildade en kil vilket innebar att berget var ganska bomt. Figur 50 visar ett foto av sektionen. Detta snitt består enbart av vägg in då vägg ut följer det naturliga sprickplanet. Figur 52 visar resultatet av karteringen.

Hål 1 saknar sprickor och därför har troligen inte hål 1 detonerat. Från hål 2 finns 9 sprängsprickor med spricklängder på 8-27 cm. En av de längsta sprickorna terminerar mot en naturlig spricka. Det finns dessutom ett större antal spränginducerade sprickor som utgår från en naturlig spricka och har riktningen mot hål 2. Snittet tväras också av många naturliga sprickor. Många av dessa sprickor kan följas ut till och längs med tunnelväggen.



Figur 52. Sektion 604 med kilformade sprickplan



Figur 53. Sektion 604 in

Sektion 623

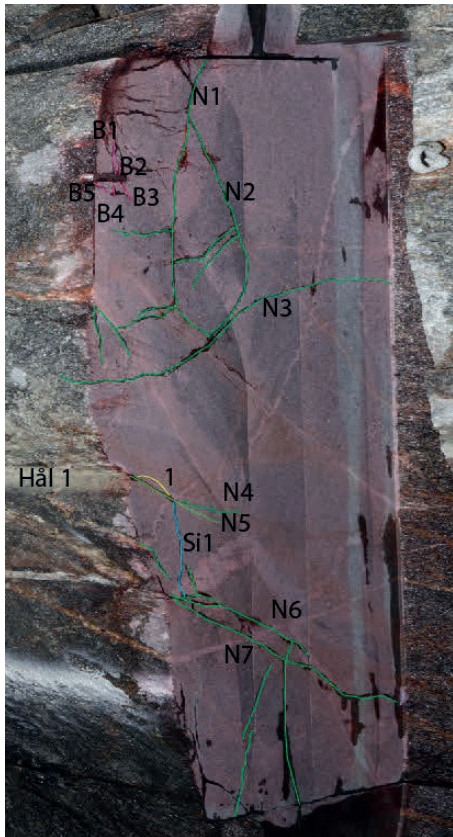
I denna sektion fanns bara ett hål och från detta hål endast några få sprickor. En berättigad fråga är huruvida detta hål har detonerat riktigt? Figur 54 visar resultatet av karteringen.

Snittyta in

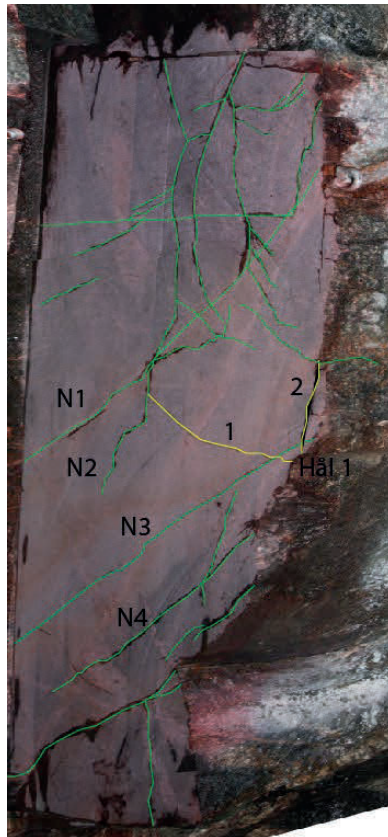
Det fanns en sprängspricka från hålet som var drygt 6 cm och terminerar mot en naturlig spricka. Det fanns också spränginducerad spricka mellan ett par naturliga sprickor. Från ett bulthål fanns det en handfull sprickor. I snittets övre del finns en sprickros men det saknas ett hål. Längden på dessa sprickor är 15-20 cm. I övrigt naturliga sprickor som delvis öppnats längs geologisk struktur eller som tvärrar snittet.

Snittyta ut

Från hålet fanns två sprängsprickor varav den längsta var 26 cm och den terminerar mot en naturlig spricka. Den andra sprickan var drygt 15 cm och terminerar mot tunnelväggen. I övrigt naturliga sprickor som delvis öppnats längs geologisk struktur eller som tvärrar snittet.



Figur 54a. Sektion 623 in



Figur 54b. Sektion 623 ut

Sektion 635

I denna sektion fanns två hål med sprängsprickor. Dessutom fanns många radiella sprickor i nedre delen av snitten men hål saknades. Figur 55 visar resultatet av karteringen.

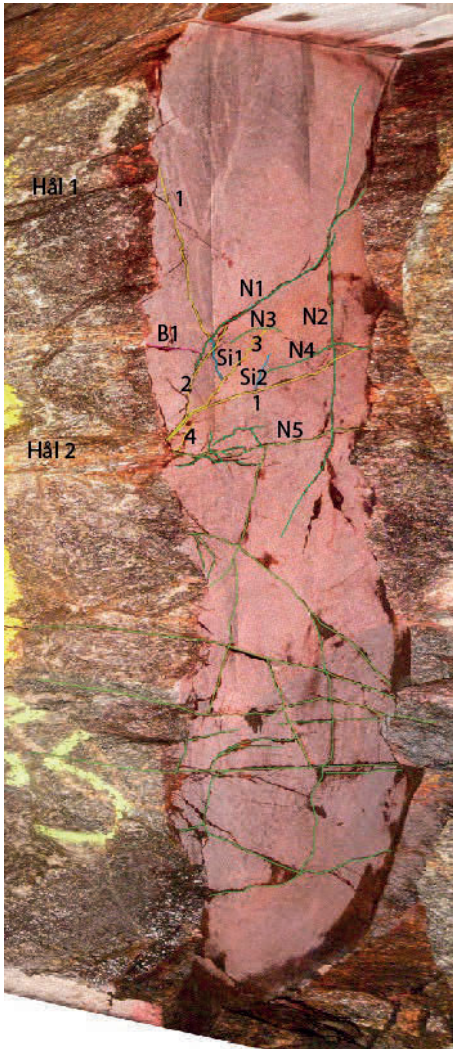
Snittyta in

Det översta hålet, hål 1, hade en sprängspricka som var drygt 30 cm och terminerade mot en naturlig spricka. Från hål 2 fanns det fyra sprängsprickor varav den längsta närmare 40 cm. Även denna spricka terminerar mot en naturlig spricka. I närheten av hål 2 fanns även en spränginducerad spricka. I snittets nedre del fanns ett antal radiella sprickor men inget hål. Dessa radiella sprickor hade en längd på 10-15 cm. I övrigt naturliga sprickor som delvis öppnats längs geologisk struktur eller som tvärrar snittet.

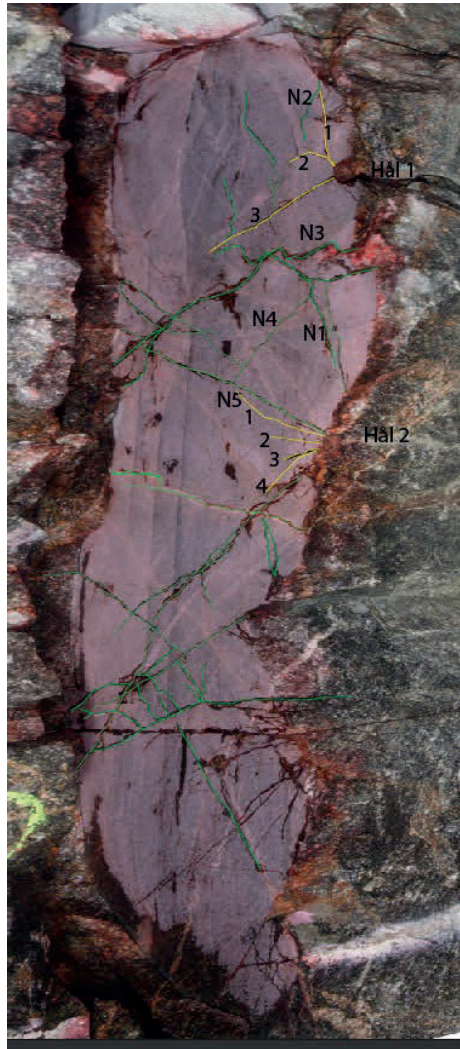
Snittyta ut

Från det översta hålet i snittväggen, hål 1, fanns tre sprängsprickor med en maximal längd på ca 30 cm. Från hål 2 fanns det fyra sprängsprickor varav den längsta ca 20 cm. I snittets nedre del fanns ett antal radiella sprickor men inget hål. Dessa radiella sprickor hade en längd på 10-30 cm.

I övrigt naturliga sprickor som delvis öppnats längs geologisk struktur eller som tvärrar snittet. Några av dessa sprickor går mycket tydligt att följa in i tunnelväggen.



Figur 55a. Sektion 635 in



Figur 55b. Sektion 635 ut

Sektion 670

I denna sektion fanns två hål. Från det övre hålet i sektionen fanns ett par sprängsprickor. Det nedre hålet i sektionen saknade sprängsprickor. Har hålen detonerat riktigt? Tunnelväggen i sektionen hade en kvarvarande "bulle" just vid utsågningen vilket skulle kunna tyda på att hålen inte detonerat riktigt. Figur 56 visar resultatet av karteringen. Även en skiva från sågningen karterades från detta snitt, se Figur 57.

Snittyta in

Från det övre hålet i snittet fanns endast två korta sprängsprickor som var mindre än 5 cm. Det undre hålet i sektionen saknar sprängsprickor. I övrigt naturliga sprickor som delvis öppnats längs geologisk struktur eller som tvärrar snittet.

Snittyta ut

Inga sprängsprickor från hålen kunde observeras. Det undre hålet i sektionen saknar sprängsprickor. En kraftig naturlig spricka, N5, finns längs hålet och in mot snittvägg in. I underkant av hål 2 finns några bultsprickor.

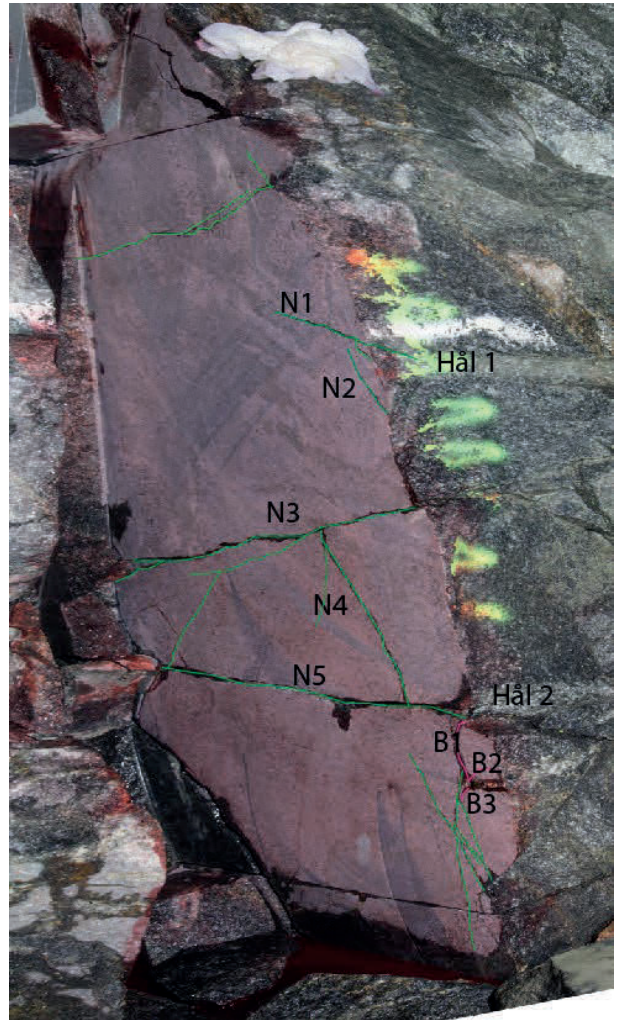
I övrigt naturliga sprickor som delvis öppnats längs geologisk struktur eller som tvärrar snittet. Några av dessa sprickor går mycket tydligt att följa in i tunnelväggense t.ex. spricka N3.

Skiva

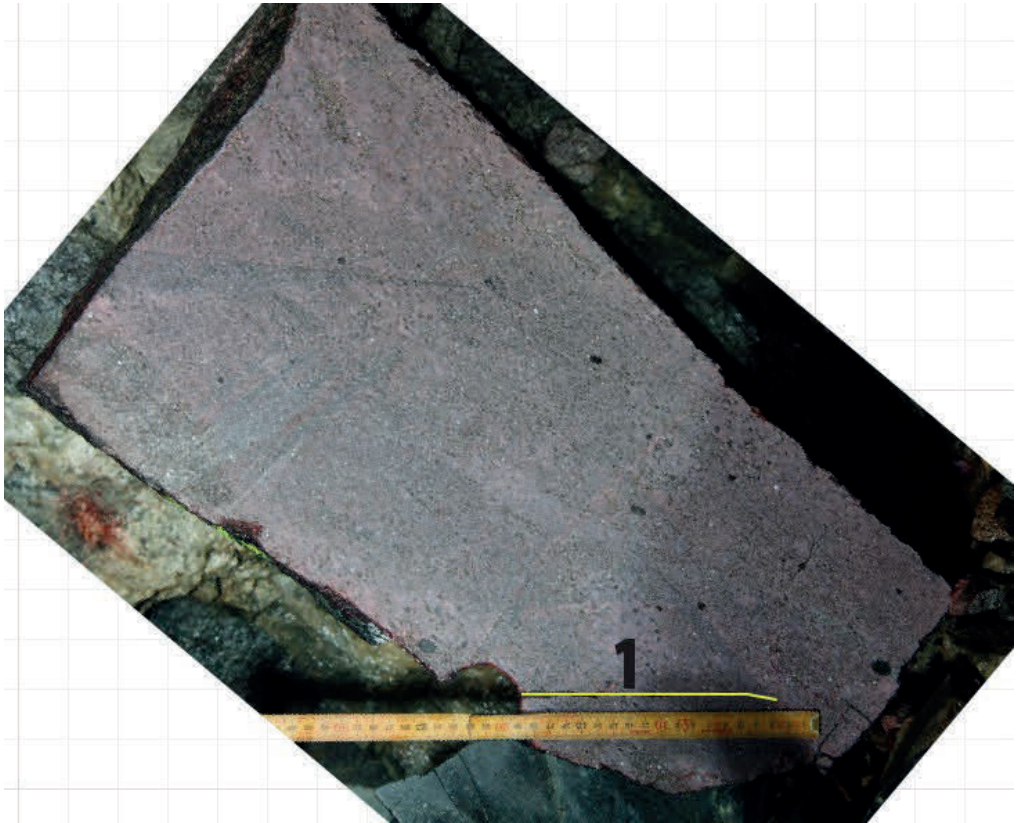
I den utsågade skivan hittades en sprängspricka som var 16 cm lång.



Figur 56a. Sektion 670 in



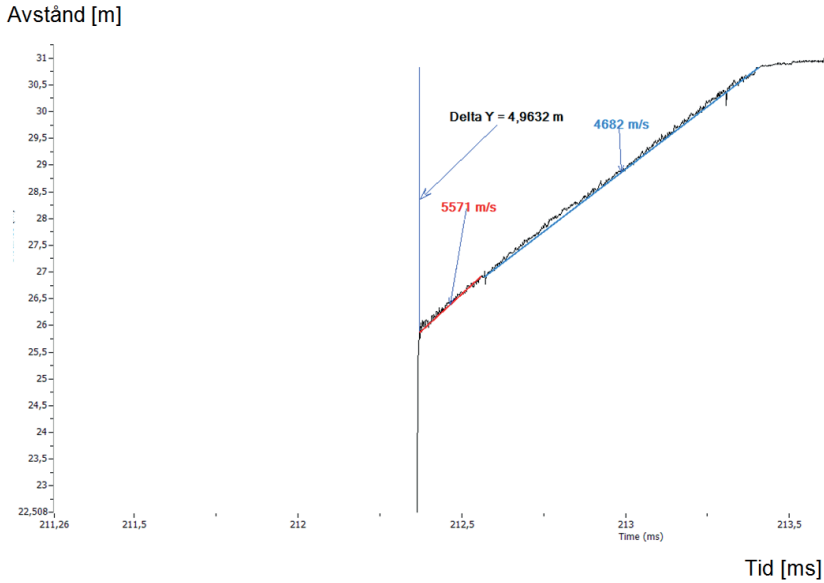
Figur 56b. Sektion 670 in



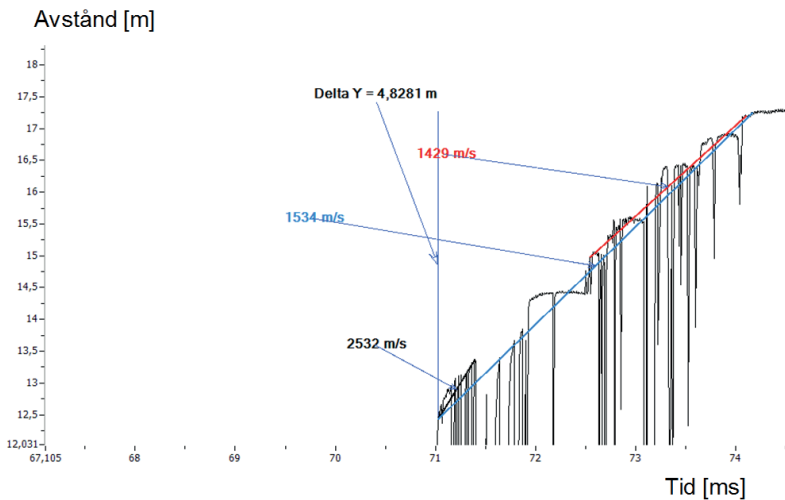
Figur 57. Utsågad skiva från sektion 670

BILAGA IV VOD-MÄTNINGAR I KISTA OCH KANKBERG

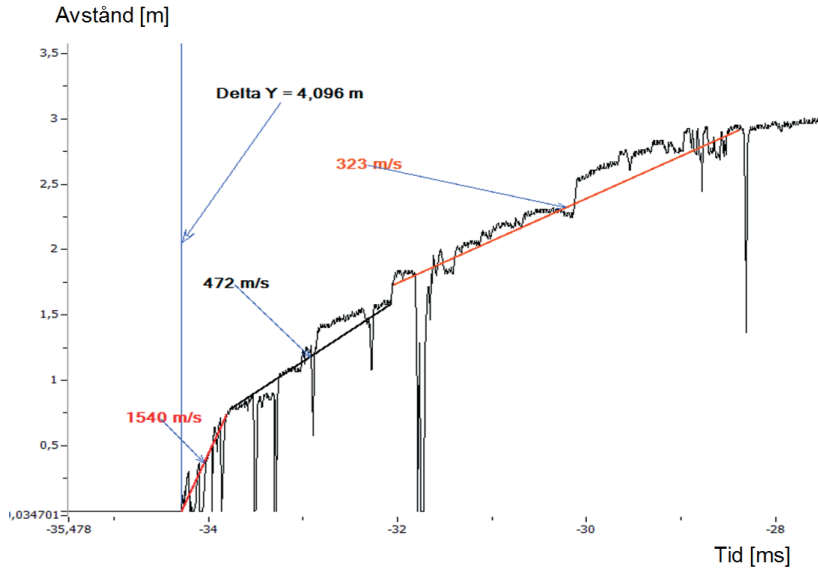
Figur 58 till 61 visar motståndskurvor från VOD-mätning i Kistatunneln. Figur 62 och 63 visar motståndskurvor från VOD-mätningar i Kankbergsgruvan.



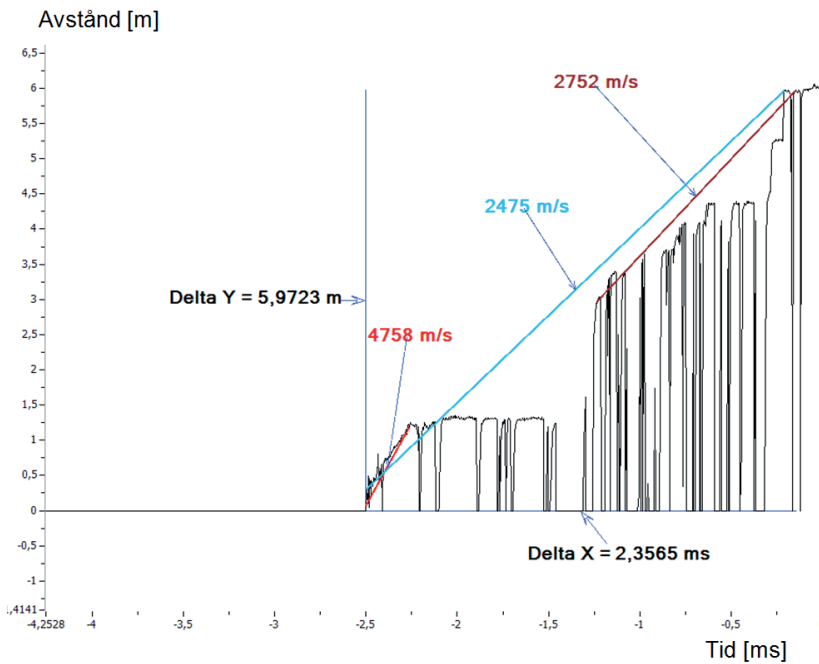
Figur 58. Motståndskurva för kilhål i Kistatunneln laddat med 1,8 kg/m. Del av mätning.



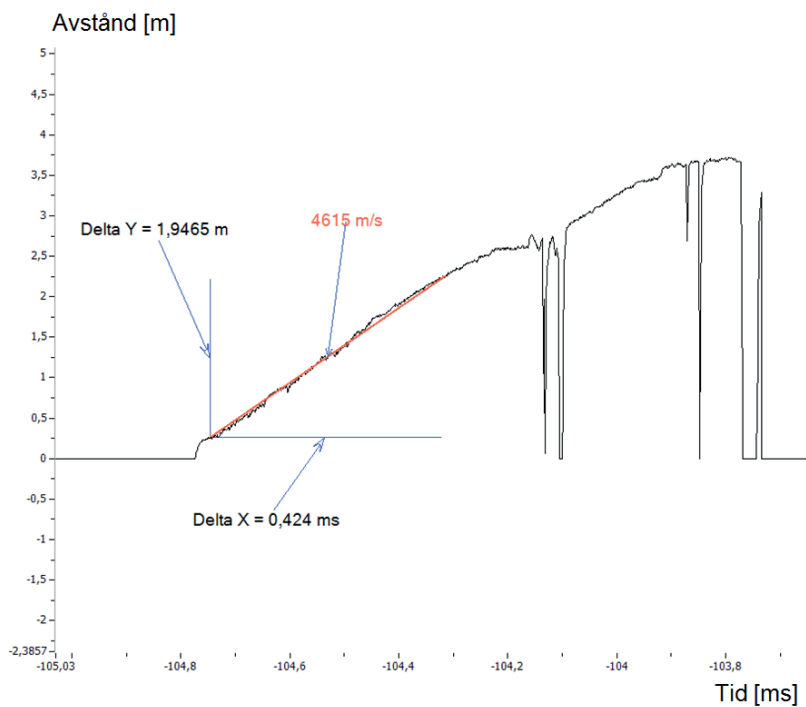
Figur 59. Motståndskurva för konturhål i Kistatunneln laddat med 0,35 kg/m. Del av mätning.



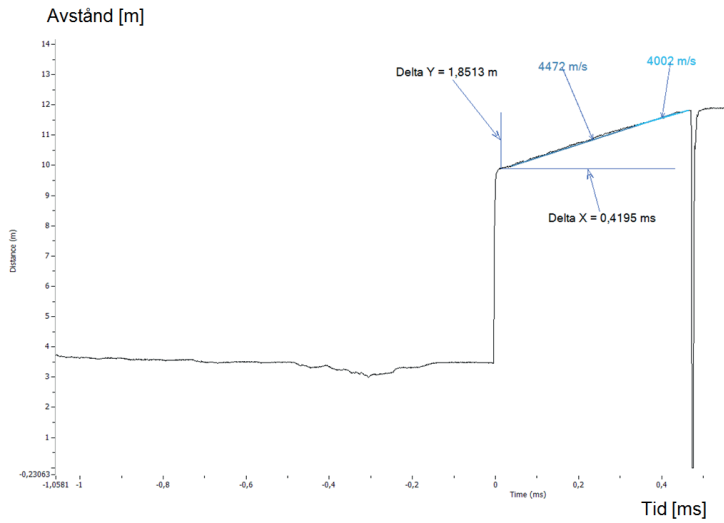
Figur 60 Motståndskurva för konturhål i Kistatunneln laddat med 0,35 kg/m. Del av mätning.



Figur 61. Motståndskurva för konturhål i Kistatunneln laddat med 0,8 kg/m . Del av mätning.



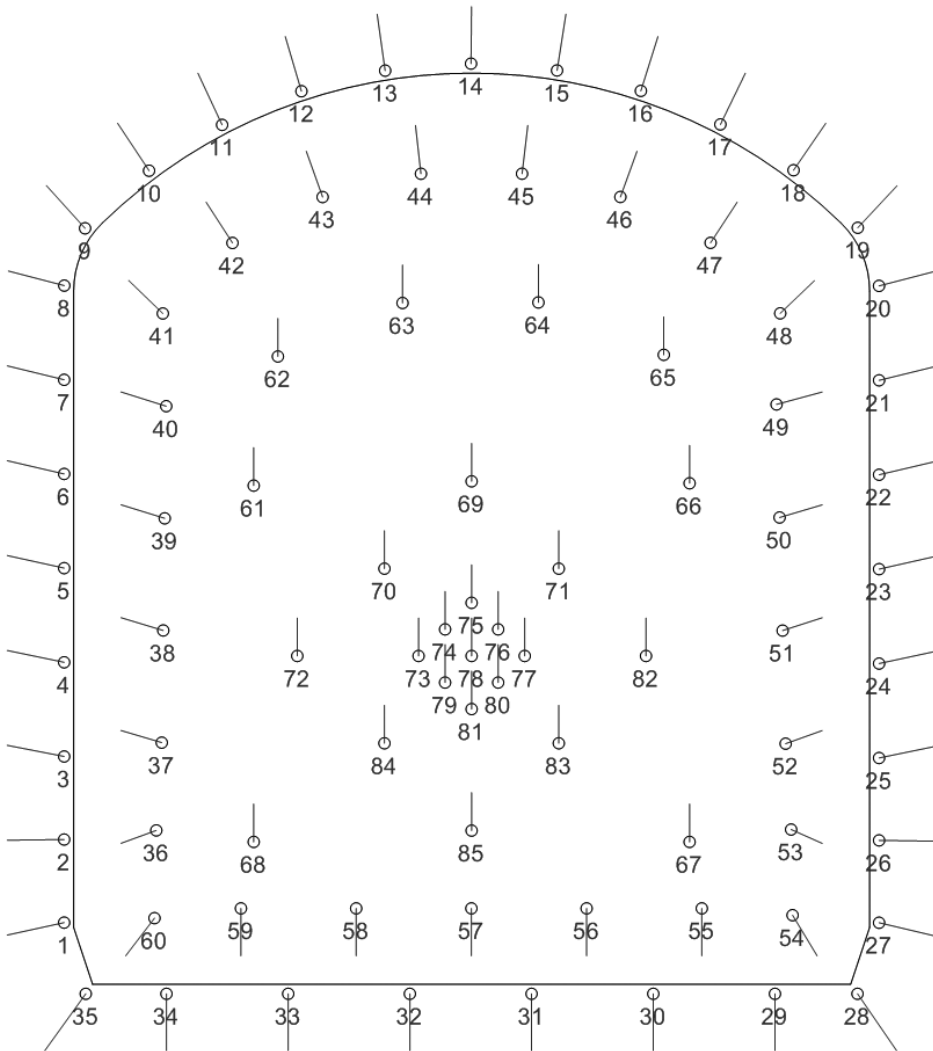
Figur 62. Motståndskurva för hål i takfällning i Kankbergsgruvan, laddat med 1,8 kg/m . Del av mätning.



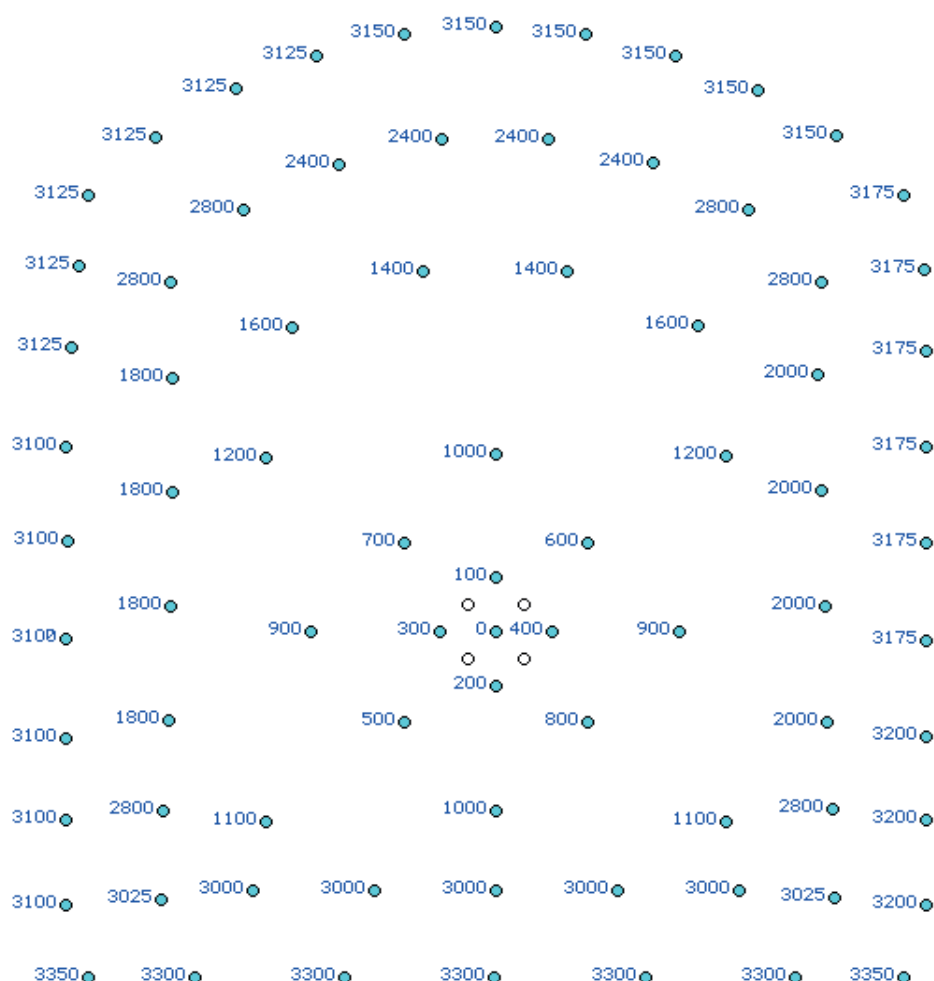
Figur 63. Motståndskurva för hål i takfällning i Kankbergsgruvan laddat med 1,2 kg/m . Del av mätning.

BILAGA V BORRPLAN OCH TÄNDPLAN

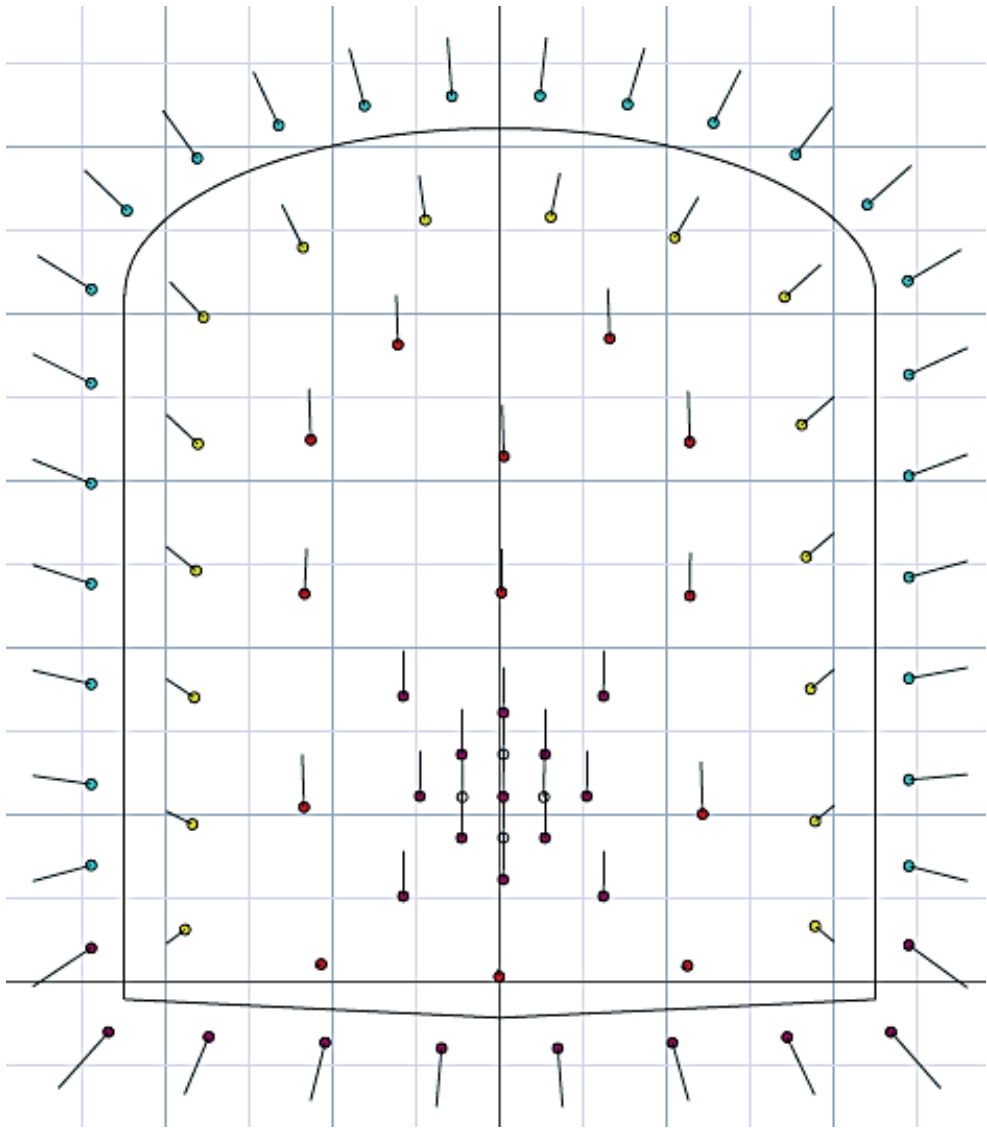
I den här bilagan visas den teoretiska borrarplanen och tändplan som användes vid drivning av TASN och TAS04 samt borrarplanen i Kistatunneln (Figur 64 till 66).



Figur 64. Teoretisk borrarplan för TASN och TAS04.



Figur 65. Tändplan för TASN och TAS04. Elektroniska tändare (i-kon VS) används i kontur och botten. För resterande hål användes Nonel LP-serien.



Figur 66. Hålsättning för Kistatunneln. Hålens färger representerar olika håltyper i laddplanen.



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

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

ISSN 1104-1773