

Studie av vajersågning för deponeringstunnlar

Rolf Christiansson, Tomas Lehtimäki, Stig Pettersson
Svensk Kärnbränslehantering AB

Mats Olsson, EDZ consulting

December 2013

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co

Box 250, SE-101 24 Stockholm
Phone +46 8 459 84 00



ISSN 1402-3091

SKB R-13-06

ID 1371977

Studie av vajersågning för deponeringstunnlar

Rolf Christiansson, Tomas Lehtimäki, Stig Pettersson
Svensk Kärnbränslehantering AB

Mats Olsson, EDZ consulting

December 2013

Förord

Detta projekt har genomförts i samarbete mellan Diamant Wire Teknikk AS (DWT), NCC Constuction Sverige AB och SKB. Finansiellt stöd har också givits till DWT från Innovation Norge genom utvecklingsprojektet ”Tårn til blindkutt, rette gulv og tak, dokumentation av arbeidsprosedyre og process”.

Arbetet utfördes 2011–2012 inom ramen för entreprenad Norrström i projekt Citybanan, Stockholm, där DWT har varit underentreprenör åt NCC, som har varit en viktig samarbetspartner i att losshålla det frisågade berget samt stå för alla praktiska arrangemang kring detta projekt inom ramen för deras arbetsområde.

Projektet hade inte varit möjligt utan byggherrens, Trafikverkets medgivande, och entreprenörernas förmåga att koordinera detta utvecklingsprojekt med deras ordinarie uppdrag.

Till samtliga aktörer riktas ett varmt tack för att möjligheten gavs att följa upp denna intressanta teknik.

Rapporten har utarbetats i samarbete mellan författarna och Roger Sjöland DWT, Göran Magnell NCC, Göran Ajling NCC samt Stefan Sidander NCC.

Stockholm, december 2013.

Rolf Christiansson, SKB

Innehåll

1	Inledning	7
2	Förutsättningar	9
2.1	Försöksplats	9
2.2	Geometriska förutsättningar	10
2.3	Bergtekniska förutsättningar	11
3	Planering	15
3.1	Borrning och upprymning av hålen för vajersågningen	15
3.2	Vajersågningen av golv, väggar och tak	16
3.3	Losshållning av det frisågade berget	18
3.4	Planering av vibrationsmätningar	19
3.5	Uttag av bergplugg för studie av sprängskador	20
4	Genomförande	21
4.1	Borrning för vajersågning	21
4.2	Vajersågning	22
4.3	Losshållning av frisågat berg	22
4.3.1	Etapp 1	22
4.3.2	Etapp 2	24
4.3.3	Erfarenheter från tunneldrivningen	25
5	Resultat	27
5.1	Geometri och konturhållning	27
5.2	Uppföljning av sprängskador	30
5.2.1	Radarmätningar	30
5.2.2	Uttaget av bergpluggen	31
5.2.3	Sprickkartering av bergplugg	32
5.3	Spränginducerade vibrationer	34
6	Kostnader och resurser för alternativa berguttagsmetoder för deponeringstunnlar	35
6.1	Förutsättningar	35
6.2	Beskrivning av de olika uttagsmetoderna	36
6.2.1	Förutsättningar vid konventionell borrning och sprängning	36
6.2.2	Förutsättningar vid vajersågning av alla ytor	37
6.2.3	Förutsättningar vid vajersågning av enbart tunnelgolvet	38
6.2.4	Summering av kalkylunderlag	39
6.3	Produktionskostnader	39
7	Analys	41
7.1	Produktionstider	41
7.2	Kostnader	41
7.3	Rationaliseringsvinster	42
7.4	Utvecklingstrender	42
7.5	Summering	43
8	Rekommendationer	45
	Referenser	47
	Bilaga 1 Detaljerad beskrivning av borr- och sprängningsarbetet	49
	Bilaga 2 Produktionstider för de tre berguttagsalternativen	55

1 Inledning

Syftet med projektet var att demonstrera teknik för att såga en tunnel med dimension som en deponeringstunnel. Bergarbetet omfattade en 16 m lång rektangulär tunnel där konturen skapas genom vajersågning. Efterföljande losshållning av frisågat berg utfördes med konventionell borrar och sprängning. Syftet med denna rapport är att beskriva utfört arbete, samt jämföra teknik och kostnader för bergguttaget för deponeringstunnlarna utförd med konventionell borrar och sprängningen kontra att vajersåga hela eller delar av konturen.

Projektet avser utvecklingen av teknik och utrustning för bergschakt i tunnel med diamantvajersågning av golv, väggar och tak från stuff och in i berg. För att kunna göra detta krävs dels utrustning för att borra långa raka hål i berget och dels utrustning för att vajersåga berget från tunnelns front och inåt i berget. Om en rektangulär tunnel ska sågas ut inleds arbetet med att borra ett hål i varje hörn. I två av dessa hål för man in långa stänger med brytskivor längst in för diamantvajern och diamantvajern arrangeras som en slinga som kan rotera och hållas spänd allt eftersom bergmaterial sågas bort. Genom att upprepa installationen av stänger med brytskivor i de borrade hålen i hörnen av rektangeln är det möjligt att såga tunnelns golv, sidor och tak utifrån och in.

Projektet genomfördes under 2011/2012 och var ett utvecklingsprojekt med deltagande från NCC Sverige, Diamant Wire Teknikk AS (DWT) Norge, Innovasjon Norge och SKB Sverige.

Projektet utfördes i NCC:s entreprenad Norrström för Citybanan i Stockholm. DWT har utfört omfattande vajersågning för rulltrappor, ventilationsschakt, etc i Citybanan. DWT har även, på uppdrag av SKB, under ett antal år genomfört förstudier för att visa om vajersågning har tekniska och ekonomiska fördelar jämfört med konventionell borrar och sprängning av deponeringstunnlar.

Under 2010 tog DWT initiativet till att genomföra detta utvecklingsprojekt som är finansierat av de deltagande parterna. Budgeten för projektet är cirka 5 MSEK av vilket SKB:s del betalats genom in-kind bidrag inom projektet. Innovasjon Norge har bidragit med finansiering av projektet som ett utvecklingsstöd till DWT. Ett villkor från Innovation Norge för att delta i finansieringen var att den sågade tunneln inte skulle kunna användas i något kommersiellt syfte utan skulle förstöras efter genomfört projekt. Eftersom den valda platsen för demonstrationen var i en av spårledningarna i Citybanan, som sedan rymdes upp till slutlig dimension, var det enkelt att uppfylla detta villkor.

2 Förutsättningar

2.1 Försöksplats

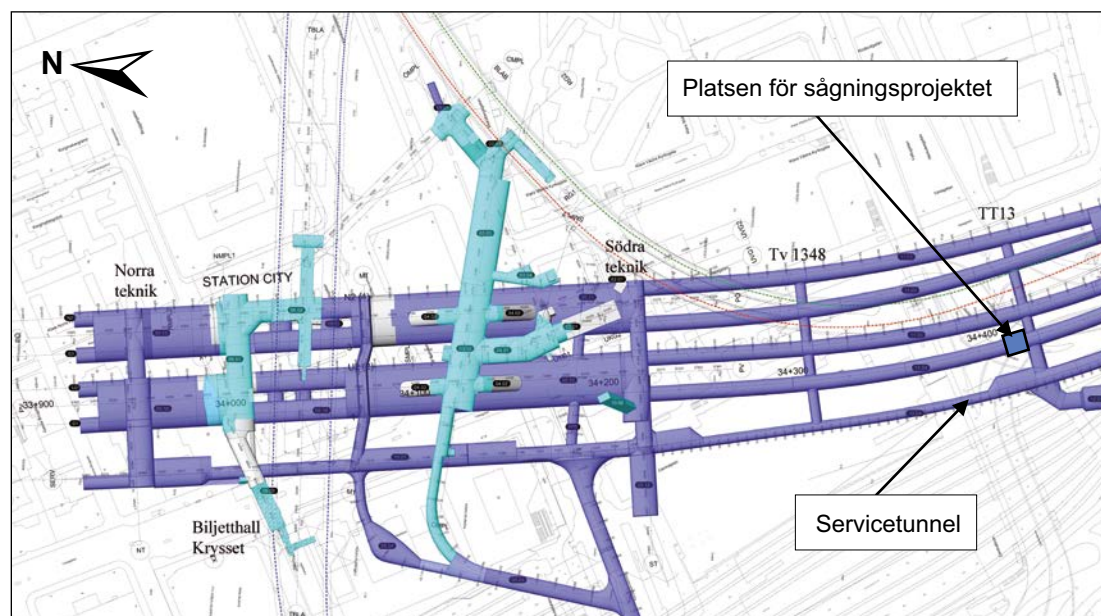
NCC:s entreprenad för Citybanan innehåller bland annat parallella spårtunnlar för tåg och det beslutades att en delsträcka i en av dessa spårtunnlar kunde användas för demonstration av vajersågning av en tunnel motsvarande SKB:s planerade deponeringstunnlar i det framtida Kärnbränsleförvaret.

Vid konventionell borrhning och sprängning av deponeringstunnlarna får dessa en hästskoform med plant golv men med välvt tak. Denna tunnelform är svår att åstadkomma vid vajersågning och därför är det enklast att välja ett rektangulärt tvärsnitt för deponeringstunneln. För demonstrationsprojektet med vajersågning var tanken att färdigställa en deponeringstunnel med sågat golv, sidor och tak men med en begränsad längd på ca 30 m. Sågningen skulle utföras i två etapper. Motivet för att såga i två etapper var att demonstrera hur en övergång mellan två etapper kan utföras.

Tyvärn visade det sig att geologin på den ursprungligt valda platsen i spårtunnel 1 var olämplig för projektet på grund av sprickrikt berg, varför en ny plats fick väljas. Den nya platsen medförde att längden på den sågade tunneln blev begränsad till ca 16 m men borrhning och sågning utfördes trots detta i två etapper. Den erfarenhet som finns om hur geologiska förhållanden påverkar förutsättningarna för vajersågning är i generella termer:

- sprickighetens påverkan på rakhet och riktning på borrhningen och behov av bergförstärkning,
- bergets sammansättning, främst kvartshalt, påverkar borrh- och sågningseffektivitet,
- bergspänningssituationen kan vara en potentiell risk att vajern nyper fast.

Figur 2-1 visar en planvy över det tunnelsystem som ingår i Citybanan. Den sågade tunneln genomfördes som en pilotunnel i spårtunnel 1 mellan sektionerna 34+405 och 34+420 som utgör en av de framtida tågtunnelarna i Citybanan i närheten av Centralstationen i Stockholm. Testplatsen valdes utifrån tillgänglighet med hänsyn till övriga bergarbeten och geologiska förutsättningar.

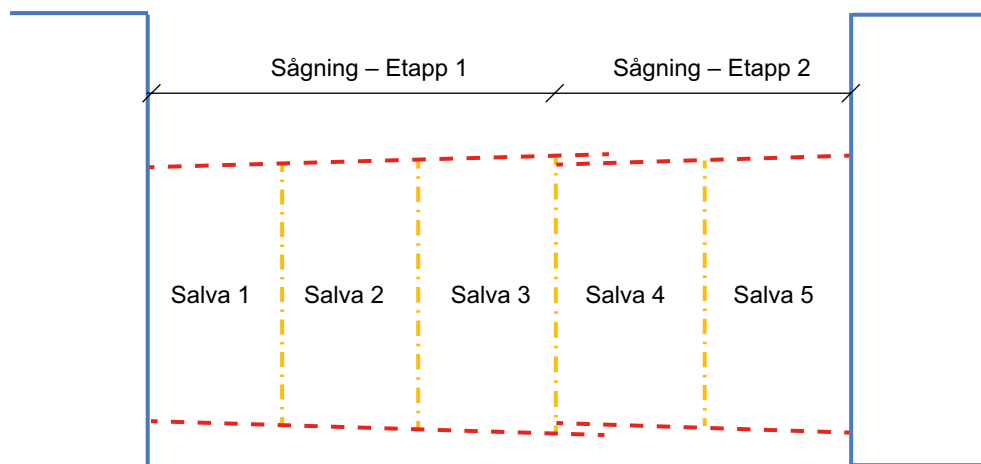


Figur 2-1. Planvy av tunnelsystemet i Citybanan i anslutning till Centralstationen i Stockholm. Platsen för sågningsprojektet är markerad. Bergtäckning är cirka 30 m.

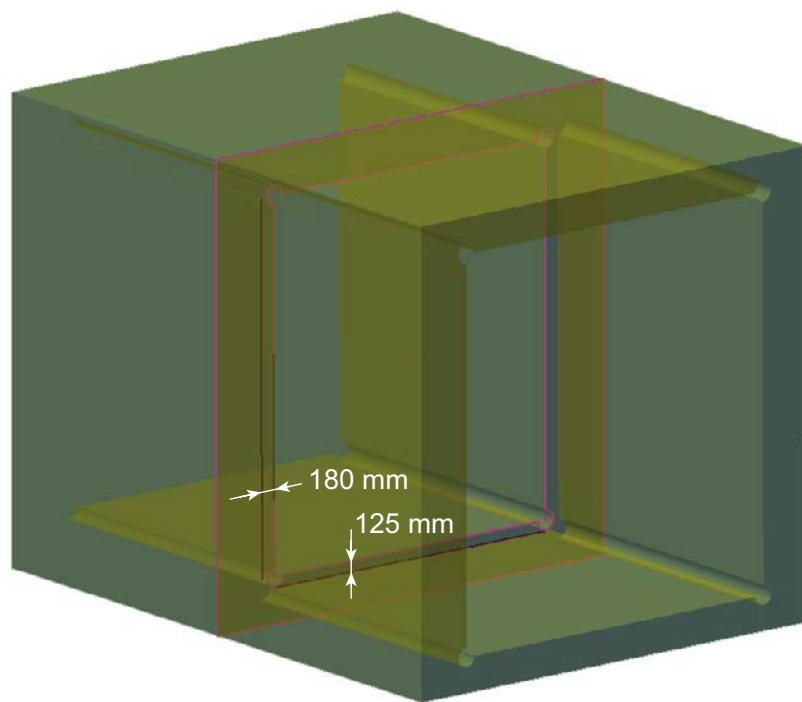
2.2 Geometriska förutsättningar

I en verklig situation i Kärnbränsleförvaret kan deponeringstunnlarna ha en längd på upp till 300 m. Utifrån tidigare borrhöringserfarenheter kan det vara svårt att med god precision borra de långa hål som skulle krävas om hela deponeringstunnelns längd skulle borras i en etapp. Borrhöring och vadersågning bedöms ske i etapper med en preliminär längd på ca 50 m för att klara toleranskrav på borrhöring, men det kan troligen ökas i framtiden. För att dokumentera vilken geometri som erhålls vid övergång mellan två sågningsetapper gjordes även detta sågningssprojekt i två etapper, figur 2-2.

Den sågade tunnelns storlek avsågs efterlikna SKB:s planerade deponeringstunnlar, dvs bredd 4,2 m och höjd 4,8 m. Tunnelns planerade geometri och etappindelning visas i figur 2-3.



Figur 2-2. Illustration av pilottunneln för demonstrationen av vadersågning i tåg tunneln Utsprängningen av det frisågade berget skedde i tre plus två sprängningar.



Figur 2-3. 3D illustration av deponeringstunneln enligt planeringen för sågningssprojektet. De redovisade måtten avser trappningen mellan Etapp 1 och 2.

Preliminärt är kraven på tunnelgeometrin att överberg, utanför teoretisk kontur, inte ska vara mer än 30 cm. Hålen för sågning måste utföras med en stickning för att ge plats för borrarutrustningen när nästa borretapp inleds. Därför valdes att dela upp utförandet i två etapper så erfarenheter från borring innanför en sågad tunnelgeometri kunde fås. Uppdelningen i etapper gjordes för att få en uppfattning om storleken på trappning mellan etapperna. Längden på Etapp 1 blev ca 10,5 m och Etapp 2 ca 5,5 m. Efter genomförd sågning och berguttag var tanken att även såga bort trappningen i golvet för att underlätta transport med fordon i tunneln, etc. Detta blev dock inte utfört på grund av tidsbrist, men är enkelt att åstadkomma.

Tunnelgolvet i Etapp 1 skevades för att testa precisionen i utförandet. Tanken är att man med hjälp av skevningen enkelt kan leda bort vatten från det plana golvet utan större åtgärder.

2.3 Bergtekniska förutsättningar

Den valda platsen har cirka 30 m bergtäckning och enligt den bergmekaniska bedömningen skulle den sågade tunneln ha tillräcklig stabilitet utan extra bergförstärkning men bergförstärkning kunde ske om det ansågs nödvändigt.

Injektering av försöksområdet var genomförd före start av sågningsprojektet vilket reducerade risken för att problem skulle uppstå i samband med berguttaget av deponeringstunneln.

Geologin i området kartlades med hjälp av borrhämlor från kärnborrhålen för vadersågningen. Dessa borrhämlor karterades enligt de rutiner som NCC använder för entreprenaden för Citybanan. Dock utfördes endast kartering av borrhämlor från det övre vänstra hörnet och det nedre högra hörnet. Sammanställning av resultatet av karteringen av de två borrhämlorna visas i figur 2-4.

Testområdet består av gnejs och folierad gnejs, som mestadels är medelkornig, med granitiska inslag och även pegmatitgångar förekommer. Berget är friskt utan omvandling. Foliationen är ganska lodrätt stupande med ost-västlig strykning och är kraftigare i slutet av tunneln. Enligt kärnkarteringen varierar frekvensen av naturliga sprickor mellan 0 och 9 stycken per kärnupptag och RQD-värdet (Rock Quality Designation) är mellan 53 och 100. Det förekommer enstaka lerfyllda sprickor med en sprickvidd på ca 10 mm.

Figur 2-5 visar utseendet av några av borrhämlorna från det övre vänstra respektive det nedre högra borrhålet. Det övre vänstra borrhålet uppvisade en sämre bergkvalité än berget i det nedre högra hålet.

Den geologiska kartering som NCC utfört i näraliggande tunnlar fanns också till hands och utifrån dessa gjordes en bedömning av bergkvaliteten till RMR 70–100 (Rock Mass Rating).

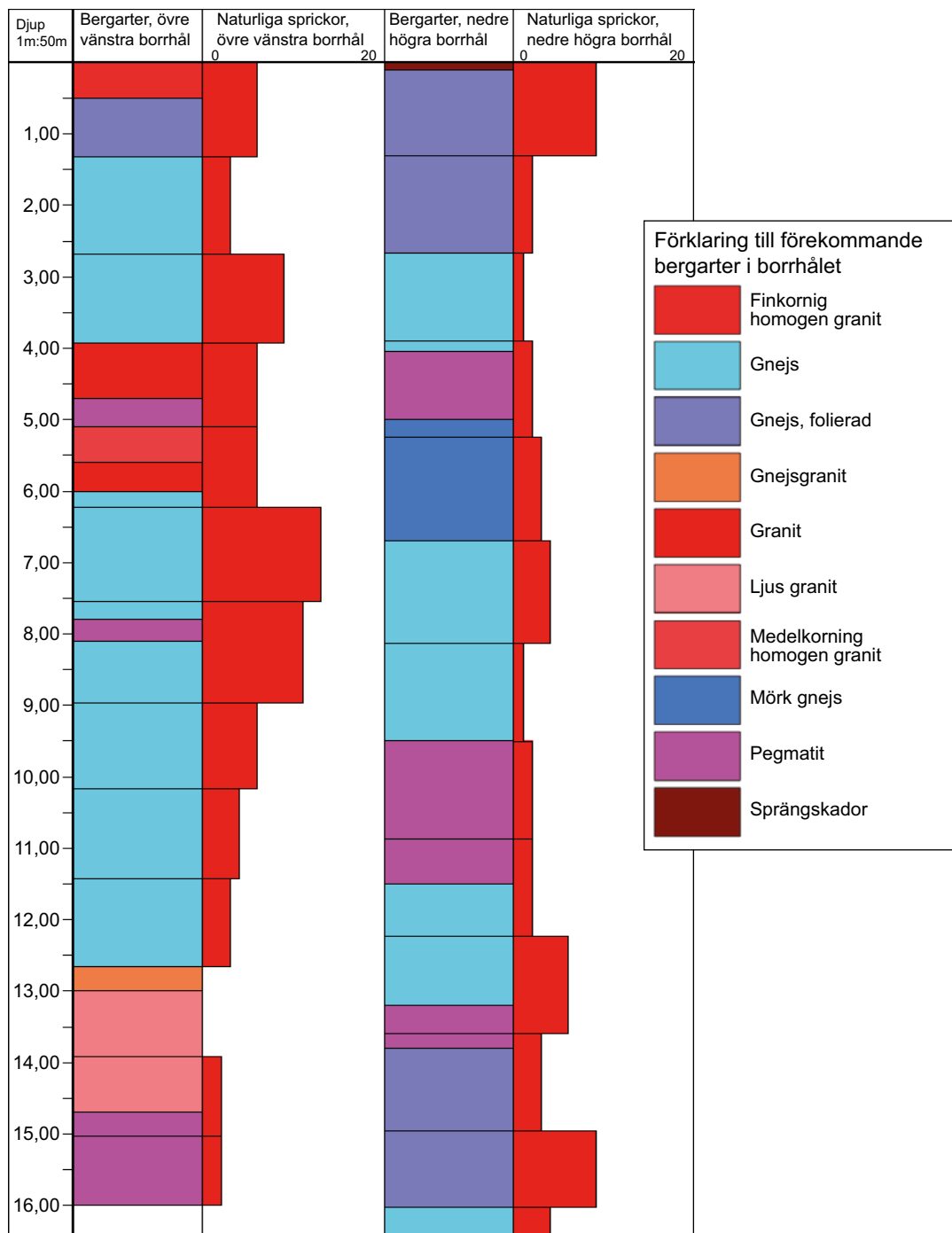
För att bedöma behov av eventuell bergförstärkning av det platta taket gjordes en 2D elastisk analys för den aktuella dimensionen och följande antaganden:

- Djup 30 m => $\sigma_v = 0,8$ MPa,
- $\sigma_H = 2$ MPa,
- $E = 45$ GPa,
- Påverkan från närliggande utsprängda tunnlar bedömdes vara liten.

Resultat av genomförda beräkningar framgår av figur 2-6.

Baserat på resultatet av genomförda beräkningar gjordes följande bedömningar:

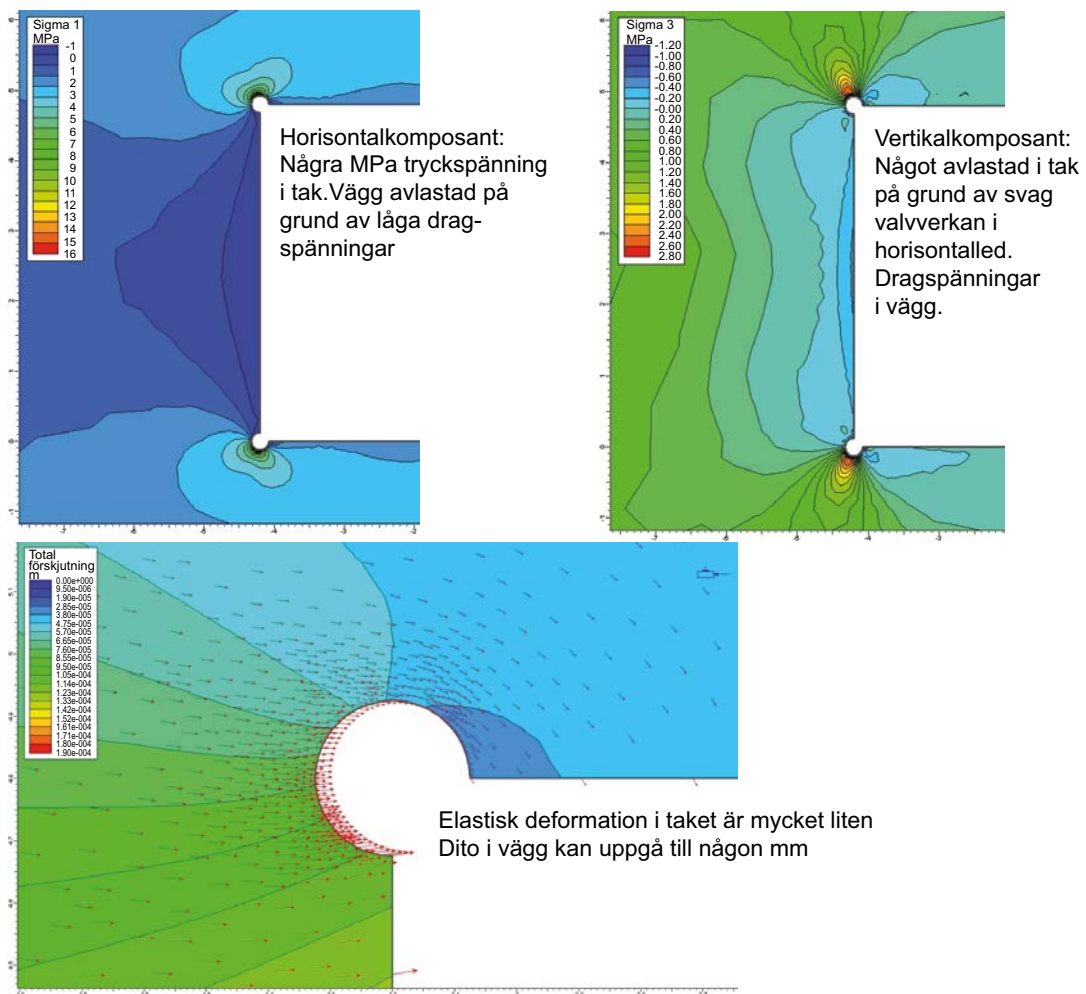
- Det är känt från andra tunnelprojekt i Stockholmsområdet att berggrunden har överskott på horisontella in situ bergspänningar. Med antagande om svagt överskott på horisontalspänningen, även i detta tämligen grunda tunnelläge, kan en svag valvbildande tryckkraft förväntas i tunneltaket.
- Väggar kommer däremot att vara avlastade.
- Sprickfördelningen i berget kommer att ha stor betydelse för förstärkningsbehov. Väggens blockighet ska beaktas eftersom väggen bedöms bli relativt sett mest spänningsavlastad och kan medföra behov av bergförstärkning.



Figur 2-4. Geologisk kartering av två av de 16 m långa borrhålen. Kolumnen till vänster visar det övre vänstra borrhålet och kolumnen till höger visar det nedre högra borrhålet.



Figur 2-5. Foto av lådor med borrkärnor från det övre vänstra respektive det nedre högra borrhålet enligt figur 2-4.



Figur 2-6. De övre bilderna visar beräknade horisontal- och vertikalspänningar. Den nedre bilden visar detalj av deformationer kring vänstra övre borrhålet.

3 Planering

3.1 Borrning och upprymning av hålen för vajersågningen

För att kunna utföra vajersågning från fronten och inåt måste det finnas borrhål in i berget som har tillräckligt stor diameter för att stänger med brytskivor för diamantvajern ska kunna installeras.

Borrning av hålen i de fyra hörnen av tunneln inleds genom kärnborrning och kärnorna placeras i lådor och karteras. Därefter sker en upprymning i två steg till en slutlig diameter på 255 mm. Denna diameter krävs för att stängerna med brytskivor för diamantvajern ska kunna föras in. Figur 3-1 är ett foto av tunneln fronten av spårtunneln där de fyra hålen för den rektangulära deponeringstunneln är borrade och upprymda.

Borrningen i den blivande tunnelns fyra hörn utförs i tre steg enligt följande:

Steg 1 – Den första borrningen utförs som ett kärnborrhål och utgör pilothål för den efterföljande upprymningen. För att uppfylla kraven på precision för denna borrning användes en kärnbormaskin Sandvik Onram 1000 och borrhålets diameter \varnothing 76 mm, se figur 3-2.

Kärnbormaskinen är modifierad för att säkerställa avvikelsepriktionen < 5 cm över en borrhållängd på upp till 60 m. Borrningen av pilothålet med en kärnborrutrustning ger önskad precision plus att den också ger borrhållådor för kartering av berget. De fyra borrhålen i tunnelns hörn ger en mycket god information om bergets egenskaper och förekomst av vattenförande sprickor.

Steg 2 – När pilothålet är färdigborrat så byter man till sänkborrnings. Genom denna sänkborrnings ökas hålets diameter från 76 mm till 165 mm. Sänkborrnings utfördes med en Geowelltech bom som är specialanpassad och ombyggd för ändamålet så den kan bultas på bäraren till kärnborrutrustningen. Denna lösning medför att det räcker med en uppställning och inmätning för kärnborrhålet och när rymning görs med sänkborrnings byts bara bommen.

Steg 3 – Byte till större sänkhammare och borrhållåda vilket innebär att hålets diameter blir 255 mm.

Kraftmatning och styrsystem är anpassade till båda maskinerna. Kärnborrhållåda- och rymningsmaskinen är centrerad på så sätt att hela kärnborrhållådan och upprymningen kan utföras i samma process utan att uppställningen ändras.

Figur 3-3 visar det upprymda hålet och den hammarborrhållåda som användes vid sänkborrnings.



Figur 3-1. Foto av fronten av spårtunneln med de fyra hålen i hörnen av den rektangulära deponeringstunneln borrade.



Figur 3-2. Borrmaskinen, Onram 1000, användes för borrning av kärnbrorhålen.



Figur 3-3. Foto av det upprymda hålet och den hammarborrkrona som användes vid sänkborrningen.

I detta projekt krävdes en ombyggnad av borrutrustningen från en vänster- till en högermaskin för att trappningen skulle bli så liten som möjligt. I en produktionssituation kommer det att användas en höger- och en vänstermaskin varför denna ombyggnad inte kommer att krävas.

3.2 Vajersågningen av golv, väggar och tak

Efter borrningen av de fyra hålen för Etapp 1 genomfördes sågningen in i berget som "blind-cut" i fyra steg:

1. Sågning av golvet.
2. Sågning av en vägg.
3. Sågning av den andra väggen och slutligen.
4. Sågning av taket.

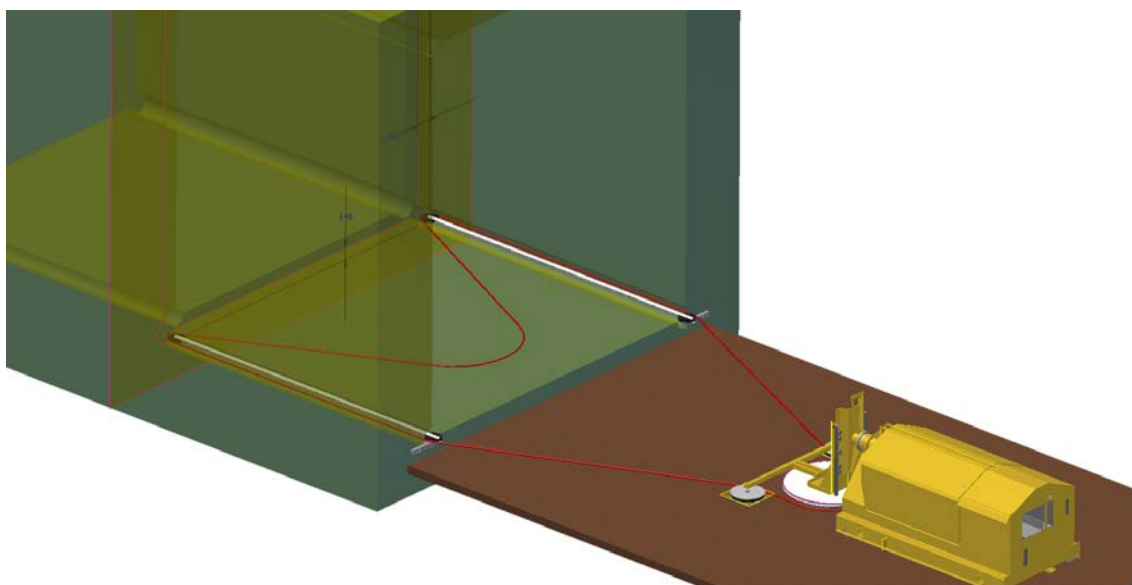
Installationen av utrustningen innebar att stänger med en brytskiva för diamantvajern installerades i det vänstra och högra bottenhålet. Samtidigt drogs en diamantvajer genom brytskivorna och sammanfogades till en slinga över drivenheten.

I takt med att vajern tränger in i berget spänner drivenheten vajern genom att röra sig bort från stuffen längs en räls. Detta pågår till dess att sågningen kommit fram till brytskivorna i botten av de borrade hålen.

Nästa steg blev att installera en stång i det övre vänstra hörnet och stången med brytskivan för bottenhålet vreds 90 grader. Installationen av vajerna och avverkningen av berget skedde på samma sätt som vid sågningen av golvet.

Figur 3-4 är en 3D-modell som visar utformningen av den utrustning som användes för sågningen av golv, väggar och tak. Illustrationen visar arrangemangen vid sågningen av golvet. Vid sågning av väggar och tak tillkommer behov av extra brytskivor för diamantvajern för att sågning av alla ytor ska vara möjlig.

Figur 3-5 visar foton av maskinen för spänning och drivning av diamantvajern och en närbild av vänstra nedre hörnhålet med snitten från sågning med vajern.



Figur 3-4. 3D-modell av en sågad tunnel med två borr- och sågetapper och den utrustning med brytskivor för vajern monterade på fasta stänger som användes vid sågning av golv, väggar och tak.



Figur 3-5. Foto av utrustningen för drivning av diamantvajern och till höger visas en närbild av det nedre hörnhålet efter det att sågningen blivit utförd.

3.3 Losshållning av det frisågade berget

Efter genomförd sågning av Etapp 1 utförs sprängning av det frisågade berget i tre salvor. Borr- och sprängplaner utarbetades för ca 3,5 m långa salvor och dessa beaktade att tunnelns golv, sidor och tak var frisågade vilket påverkar både borr- och sprängplanen.

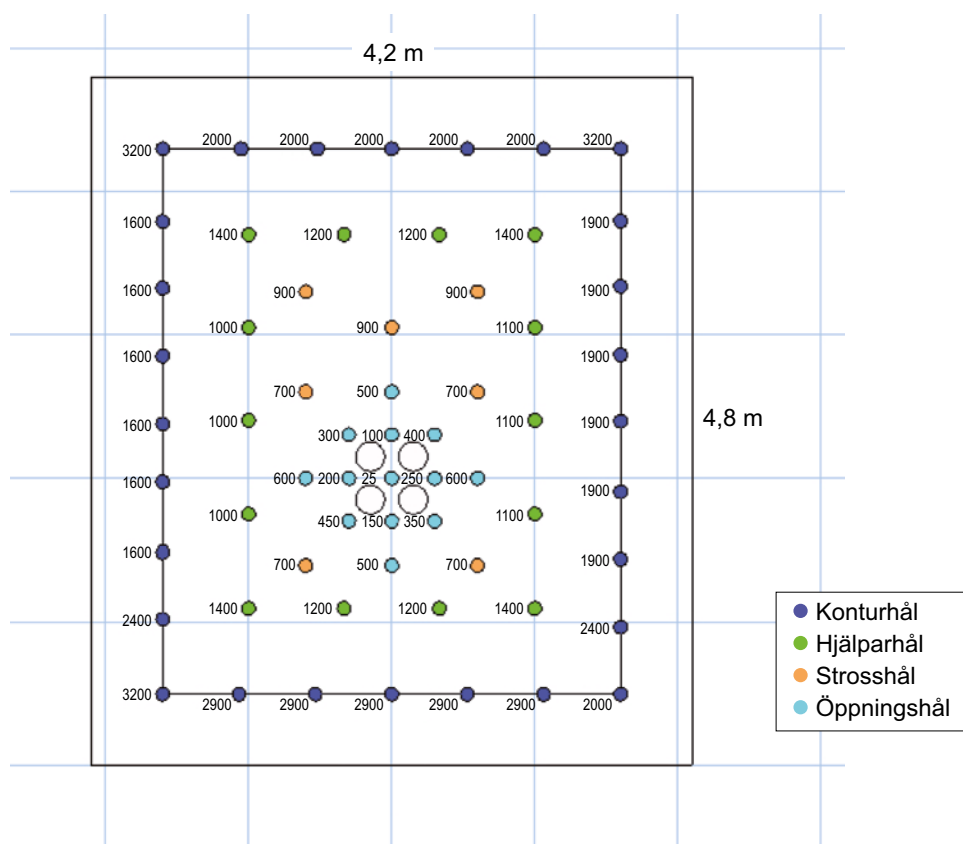
När berget i Etapp 1 är borttaget genomförs borrning för att kunna vajersåga den resterande delen av tunneln. Efter sågningen sker sprängning av resterande del av tunneln med två sprängsalvor.

Efter sågningen ska berget innanför den sågade konturen sprängas bort. För att göra arbetet smidigt bestämdes att försöka anpassa borrning och laddning till NCC:s ordinarie borr- och laddplaner. NCC använder pumpemulsion som huvudsprängämne i Citybanan och därför beslöts att använda detta sprängämne även i ”Vajersågningsprojektet”. Det beslöts också att använda Nonel LP sprängkapslar. Tabell 3-1 visar några typiska försättningar, hålavstånd och laddningskonfigurationer. Samtliga hål i denna plan har en håldimension på 48 mm och har 0,2 kg DynoRex 32 mm som bottenladdning tillsammans med emulsion. Salvylängden för NCC:s ordinarie tunnelsalvor var 3,5 m och tunnelarean 80 m².

Med hjälp av dessa data konstruerades borr- och laddplanen enligt figur 3-6 och data framgår av tabell 3-2. Avståndet från sågad kontur till borrplanens kontur var 0,5 m. Då tunnelkonturen vajersågats behövde inte sprängsalvans konturhål stickas.

Tabell 3-1. NCC-borr och sprängdata för en tunnelarea på 80 m².

Håltyp	Hålavstånd i m	Försättning m	Sprängämne	Laddningskoncentration.(kg/m)
Kontur	0,6	0,6	SSE	0,4
Hjälpare	0,8	0,9	SSE	0,8
Strosshål	1,0	1,2	SSE	1,6



Figur 3-6. Borr- och intervallplan för Etapp 1. Fördöringen mellan detoneringen anges i millisekunder.

Borrplanen består totalt av 62 spränghål enligt tabell 3-2 med diametern 48 mm och 4 stycken öppningshål med diametern 102 mm. Salvdjupet var 3,5 m.

Den specifika borrarlingen och laddningen visas i tabell 3-3. Det är som synes stor skillnad på värdena beroende på vilken area som avses, area begränsad av borrarad kontur eller area begränsad av sågad kontur.

3.4 Planering av vibrationsmätningar

För att kontrollera att vibrationsnivåerna verkligen blir lägre vid sprängning mot en sågad slits bestämdes att mäta vibrationer på ett flertal punkter längs de omgivande tunnlarna, se figur 3-7. Fyra geofoner med mätning i tre riktningar skulle sättas upp i varje parallelltunnel för att på detta sätt kunna överbestämma vibrationsnivåerna. Avlästa värden skulle sedan, som referens, jämföras med uppmätta vibrationer från konventionell tunneldrivning i Äspölaboratoriet (Nyberg et al. 2009). En riktig jämförelse med vibrationer från NCC:s ordinarie tunnelsprängningar på platsen kan dock inte göras då samverkande laddning skiljer, samt avstånd mellan salva och mätpunkt ovan mark ger annan förutsättning.

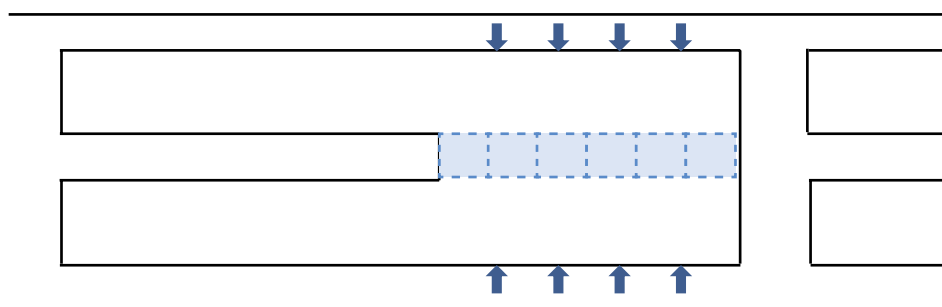
Företaget Ansvarsbesiktning AB genomförde vibrationsmätningarna från försökssalvorna. Verkligt läge på försökssalvorna och mätpunkterna framgår av figur 3-8. Mätenheterna i de parallella tunnlarna var treaxiella geofoner INFRA V12.

Tabell 3-2. Borr- och sprängdata för vajertunneln.

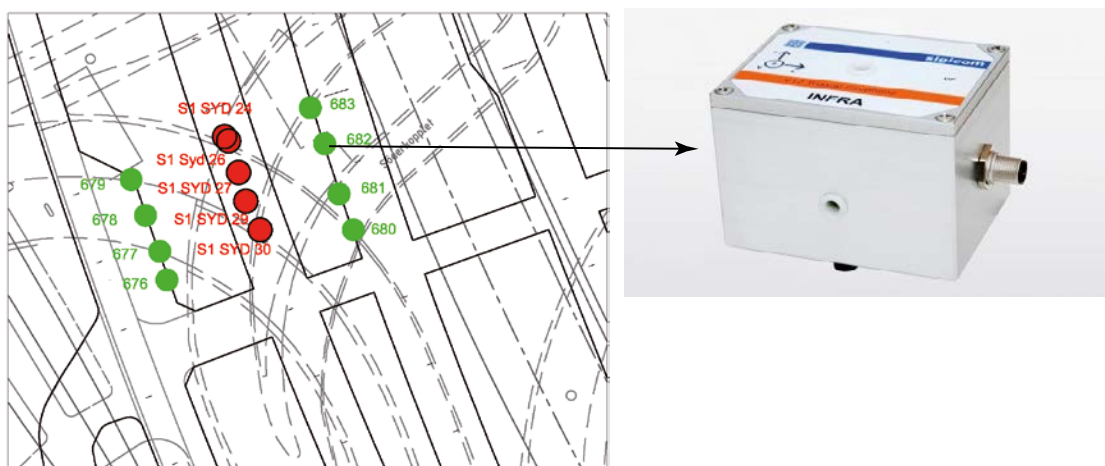
Håltyp	Antal hål	Hålavstånd	Försättning	Sprängämne	Laddningskoncentration
Kontur	28	0,4	0,6	SSE	0,35
Hjälpåre	14	0,65	0,4	SSE	0,8
Stross	7			SSE	0,8
Öppning	13			SSE	1,6

Tabell 3-3. Specifik borrarling och laddning för vajertunneln, Etapp 1.

Alternativ	Area	Specifik borrarling	Specifik laddning
Innanför borrarad kontur	12,16	5,1	3,8
Innanför sågad kontur	20,16	3,1	2,3



Figur 3-7. Planerat läge för vibrationsmätningar.



Figur 3-8. Mätpunkter (grönmarkerade), försökssalvor (rödmarkerade).

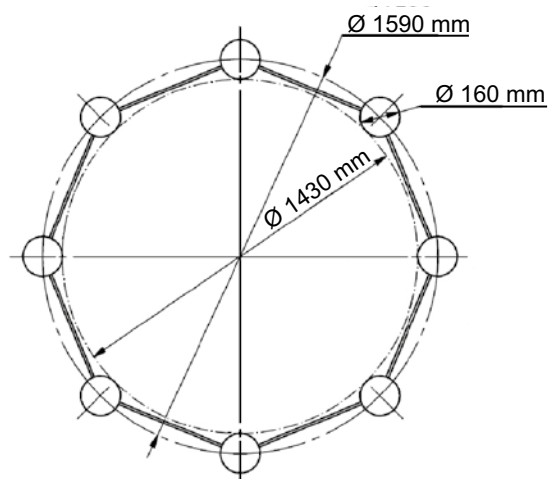
3.5 Uttag av bergplugg för studie av sprängskador

Vajersågning av golv, väggar och tak ger en mycket slät kontur och frisågningen av ytorna ger förutsättningar för att minimera risken för sprängskador. I syfte att visa att vajersågning verkligen minimerar skadezonen från sprängning vajersågades ett bergblock, en ”plugg”, från tunnelgolvet. Pluggen som togs ut var 8-kantig med varje sida 75 cm samt 75 cm djup, se figur 3-9, och har då samma diameter, 1,75 m som ett deponeringshål.

Pluggen placerades i mitt emellan väggarna och ca 7 m från tunnelstart, det vill säga i övergången mellan salva 2 och salva 3.

Deponeringshålet har en innerdiameter på 1 750 mm och bentonitblocken har en ytterdiameter på 1 650 mm. Idealet skulle ha varit att åstadkomma ett nästan runt hål med vajersågning. Måtten enligt figur 3-9 styrs av att hålen för vajersågningen av botten i deponeringshålet måste ligga innanför deponeringshålets diameter eftersom denna insats görs som ett sista steg i färdigställandet av deponeringshålet. Åtta hål för vajersågningen är en kompromiss som leder till att den kvarvarande bergplinten har en diameter på 1 430 mm och inte 1 650 mm som vore önskvärt men det var tillräckligt för att se hur plant man skulle kunna såga deponeringshålets botten.

Det bedömdes därför som intressant att göra uttaget av bergpluggen enligt figur 3-9 som ett led i diskussionerna kring avjämning av deponeringshålets botten där det finns ett krav att ytan inte får luta mer än 1 mm över hålets diameter.



Figur 3-9. Planvy av bergpluggen. De 8 borrhålen som krävs för att genomföra vajersågningen ligger innanför deponeringshålets diameter på 1 750 mm och då erhålls visade mått. Djupet på pluggen blev cirka 0,7 m.

4 Genomförande

4.1 Borrning för vajersågning

Etableringen för borrning i Etapp 1 av hålen för sågning var enkel eftersom det fanns plats vid stuffen för bormaskinens drivenhet vilket framgår av figur 4-1. För de nedre hörnhålen krävdes inga ställningar. För borrning av de övre hålen krävdes byggande av ställning för att erhålla en arbetsplattform på rätt nivå.

Vid genomförande av motsvarande borrning för Etapp 2 krävdes också här provisoriska ställningar för att åstadkomma en arbetsplattform på önskad höjd, se figur 4-2.



Figur 4-1. Etapp 1 – Den vänstra bilden visar borrning av kärnborrhålet \varnothing 76 mm. Genom byte av bom på borrarregaget (högra bilden) genomfördes upprymning av kärnborrhålet i två steg, från \varnothing 76 mm till \varnothing 165 mm och sedan från \varnothing 165 mm till \varnothing 255 mm. Ingen ny uppställning krävs för dessa upprymningssteg.



Figur 4-2. Etapp 2 – För att kunna utföra borrningen av hålen på den övre nivån krävdes det byggande av fasta ställningar och plattformar. I verklig produktion av deponeringstunnlar kommer de fasta ställningar att ersättas med mobila lyftplattformar för att uppnå ett rationellt arbete.

4.2 Vajersågning

Vid sågningen uppstod inga oväntade problem men när DWT genomförde en test för bestämning av maximal produktionskapacitet av sågningsutrustningen uppstod ett vajerbrott. Testet bestod i att variera hastighet och spänning i diamantvajern för att kunna optimera avverkningstakten vid sågningen. vajerbrottet medförde extra arbete med återetablering av sågutrustningen och vajer, se figur 4-3.

Vidare skedde en felmätning av vajern som gjorde att snittet i taket inte gick ända fram till brytskivorna. Detta uppdagades först i samband med utsprängningen av berget. Det betydde att stängerna med brytskivor måste installeras på nytt för att kunna färdigsåga Etapp 1.

Även vid sågningen av väggarna avbröts sågningen innan vajern kom i linje med brytskivorna varför även väggarna i Etapp 1 blev för kort sågade.

4.3 Losshållning av frisågat berg

Borrning och sprängning utfördes, liksom sågningen, i två etapper. Etapp 1 bestod av tre salvor och Etapp 2 av två salvor. I Etapp 1 användes den planerade borrplanen men med några olika laddningstyper. I Etapp 2 användes en annan borr- och laddplan för att undvika vissa problem som uppstod vid sprängningen i Etapp 1.

Nedanstående utgör en översiktlig beskrivning av borr- och sprängningsarbetena. En detaljerad beskrivning redovisas i bilaga 1.

4.3.1 Etapp 1

Salva 1

Salvan sprängdes 2012-02-15 och resultatet blev en ”koja”, det vill säga salvan gick bra längst in men resten stod kvar som en ”plugg”. I ”pluggen” fanns odetonerad emulsion kvar i många hål medan öppningshålen hade gått ut fint. Den kvarvarande pluggen laddades igen och sprängdes och nu med bra resultat, se figur 4-4. Berget i stuffen var grovblockigt men väggar, tak och golv, det vill säga, den sågade konturen var mycket fin.



Figur 4-3. Under sågningen i Etapp 2 inträffade ett brott på diamantvajern (vertikal gul linje mitt i bild vid bergytan).



Figur 4-4. Foto av stuffen efter sprängning och utlastning av salva 1.

Salva 2

Salva 2 sprängdes 2012-02-23 och resultatet blev en blandning av några skut och fin fragmentering, se figur 4-5. Salvan gick i stort ut i botten. I några hål i skuten fanns det odetonerat sprängämne kvar. Efter utlastning fanns en bergklack kvar med odetonerat sprängämne.

Salva 3

Salva 3, som laddades patronerat, sprängdes 2012-03-12. Efter sprängningen var det många skut och många odetonerade laddningar som kastats ut. En omskjutning fick göras av några hål som då laddades med ½ 25 mm DynoRex/hål. Salvan gick nu ut i botten av mittdelen medan det stod kvar klackar i sidorna, se figur 4-6. Ett problem som blev synligt var att taket inte var vajersågat tillräckligt djupt utan att det stod kvar en halvmåneformad bergklack i taket.



Figur 4-5. Foto till vänster visar stuffen efter sprängning av salva 2 och fotot till höger visar stuffen efter utlastad salva.



Figur 4-6. Foto av stuffen efter sprängning av salva 3. Den högra figuren visar även den kvarstående halvmånformade bergklacken i taket.

4.3.2 Etapp 2

Ambitionen att hålla förutbestämd stickning upprätthölls av tidsskäl endast i tunnelgolvet. I praktiken blev tunnelns övre del för trång. Under uppborring av salva 4 upptäcktes att även väggarna var för kort vajersågade. Detta innebar att Etapp 2 inleddes med borring av fyra nya hål för vajersågning och efterföljande sågning. Vid sprängning av salvorna i denna etapp användes enbart patronerade sprängämnen.

Salva 4

Salva 4, som var en kort salva, sprängdes 2012-04-05 med bra resultat, se figur 4-7.



Figur 4-7. Foto av stuffen efter sprängning och utlastning av salva 4.

Salva 5

Salva 5 var den sista salvan som sprängdes i detta projekt. Salvan, som var 4,5 m, sprängdes 2012-05-14 med bra resultat. Salvan innebar att det blev genomslag och därmed var tunneln färdigsprängd.

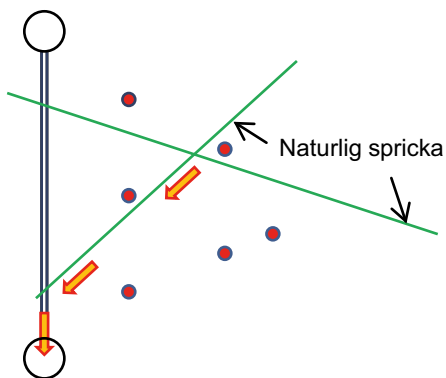
4.3.3 Erfarenheter från tunneldrivningen

Tunneldrivningen tog betydligt längre tid än planerat. Salva 1–3 i Etapp 1 följde i stort planeringen och omfattade ordinarie tunneldrivning med parallella hål. Det blev dock flera omskjutningar med ibland grovt styckefall trots en hög specifik laddning. Troligen berodde detta på följande faktorer:

- Tunnelsträckningen tvärades av många kraftiga sprickplan.
- De fyra grova hörnhålen för vajersågningen ventilerade effektivt ut spränggaserna som inte fick arbeta med sönderbrytning av berget.
- De vajersågade spåren släppte också ut trycket från spränggaserna.

Kombinationen av dessa faktorer reducerade borrhålstrycket, släppte på gastycket och förhindrade en effektiv fragmentering av berget, se figur 4-8.

Det bestämdes därför att ändra på borrhållsplanen under Etapp 2. Borrhållsplanen med de snedborrade hålen mot den sågade slitsen fungerade bättre och salvorna 4-5 kunde sprängas med bra resultat.



Figur 4-8. Illustration av gasvägar i samband med sprängningen. De röda prickarna i figuren visar laddade borrhål i närheten av naturliga sprickor.

5 Resultat

5.1 Geometri och konturhållning

Tunnelkonturen blev bra med helt släta väggar, tak och golv. Inget bergutfall uppstod och ingen förstärkning behövde göras. Det går inte att få en sådan jämnhet i konturen med konventionell bormning och sprängning. I figur 5-1, figur 5-2 och figur 5-3 visas bilder från den färdiga tunneln.



Figur 5-1. Översiktsfoto av den färdigsprängda tunneln, Etapp 1 närmast kameran.



Figur 5-2. Detalj av den färdigsprängda tunneln. Det ljusa fältet är trappningen mellan Etapp 1 och 2.



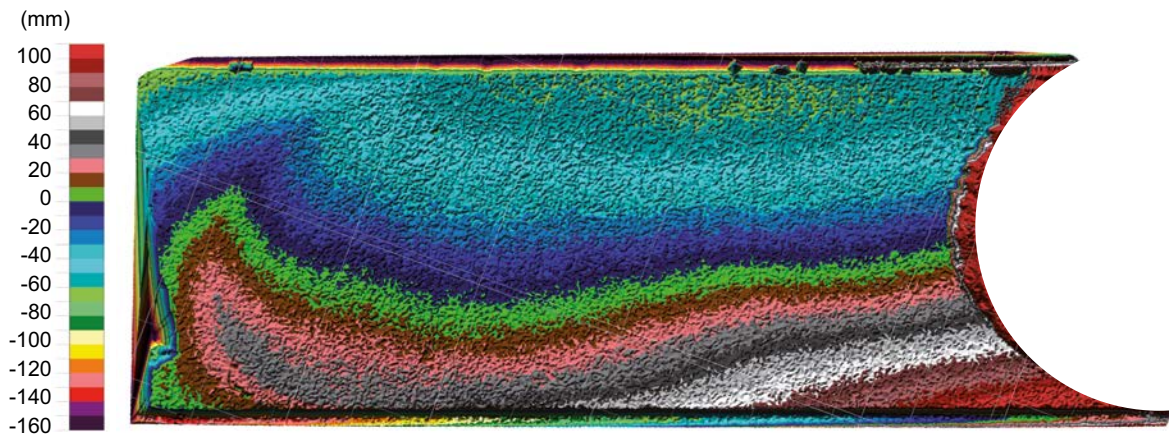
Figur 5-3. Detalj av den färdigsprängda tunneln, vänster vägg vid övergången mellan de två etapperna.

Resultatet av försöket visar att trappningen i praktiken är i storleksordning 125 mm i horisontalplanet och 180 mm i vertikalplanet.

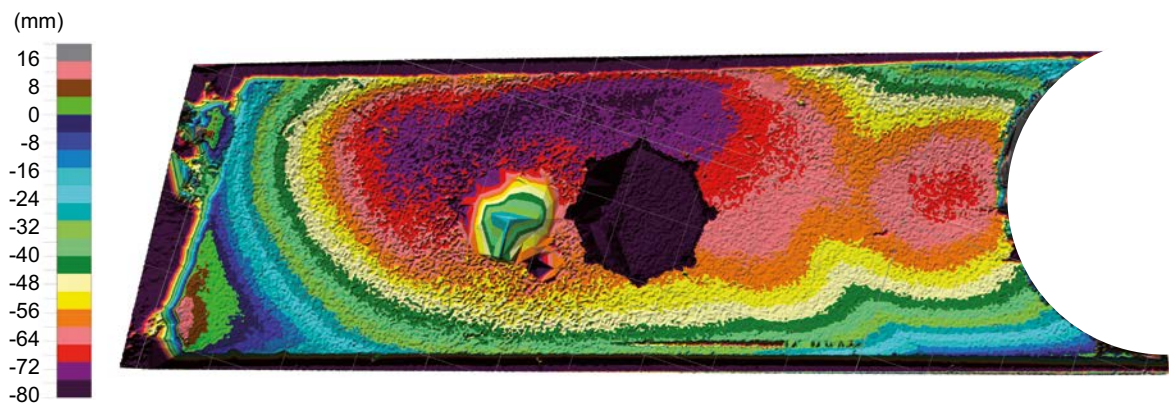
Efter utfört berguttag gjordes en laserscanning i tunneln för att undersöka konturhållning och borrhprecision i hålen för vjersågning. Hela tunneln skannades, men resultat redovisas endast för Etapp 1, eftersom Etapp 2 gjordes av tidsskäl med mindre noggrannhet avseende borrhning av takhålen. I verkligheten blev tunnelns övre del för trång. Laserscanningsresultatet från Etapp 1 visas i figur 5-4.

Borrhningen av etapp 1 gjordes utan någon stickning, det vill säga, planen var att borra 4 st parallella hörnhål som styrhål för sågningen. Precision i borrhning hos dessa styrhål har avgörande betydelse för hur bra resultatet av sågningen blir vad gäller konturhållning. I figur 5-5 visas två tvärsnitt, det första 0.5 m in i tunneln, start Etapp 1, och det andra 9 m in i tunneln, slut Etapp 1, där man jämför den slutliga skannade tunnelmodellen med den teoretiska fyrkantiga konturen. I figuren har man använt högra nedre borrhålets linje som gemensam fixpunkt genom hela modellen. Av figuren framgår det att den slutliga tunneltvärsnittet blev vridet till vänster och både nedre och övre hålen vid vänster vägg har styrts mot vänster. Detta beror antagligen mest på felriktning i borrhningen, eftersom avvikelserna i själva hålrakheten är inom ± 2 cm.

Jämnheten hos de sågade ytorna undersöktes också med hjälp av den skannade modellen. En teoretisk yta bestämdes ifrån kanterna av borrhålen och man beräknade avstånd till den skannade ytan. Resultaten framgår av figur 5-6 och figur 5-7. Avvikelsen från den teoretiska ytan är maximalt ± 40 mm.



Figur 5-6. Ytjämnheten jämfört med teoretisk yta utifrån borrhningen. Denna figur visar vänster vägg. Skalan för avvikelser anges i millimeter.



Figur 5-7. Ytjämnheten jämfört med teoretisk yta utifrån borrhningen. Denna figur visar tunnelgolvet. Skalan för avvikelser anges i millimeter. Den mörka hexagonen är pluggen som togs för att studera EDZ, se figur 3-9.

5.2 Uppföljning av sprängskador

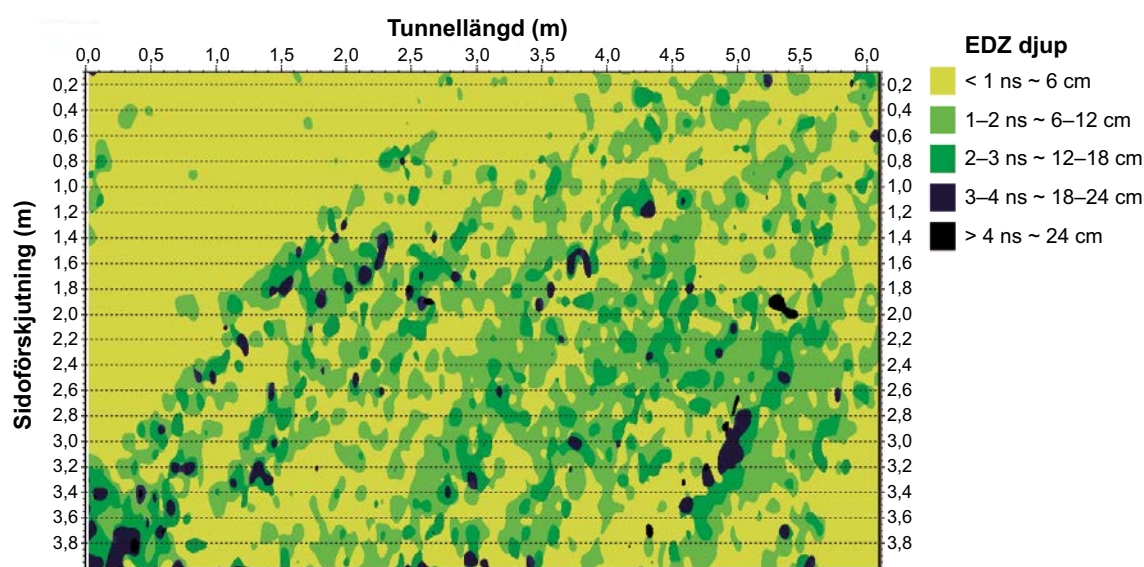
5.2.1 Radarmätningar

Markradarmätningar har i borrhade och sprängda tunnlar använts för att undersöka sprängskador (EDZ) och dess utbredning från tunnelns ytor in i berget och längs tunneln. Sprängskadorna, eller sprängsprickorna är ofta små och orienterade på ett sätt som gör det svårt att detektera dem med markradar som tolkningsbara reflektorer eller diffraktorer, som i vanliga fall då markradar används. Likaså kan nybildade sprickor vara svåra att detektera eftersom det kanske inte finns elektrisk kontrast mellan sprickan och berget. Däremot sänker förhöjd porositet, som orsakas av förhöjd frekvens av sprickor gentemot omgivande berget, resistiviteten vid områden för sprängskador. Vid höga radarfrekvenser är resistiviteten starkt dispersiv, det vill säga frekvensberoende, vilket gör att även små skillnader i resistiviteten kan observeras med hjälp av denna egenskap. Vid bestämning av sprängskadors förekomst med denna metod räknas ett dispersionsindex som, efter kalibrering mot den normala resistiviteten i området (elektriska egenskaper), ger en bild av omfattningen och djup av sprängskadorna.

Sprängskadorna i vajertunneln undersöktes med markradar på tunnelgolvet, antagandet var att där kunde sprängskador uppstå eftersom det frisågade blocket har bäst kontakt vid tunnelgolvet. Markradarmätningarna på golvet av Etapp 2 gjordes 2012-05-29, se figur 5-8. Mätningar kunde inte genomföras på golvet för etapp 1 eftersom arbetet med bergpluggen pågick i det området. Totalt mättes 40 stycken 6,1 m långa parallella linjer med 10 cm mellanrum. Resultatet visas i figur 5-9 där det slutliga resultatet av hela området visas som en färgkarta av en tolkning av EDZ:s omfattning och djup.



Figur 5-8. Bild av mätområdet för markradar (till vänster) och bild av mätutrustningen (till höger).



Figur 5-9. Tolkad EDZ-djup i golvet av den sågade tunneln. Mätningarna utfördes på golvet av etapp 2 på en längd av ca 6 m och över hela tunnelns bredd med en sidoförskjutning på 10 cm mellan mätningarna. De glimmerrika partierna orsakar anomalier med bedömt större skadezonsdjup i den gnejsiga delen.

Som kalibrering har man använt resistiviteten hos normal granit, vilket man även kan se i resultaten. Figur 5-10 är en närbild av mätområdet där man kan se växlingarna mellan granit och folierad gnejs. Bergartsgränsen syns tydligt i resultaten, likaså foliationen i gnejsen. Detta förklarar de djupare EDZ-områdena i figur 5-9. Gnejsen och speciellt de glimmerrika partierna där har olika resistivitet, vilket betyder att resultatet som redovisas här inte är pålitligt för de områdena. Tittar man på resultatet för det granitiska området kan det konstateras att enligt radarn finns det inga sprängskador där. Vad gäller den gnejsiga delen så går det inte att bedöma, eftersom det inte finns kalibreringsdata för det i dagsläget.

5.2.2 Uttaget av bergpluggen

Uttaget av berget för pluggen skedde på motsvarande sätt som för tunneln men eftersom omfattningen av sågningen var begränsad valdes en mindre brytskiva för vajern. Hålen för stängen med brytskiva är 160 mm. Efter borrning vajersågades slitsar mellan hålen på samma sätt som tunneln och slutligen vajersågades golvet under pluggen. Figur 5-11 visar några fotografier från detta. Samtliga sidor på pluggen blev mycket fina.



Figur 5-10. Detaljbild av tunnelgolvet i etapp 2 där markradarmätningar gjordes. Bergarten varierar från granit till folierad gnejs.



Figur 5-11. Fotot till vänster visar borrhålen och sågade sidor (jämför figur 3-9). Fotot till höger visar utseendet när bergpluggen är borttagen.

5.2.3 Sprickkartering av bergplugg

Pluggen, som vägde ca 4,5 ton, transporterades till DWT-Teknik i Halden där den vadersågades i två delar, se figur 5-12, riktning vinkelrät mot tunnelriktningen för att på så sätt få ett snitt som är vinkelrät mot tunnelseilens sprängborrhål. För kartering av sprickor användes en teknik med penetrantvätska som synliggör eventuell sprickbildning. Tekniken för detta finns bland annat beskriven i Olsson et al. 2009.

Sågningen gav en mycket fin yta som efter rengöring och torkning behandlades med penetrant. Figur 5-13 och figur 5-14 visar en sågad yta utan respektive med penetrantinfärgning.

Vid bergsprängning uppstår normalt en sprickbildning, en skadezon, i det kvarstående berget. Vid användning av skonsam sprängning i tunnelkonturer brukar sprickbildningen normalt bli 15–40 cm beroende på hur sprängningen utförts. Slitssågningen har i denna tunnel effektivt stoppat sprickbildningen. Detta stämmer bra överens med de radarmätningar som också gjordes i tunneln. Det fanns inga sprängsprickor i den sågade ytan. Penetranten har endast trängt in lokalt i några naturliga sprickor.



Figur 5-12. Foto från undersökning av bergpluggen i Halden, Norge.



Figur 5-13. Foto av den sågade ytan för bergpluggen. Snittet är vinkelrätt tunnelriktningen.



Figur 5-14. Foto av den sågade ytan för bergpluggen med penetrant.

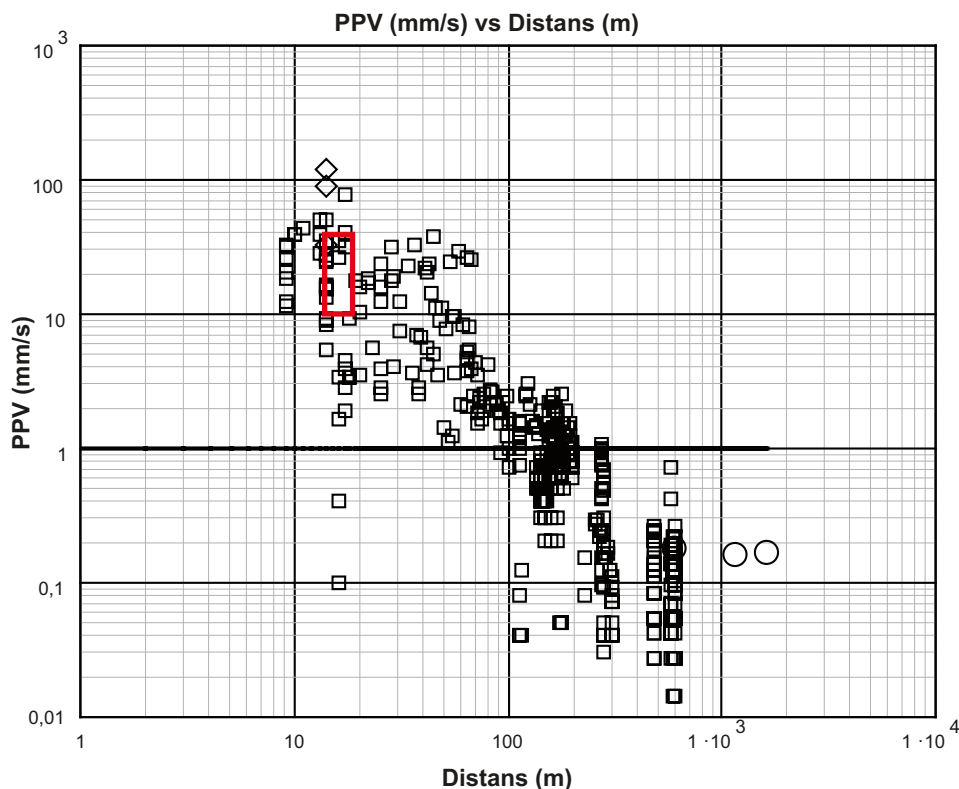
5.3 Spränginducerade vibrationer

Den samverkande laddningen, dvs den sprängämnesmängd som initieras samtidigt i salvorna, varierade mellan salvorna.

De första två salvorna hade en samverkande laddning på 3 kg medan de övriga salvorna hade en samverkande laddning på 1–1,6 kg. Generellt uppmättes relativt låga vibrationsnivåer i förhållande till de korta avstånd som fanns mellan salvorna och mätpunkterna. Det fanns en tendens att de sista två salvorna gav lägre vibrationsnivåer. Detta kan bero på att berget runt dessa två salvor var helt frisågat medan det för salvorna 1–3 var frisågat i konturen men inte i slutet, det vill säga i stufen av salva 3.

Mätresultaten från vibrationsmätningarna har jämförts med produktionssprängningar i närliggande tunnlar på liknande avstånd och med lika samverkande laddning. Vid denna jämförelse kan det konstateras att svängningshastigheten var ca 20 % lägre vid sprängning av de konturvajersågade tunnlarerna än vid sprängning av normala tunnelsalvor. Det finns dock stora osäkerheter om rådande bergkvalitet vilket kan innebära variationer på vibrationsöverföringen i berget.

Mätresultaten har även jämförts mot tidigare data från sprängningar på Äspö (Nyberg et al. 2009). Där mättes vibrationer i samband med sprängning av en tunnel 2003. Figur 5-15 visar spridningen på uppmätt maximal svängningshastighet från de 5 salvorna (röd rektangel) jämfört med data från sprängningar av 34 salvor på Äspö (vertikal svängningskomposant). Samverkande laddning var 0,4 till 4,3 kg vid sprängningarna på Äspö. Som framgår av figur 5-15 var maximal svängningshastighet inte extremt låg jämfört med en konventionell drivning med ungefär samma storlek på samverkande laddning, men maxvärdet är ändå ca 3 gånger lägre än maxvärdet uppmätt på Äspö 2003.



Figur 5-15. Maximal svängningshastighet (PPV) för varje salva vid sprängning på Äspö 2003 (Nyberg et al. 2009). Dessa data anges med följandes symboler: □ Geophone 1 D data, ○ Seismograph 3 D data and ◇ Accelerometer 1 D data enligt figur 4-2 i Nyberg et al. (2009). Den röda rutan omsluter de värden i vertikalled som uppmättes vid sprängningarna för den sågade tunneln i Citybanan.

6 Kostnader och resurser för alternativa berguttagsmetoder för deponeringstunnlar

6.1 Förutsättningar

Deponeringstunnlarna för KBS-3V har preliminärt en längd av upp till 300 m och ett tvärsnitt $B \times H = 4,2 \times 4,8$ m som ger en teoretisk area på cirka 20 m^2 .

Längd- och tvärsnittet genom en deponeringstunnel framgår av figur 6-1.

Kravet för Kärnbränsleförvaret är att det ska vara möjligt att deponera upp till 200 kapslar per år. I normalfallet bedöms att 150 till 160 kapslar kommer att deponeras per år. Om vi utgår från en total längd på 300 m bortgår cirka 20 meter i början av tunneln fram till första kapseln och cirka 10 m faller bort i slutet av tunneln med hänsyn till bland annat deponeringsmaskinens platsbehov vid deponering i deponeringshålet längst in i tunneln.

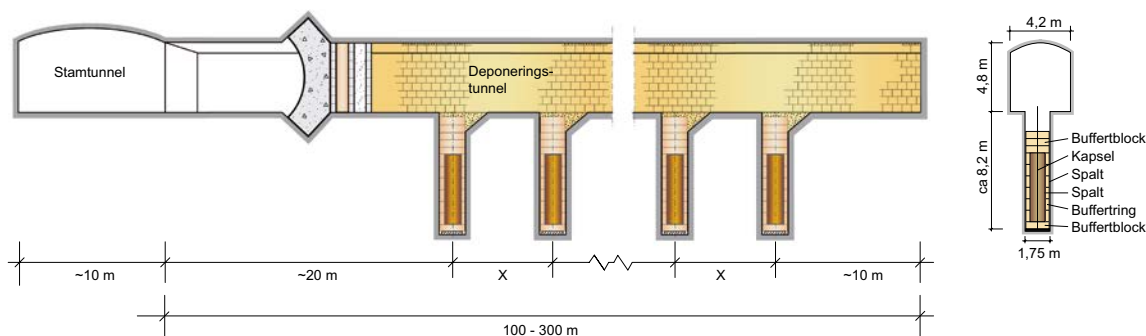
Det blir då 270 m tunnel för deponering av kapslar men utnyttjandegraden har i nuläget bedömts till 85 % vilket betyder att cirka 230 m kan utnyttjas och med 6 m mellan kapslarna kan då i snitt 38 kapslar deponeras i varje tunnel.

I denna studie har det förenklat antagits att det krävs iordningsställande av fem deponeringstunnlar per år för att kunna deponera maximalt 200 kapslar. Det innebär att det årligen ska produceras cirka 1 500 m deponeringstunnel motsvarande $30\,000$ teoretiskt fasta m^3 , det vill säga tämligen små bergvolymmer.

Nedanstående redovisning av produktionskostnader är en jämförelse mellan följande tre alternativ:

1. Konventionell borrhning och sprängning av hela tunnelarean i ett steg trots att SKB:s referensmetod är att spränga takort och pall.
2. Rektangulär tunnel med vadersågat golv, väggar och tak. Uttaget av det frisågade berget sker genom konventionell borrhning och sprängning.
3. Vadersågning av enbart tunnelns golv men konventionell borrhning och sprängning av hela tunnelarean på samma sätt som för alternativ 1.

Kostnadsjämförelsen begränsas till loss hållning, det vill säga uttaget av berget, och beskrivs som årlig kostnad. I den årliga kostnaden ingår avskrivningar för maskiner med antagen avskrivningstid på 10 år, oavsett utrustning, förbrukningsmaterial samt arbetskostnad. Arbetskostnaden omfattar den effektiva tiden för loss hållningsarbetet, eftersom det bedöms att övrig tid kan användas för andra arbeten i förvaret, t ex tillredning av transporttunnlar eller deponeringsarbete. All personal förutsätts vara anställd av SKB med en lönekostnad av 375 kr/tim inklusive skifttillägg, sociala avgifter mm. Endast produktionspersonal och arbetsledning har inräknats. Övrig personal för t ex utsättning/inmätning av tunnelarbetena, servicepersonal för maskiner etc har bedömts vara ungefär lika för de olika alternativen och ingår inte i kostnadsjämförelsen.



Figur 6-1. Längd- och tvärsnittet genom en deponeringstunnel. Längdsnittet visar en deponeringstunnel som är återfylld och pluggad medan tvärsnittet visar en deponeringstunnel där buffert och kapsel är installerade.

SKB kommer att genomföra ett detaljerat undersökningsprogram för anpassning av deponerings-tunnlar och deponeringshål till lämpliga geologiska förhållanden (SKB 2010). I dessa program ingår att utföra kärnborrhål för bestämning av lämpliga lägen för deponeringstunnlarna. Omfattningen av dessa undersökningar är oberoende av metod för berguttaget.

Priser har inhämtats från erfarenheter från projekt drivna av SKB, och från andra projekt. Alla priser är från 2012. Det finns en osäkerhet i om förbrukningsmaterial alltid är nettopriser, eller om de ibland innehåller entreprenörens påslag. Produktionskostnad för vadersågning med de bergförhållanden som gäller för Forsmark med kvartsrikt berg är baserad på en kalkyl från DWT. Kostnader för att spränga inom sågad kontur är baserad på erfarenheterna från detta projekt.

Större poster som inte är med i kalkylen är bland annat utlastning av berg, injektering, bergförstärkning och kartering. Losshållen bergvolym skiljer mellan de olika uttagsmetoderna. Genomsnittlig kostnad för omhändertagandet av överberg vid konventionellt berguttag och kostnaden för ökad arbetsinsats och materialkostnader för återfyllnad har medtagits eftersom detta skiljer alternativen åt. Denna kostnad kommer att öka över tid i takt med att transportavståndet till skipschaktet när anläggningen byggs ut successivt ökar. Kostnader för mediaförsörjning (el, vatten, ventilation), verkstäder etc ingår inte heller.

6.2 Beskrivning av de olika uttagsmetoderna

Vid konventionell borrning och sprängning skapas normalt en hästskoformad tunnel. En variant kan också vara att spränga en takort och lämna en släpande pall på ca 0,8 m för att minimera sprängskadorna i tunnelgolvet. Denna metod medför att tunnelarean för takorten blir liten och medger inte en rationell arbetsmetod även om den i nuläget är SKB:s referensmetod för uttag av deponeringstunnlar.

Om man däremot vill såga alla ytor är en det enklast att göra en rektangulär tunnel med samma bredd och höjd som den sprängda tunneln. Det finns även alternativet att endast såga golvet vilket medför stora fördelar vid arbetet med olika typer av transporter i deponeringstunneln, borrning av deponeringshål, utföra installation av buffert och kapsel samt återfyllnad av deponeringstunneln.

Samtliga studerade metoder behöver utföras med så kallad stickning för att ge maskinplats för nästa påhugg. Erfarenheter från SKB:s entreprenader på Äspö visar att det går att innehålla en stickning på 25–30 cm. Till detta kommer dock risk för lokal felborrning och större bergutfall. Erfarenheterna från detta projekt är att en stickning i enlighet med figur 2-3 är rimlig att uppnå, speciellt om man använder etablerad teknik för styrd borrning. Skillnaden i överberg mellan sågad och konventionellt driven tunnel bedöms bli ca 20 %, relativt teoretisk volym.

6.2.1 Förutsättningar vid konventionell borrning och sprängning

Baserat på erfarenheter från skonsam sprängning på Äspö för en deponeringstunnel har sprängsalvan cirka 96 hål varav 33 är konturhål i väggar och tak och 8 borrhål finns mot tunnelgolvet. Till detta kommer också fyra grövre öppningshål. Borrjumbon måste vara utrustad med modern styrteknik för att hålla snäva toleranser i borrning av konturhålen. Den specifika laddningen antas vara cirka 2,85 kg/m³ fast berg.

Bedömning av produktionstider för drivning av Kärnbränsleförvarets deponeringstunnlar med konventionell borrning och sprängning har utgått från att en borrjumbo med två bommar bör kunna borra laddningshål för en sprängsalva på tre tunnelfronter under en byggdag förutsatt att arbetet drivs i tvåskift. Tiden kommer dock inte medge både borrning och laddning av tre fronter under en byggdag.

I kalkylen har därför antagits att i genomsnitt borrar och sprängs 2,5 salvor på tre fronter per byggdag med tvåskift. Salvylängden antas vara 4,5 m lång, men effektiv indrift är 4,3 m, eller ca 96 % av teoretiskt längd. Detta ger en genomsnittlig framdrift för berguttaget av 10,75 m/byggdag. Med en framdrift av 10,75 m per byggdag åtgår cirka 140 arbetsdagar eller 28 veckor för att färdigställa 1 500 m deponeringstunnel. Produktionstiden framgår översiktligt av tidsplanen, bilaga 2.

Kraven på extra noggrann inställning för borrar för konturhålen kan eventuellt medföra att produktionstakten minskar till 2 salvor per byggdag, det vill säga en indrift på 8,6 m. Tiden för färdigställandet av 1 500 m deponeringstunnel blir då 35 veckor.

Det förutsätts att bergarbetarna kommer att vara sysselsatta med andra arbetsuppgifter när de inte arbetar med berguttaget för deponeringstunnlar. Nyttjandegraden för en borrarjumbo blir därmed drygt 60 %, vilket bör medge tillräckligt utrymme för service och underhåll samt eventuell injektering.

Alternativ 1, sprängd tunnel, kommer också att kräva en extra insats med rensning och avjämningen av golvet. Avjämningen kan göras med dels bort-knackning av gaddar med hydraulhammare, rivning/fräsning och lokal uppfyllnad med betong. I nuläget är det svårt att exakt kvantifiera denna kostnad men ett påslag har gjorts i kalkylen för kostnader för utrustning av rengöring och eventuell avjämning av tunnelgolvet samt kostnader för extra återfyllnadsmaterial och personal. Det ojämna golvet medför också nackdelar i samband med borrar av deponeringshålen och medför extra påkänningar på de maskiner som behöver användas under deponerings- och återfyllnadsarbetet. Tiden för arbetet med återfyllningen kommer att bli längre eftersom det krävs mer arbete med golvbädden före återfyllnadsblocken kan installeras.

6.2.2 Förutsättningar vid vjersågning av alla ytor

I alternativet med vjersågning av alla ytor krävs att man först borrar och spränger en cirka 5 m djup nisch för att skapa utrymme för borrar- och sågutrustning så att den inte stör transporterna i stamtunneln. Sågning utförs preliminärt i steg av 50 m för att säkerställa toleranser vid borrarningen av hörnhålen. Erfarenheten av att borrar långa raka hål kan senare medföra att längden av dessa borrhål kan ökas. Det minskar i så fall antalet borrar- och sågetapper med tillhörande ställtider för färdigställande av en deponeringstunnel.

I denna kalkyl ingår följande utrustning:

- Två kompletta borrarutrustningar för kärnborrar och upprymning av kärnborrhålen i två steg med hammarbollar. Borrarutrustningarna ska vara utförda för att borrar i vänster respektive höger borrhål. I kalkylen förutsätts att det även ska finnas en komplett borrarutrustning i reserv.
- Två vjersågningsmaskiner enligt nästa generations utrustning enligt figur 7-1. I kalkylen förutsätts även att det ska finnas två kompletta sågutrustningar i reserv. Dessa extra sågutrustningar används parallellt under sammanlagt sex sågetapper, ca 48 byggdagar totalt.
- Fem bärare, typ mobila saxbord, för utrustningen för borrar och sågning som medger att etableringen av utrustningen går snabbt och säkert utan behov av ställningsbygge.
- En borrhög för borrar av spränghålen. Borrarjumbon behöver inte ha utrustning för att klara snäva toleranser för konturhålen vilket kommer att minska investerings- och underhållskostnaden för borrarjumbon. Avsaknaden av konturhål gör att tiden för borrar för sprängning blir mycket kortare eftersom borrar av konturhålen kräver mycket noggrann inställning av borrhögen.

Borrarningen föregår sågningen och med dubbla borrarutrustningar kan de fyra hålen i hörnen för en 50 m sträcka borrar på cirka 132 timmar vid kontinuerligt arbete vilket motsvarar 6 byggdagar. När borrarningen är utförd kan sågningen inledas med att såga golvet, därefter samtidig sågning av de båda väggarna och slutligen sågas taket. Sågningen av alla ytor kan genomföras på cirka 168 timmar eftersom dubbla utrustningar medger samtidig sågning av båda väggarna. Sågningen kräver då 8 byggdagar. Tiderna för sågningen är baserade på att kapaciteten vid vjersågning av golv och tak är cirka 4,25 m² i timmen och cirka 6,10 m² för väggarna. I denna bedömning har hänsyn tagits till den höga kvartshalten i Forsmarksberget.

Uppdelningen av berguttaget i 50 meters etapper medför att det totalt krävs 30 borrar respektive sågningsetapper för 1 500 m deponeringstunnel. Produktionstiden för detta alternativ redovisas i bilaga 2. Borrarningen av hålen för sågning blir tidsstyrande om man sätter in extra sågresurs vid sex tillfällen vilket framgår av bilaga 2.

All borrar för fem deponeringstunnlar motsvarande 1 500 m kommer då teoretiskt kräva 30×6=180 byggdagar (36 veckor) men vissa väntetider kommer att uppstå för borrarningen varför borrararbetet är avslutat efter cirka 190 byggdagar (38 veckor). Detta förutsätter att borrar och sågning görs

kontinuerligt i 3-skift, medan borrning och sprängning kan utföras i 2-skift. När borrhörningsarbetet är avslutat återstår 12 byggdagar för att lossållningen av berget för den sista 50-meters etappen. I tidsplanen enligt bilaga 2 har förutsatts att det finns utrymme för vissa produktionsstörningar.

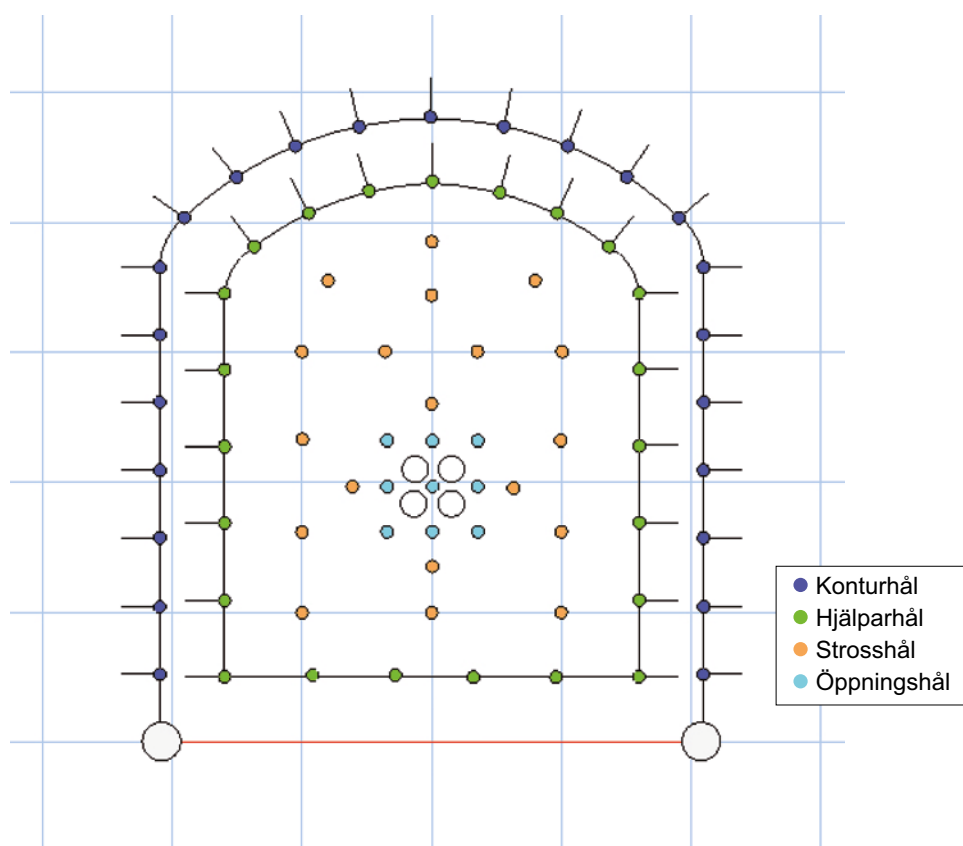
Detta kapacitetsantagande utgår från tillgång till fem tunnelfronter. Borrning och sågning pågår på tre fronter och utsprångningen sker normalt i två fronter där sågningsarbetet är utfört. Baserat på erfarenheter från detta projekt kråver språngsalvan för det frisågade berget bara 48 hål och inga konturhål.

Eftersom berget är frisågat kan den specifika laddningen minskas betydligt. Erfarenheterna från detta projekt visar att en laddning på cirka 1,0 kg/m³ fast berg räcker. Avsaknad av konturhål medför att det inte finns behov av att använda elektronisk språngkapslar vilka utgör en betydande kostnadspost vid alternativet borrning och språngning.

Detta alternativ påverkar återfyllnaden av deponeringstunnlarna. Med nuvarande utformning och dimensioner på deponeringstunnlarna, B×H = 4,2×4,8 m, och nuvarande storlek på återfyllnadsblocken kråves det 144 block per löpmeter tunnel. Med en rektangulår tunnel med samma storlek på B×H kråves det något fler block, 154 block per löpmeter men det kråves mindre återfyllning med pellets för att kompensera för uttaget av överberg på grund av stickning.

6.2.3 Förutsåttningar vid vajerstågning av enbart tunnelgolvet

I detta alternativ behåller man deponeringstunnels hästskoform men golvet är vajerstågat. Detta alternativ ger fördelen med ett plant golv utan EDZ och insatserna för sågningen begrånsas till enbart golvet. Åven i detta alternativ förutsåttas att arbete sker i fem tunnelfronter för att uppnå önskad produktionstakt. Omfattningen av vajerstågningen blir mindre och endast borrning för sågningen utförs i golvnivån och detta framgår av figur 6-2.



Figur 6-2. Illustration av alternativet med enbart sågat golv. Den röda linjen mellan de grova borrhålen i figuren symboliserar det vajerstågade golvet.

I denna kalkyl ingår följande utrustning:

- En modern borrjumbo.
- Två kompletta borrarutrustningar för kärnbörning och upprymning av kärnborrhålen i två steg genom hammarbörning. Borrarutrustningarna ska vara utförda för att borra i vänster respektive höger borrhål. I kalkylen förutsatt att det även ska finnas en komplett borrarutrustning i reserv.
- En vadersågningsmaskin enligt nästa generation av utrustningen plus en komplett sågutrustning i reserv.

Börning för sågning av 50 m tunnel kan utföras på cirka 66 timmar och sågningen av golvet kräver cirka 60 timmar vilket betyder att även för detta alternativ är börningen tidsstyrande.

Börning och sågning av bara golvet kan då genomföras i stort sätt samma takt som konventionell börning av sprängning och med enbart 2-skift under vardagar.

All börning för fem deponeringstunnlar motsvarande 1 500 m kommer att kräva 36 veckor vid tvåskift och 8 timmar per skift och produktionstidsplanen framgår av bilaga 2. Skifttider för börning för sågning och sågning kontra berguttaget med börning och sprängning kommer att behöva trimmas för att en praktisk och ekonomisk skiftgång ska uppnås.

Börningen för sprängning minskar med endast 8 hål i tunnelgolvet jämfört med konventionell börning och sprängning. Behovet av elektroniska sprängkapslar, minskar i motsvarande grad. Proportionellt minskar produktionstiden ca 8 % per salva.

Även detta alternativ påverkar återfyllnaden av deponeringstunnlarna. Med nuvarande utformning och dimensioner på deponeringstunnlarna, $B \times H = 4,2 \times 4,8$ m, och nuvarande storlek på återfyllnadsblocken krävs det 144 block per löpmeter tunnel. Mängden pelletar i en tunnel med sågat golv blir mindre jämfört den konventionella produktionen med börning och sprängning eftersom golvet är plant och endas behöver en tunn bädd av pellets för buffring av det inflödande vattnet.

6.2.4 Summering av kalkylunderlag

De produktionsantaganden som ligger till grund för beräkning av produktionskostnader i avsnitt 6.3 redovisas i tabell 6-1 nedan.

6.3 Produktionskostnader

Baserat på antaganden om produktionstider och resurser fås följande kostnadsjämförelse per år då totalt fem deponeringstunnlar, 1 500 m deponeringstunnel, ska färdigställas per år.

Utrustning för börning av kärnborrhål och upprymning kräver samma investering för båda sågningsalternativen men livslängden blir minst dubbelt så lång om endast golvet ska sågas. Vidare krävs det fem arbetsplattformar/bärare för att rationellt kunna utföra arbeten uppe vid taket.

Baserat på gjorda antaganden erhålls en årlig kostnad med beaktande av de kostnader som skiljer de tre alternativen enligt tabell 6-2. Det betyder att investeringskostnader för utrustning som används i alla alternativen inte är medtagen, till exempel laddutrustning, men arbetskostnaden för borttransport av överberg och extra arbete för rengöring av golv och återfyllnad finns medtagna.

Det ska påpekas att det finns osäkerheter i dessa kostnadsbedömningar varför en djupare analys av kostnaderna krävs inför val av inriktning för berguttaget.

Tabell 6-1. Sammanställning av kostnadspåverkande skillnader mellan de olika alternativen.

Skillnad mellan alternativen	Konventionell drivning borra/spräng	Sågad kontur. Sprängning för losshållning	Konventionell drivning men med sågat golv
Investering i maskiner	<ul style="list-style-type: none"> • En modern 2-boms jumbo 	<ul style="list-style-type: none"> • Två borraggregat plus ett i reserv för kärnboring med bommar för upprymning av kärnborrhålen i två steg • Fem arbetsplatt-formar för boring av övre hörnhål och sågning • Fyra sågnings-utrustningar varav två är i reserv. • En enkel borrijumbo 	<ul style="list-style-type: none"> • Två borraggregat plus ett i reserv för kärnboring med bommar för upprymning av kärnborrhålen i två steg • Två sågnings-utrustningar vara en är i reserv • En modern 2-boms jumbo
Arbetstid	Två-skift, 5 dagar/vecka	Bergdrivning två-skift Boring/sågning 3-skift, 5 dagar/vecka	Två-skift, 5 dagar/vecka
Personal per byggdag och skift	1 arbetsledare och 2 bergarbetare/skift	1 arbetsledare och 2 bergarbetare/skift 1 arbetsledare och 4 borrar/sågare/skift Extra sågningsresurser 2 man/skift, 48 byggdagar	1 arbetsledare och 2 bergarbetare +1 arbetsledare och 3 borrar/sågare
Tid för att producera 1 500 m deponerings-tunnel/år	28 veckor (140 dagar)	38 veckor (190 dagar)	36 veckor (180 dagar)
Antal fronter som behövs för att klara produktionen	3 st	5 st	5 st
Plusposter för alternativet	<ul style="list-style-type: none"> • Kräver den minsta personalinsatsen • Konventionella bergarbeten; normala arbetsrutiner kan tillämpas 	<ul style="list-style-type: none"> • Slät kontur på golv, väggar och sidor • Volymen överberg är minimerad • Inga extra arbeten med golvet inför deponering • deala förhållanden för de arbeten och körningar som krävs i deponeringstunneln • Minimal skadezon 	<ul style="list-style-type: none"> • Slät kontur på golvet vilket ger ideala förhållanden för de arbeten och körningar med fordon som krävs i deponeringstunnlarna • Inga extra arbeten med golvet inför deponering • Storleken på överberg mindre än vid konventionellt berguttag.
Minusposter för alternativet	<ul style="list-style-type: none"> • Stora kostnad för preparering och rengöring av golvet i tunneln • Stora kostnader för överberg • Stora extrakostnader för återfyllning av tunnlar, både material och installation 	<ul style="list-style-type: none"> • Kräver de största personalresurserna jämfört med övriga alternativ • Höga kostnader för personal och förbrukningsmaterial • Arbetet måste bedrivas i treskift under alla vardagar under 38 veckor per år. Dessutom krävs 12 byggdagar med bergarbeten för den sista 50-meters etappen. • Risken för störningar är större än för övriga alternativ. 	<ul style="list-style-type: none"> • Överberg och resulterande behov av mer återfyllning • Kräver större personella resurser jämfört med konventionellt berguttag • Högre kostnader för utrustning jämfört med konventionell berguttag. • När boring och sågning är klar efter 36 veckor återstår 12 byggdagar med bergarbeten för den sista 50-meters etappen.

Tabell 6-2. Sammanställning av årliga produktionskostnader för de tre alternativen.

Årliga kostnader i Mkr	Boring sprängning	Sågning alla ytor	Sågning enbart golv
Kapitalkostnader	2,5	2,4	3,5
Förbrukningsmaterial	4,8	10,3	6,8
Arbetskostnad	2,5	9,6	6,6
Extra kostnad för extra överberg	1,4	0	1,1
Kostnad för avjämning och rengöring av tunnelgolvet	3,8	0	0
Extra kostnad för återfyllnad	9,6	0	7,2
SUMMA:	24,6	22,3	25,2

7 Analys

7.1 Produktionstider

Vid konventionell borrhning och sprängning bedöms framdriften till 10,75 m per byggdag med tvåskift. Då kan 1 500 m deponeringstunnel färdigställas på cirka 28 veckor enligt bilaga 2. Det kan också vara möjligt att endast arbeta långa enkelskift för borrhning och sprängning med en viss flexibilitet. Det finns också möjlighet att välja att bara spränga på två fronter men då ökar produktionstiden.

Alternativet att såga alla ytor, det vill säga golv, väggar och tak är den mest arbetsintensiva metoden och kräver i stort sett kontinuerligt arbete under cirka 38 veckor per år för att hinna borra och såga ytorna för allt sprängningsarbete. Det betyder också att arbete måste bedrivas på fem tunnelfronter. Bilaga 2 visar att borrhning och sågning måste pågå under 14 byggdagar innan arbetet med sista loss hållning kan inledas. Det arbetet pågår under 12 byggdagar efter det att sågningen av den sista etappen är klar. Vid fortfarighet kommer de som borrar och sågar att påbörja med nästa års behov av deponeringstunnlar och därför kan produktionskostnaden baseras på 38 veckors arbete.

Vid alternativet att bara såga golvet kan borrhning och sågning av golvet genomföras på 36 veckor vid tvåskift vilket framgår av bilaga 2. Även för detta alternativ kommer det att krävas 12 byggdagar för att utföra loss hållningen av den sista 50 meters etappen.

Sprängning kommer att behöva ske på slutet av varje arbetsdag och det betyder också att borrhning för sågning och vajersågning då måste avbrytas. I denna analys har det antagits att 1 timma faller bort under varje skift även om endast ett skift per byggdag kommer att bli påverkade av sprängning och utvädring av spränggaser. Anpassningen av skiftgången är därför viktig för att minimera störningen i samband med sprängningen.

7.2 Kostnader

Kostnadsjämförelsen i tabell 6-2 redovisar enbart särkostnad för alternativen och inte den totala kostnaden för berguttaget för fem deponeringstunnlar med vardera längden 300 m per år. Kalkylerna är baserade på aktuella kostnadsuppgifter från genomförda byggprojekt men de innehåller trots detta en hel del osäkerheter. Det kommer att krävas noggrannare underlag och analyser för att kunna minska osäkerheten i kostnadsberäkningarna för de olika alternativen. De kostnadsposter som kräver noggranna analyser är främst kostnaden för avjämning och rengöring av tunnelgolvet samt extra kostnad för återfyllning. Körning på en ojämn golvyta kommer att medföra extra påkänningar på de fordon som ska köra i tunneln men detta går inte att kvantifiera i nuläget.

Alternativet med sågning av alla ytor har lägre kostnad jämfört med konventionellt berguttag men det finns osäkerheter i kalkylen för borrhning och sågning kontra konventionellt berguttag plus att kostnaderna för avjämning, rengöring och återfyllnad är mycket osäkra.

Alternativet med enbart sågning av golvet blir något dyrare än konventionellt berguttag men kostnadsskillnaden är försumbar. Det sågade golvet ger stora fördelar vid arbetet med att borra deponeringshål, mindre störningar och påkänning av den utrustning som ska utföra installation av buffert, deponering av kapslar och installation av återfyllnadsmaterialet. Dessa fördelar har inte bedömts kostnadsmässigt men de bör vara ganska stora.

I det konventionella berguttaget med borrhning och sprängning utgör kostnaden för överberg och extra material för återfyllnad en betydande post som belastar detta alternativ. Förutom det merarbete som uppstår vid avjämningen av tunnelgolvet inför inplaceringen av återfyllnadsblocken medför ett ojämnt tunnelgolv extra slitage på utrustningen och avjämning med betong kan krävas vid borrhning av deponeringshålen. Om denna betongavjämning kan lämnas kvar eller behöver avlägsnas är inte utrett. Detta medför att vissa kostnader och dess storlek inte är helt kända i nuläget.

Antagna kostnader för överberg och extra återfyllnad medför att alternativet med sågning av alla ytor har den lägsta totalkostnaden. Det finns dock stora osäkerheter i dessa kostnadsposter. Det krävs en noggrannare kostnadsberäkning i ett senare skede när kostnaden för berghantering, återfyllnadsmaterialet och inplaceringen av materialet kan underbyggas noggrannare.

Alternativet med sågning av alla ytor är tilltalande och kan vara det totalt sett det billigaste alternativet om alla kostnadsfaktorer inkluderas. Arbetsinsats och borring av de styrhål som krävs för sågningen samt kostnaden för förslitning av diamantvajern gör att fördjupade analyser av teknik och kostnad måste genomföras för val av alternativ. Med tanke på att berguttaget för deponeringstunnlar kanske ligger cirka 10 år framåt i tiden finns det möjlighet att genomföra denna typ av kostnadsanalyser samt följa teknikutvecklingen för både konventionell borring och sprängning som vajer-sågning.

7.3 Rationaliseringsvinster

Sågad kontur minimerar berguttag och material för återfyllning, samt bedöms vara mycket rationell för deponering och återfyllning, jämfört med konventionell drivning. Dessa fördelar har kostnadsuppskattats, exklusive eventuella tidsvinster vid återfyllning av deponeringstunnlar.

Sågningen innebär att inga sprängskador, EDZ, uppstår vilket kunde demonstreras i detta projekt. Avsaknad av EDZ bedöms ha betydelse för den långsiktiga säkerheten men kan inte kvantifieras i detta skede. Teoretiskt kan det kanske vara möjligt att minska djupet för deponeringshålen eftersom nuvarande djup ursprungligen är baserat på att det ska finnas en säkerhetsmarginal för sprängskador i golvet vilket inte uppstår vid sågning. Dessutom kan den sågade profilen möjligen kräva mindre skrottnings- och bergförstärkningsinsatser, men kostnaden för dessa arbeten går inte att kvantifiera i nuläget.

Förutom att sågat golv inte ger någon skadezon i tunnelgolvet optimeras förutsättningar för de verksamheter som sedan ska utföras i deponeringstunnlarna i form av transporter i deponeringstunnlarna, borring av deponeringshål, installation av buffert, deponering av kapsel och slutligen återfyllnad av deponeringstunnel samt pluggning.

7.4 Utvecklingstrender

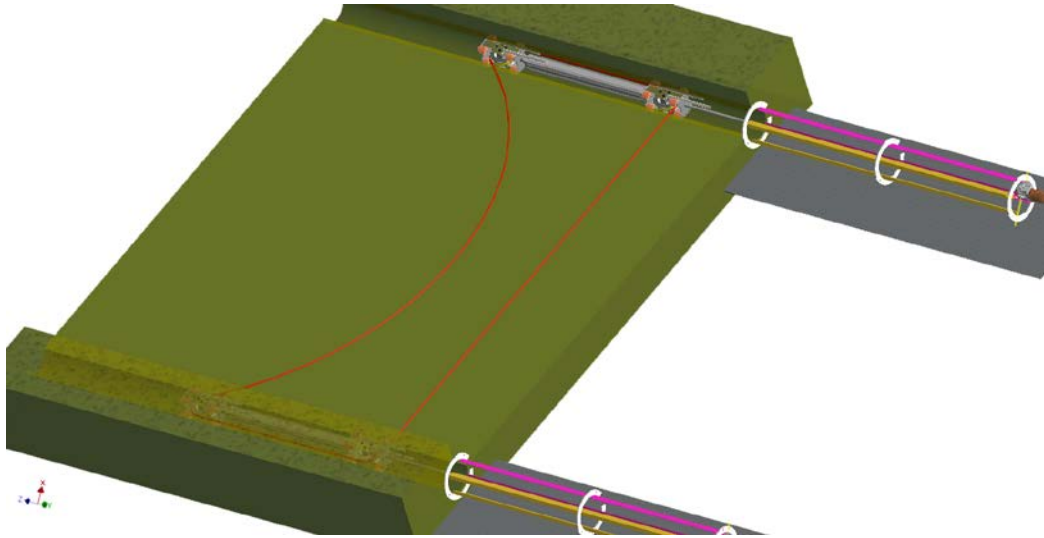
DWT har under många år arbetat med att utveckla utrustningen för att kunna såga utifrån och inåt med diamantvajer och den första generationen av sågningsutrustningen var främst anpassad för vertikal sågning för att skapa schakt för till exempel ventilation eller högspänningskablar. Syftet med testerna i detta projekt var bland annat att testa sågning av horisontella ytor. Utmaningen vid horisontal sågning är att tyngdlagen påverkar vajern. Det är nämligen svårt att behålla vajerns position i både sid- och längdled över längre distanser. Vajerns egentyngd gör att skärnittet ”faller” i längdled och sidled. Omfattningen av detta beror på hur mycket man spänner vajern. DWT har i det här försöket med aktuell utrustning visat att horisontala snitt på < 15 m kan utföras med bibehållen precision. Med nästa generations sågutrustning, som är under framtagning, visar preliminära resultat att utrustning kan behålla precision i upp till 50 m horisontalt breda skärnitt.

Utvecklingen av nästa generations sågutrustning har pågått under några år. I ett skede i utvecklingen var de långa stängerna med brytskivor för vajern monterade på samma maskin som normalt utför drivning och spänningshållning av vajern. Detta är dock inte möjligt vid sågning av väggar och tak om inte extra brytskivor för diamantvajern installeras.

Den nya utrustningen kommer att förflytta sig på samma sätt som en TBM-maskin som har gripplar som växelvis kan trycka fast den bakre respektive främre delen av maskinen. Det finns också cylindrar mellan den främre och bakre delen av utrustningen som medger förflyttning i hålens längdriktning.

Efter en förflyttning av utrustningen och låsning av den främre och bakre delen av maskinen kan sågningen fortsätta genom att diamantvajern drivs runt med vald hastighet och spänning till dess sågsnittet kommer i höjd med de främre brytskivorna. Då upprepas processen med att maskinen flyttar sig framåt ett steg och sågningsprocessen kan fortsätta längs de borrade styrhålen i berget. Figur 7-1 illustrerar ett läge då främre brytskivorna är framflyttade och vajern håller på att avverka berg till dess vajern blir rak mellan de främre brytskivorna.

Figur 7-1 visar en preliminär illustration av utformningen av nästa generations sågutrustning. Med denna utformning av utrustningen är det dessutom möjligt att såga båda sidorna samtidigt genom att använda dubbla utrustningar vilket kortar ned produktionstiden.



Figur 7-1. Illustration av nästa generation av sågningsutrustning för att kunna såga utifrån och in i berget.

Det som tillkommer med denna utrustning är att det krävs en cirka 3 m lång rigg med ”startrör” som bultas mot bergväggen. Startrören har samma innerdiameter som de borrade hålen och krävs för att kunna påbörja sågningen. Diamantvajern löper från brytskivorna i fronten av de självgående enheterna och till deras slut och vajern utgör en sluten loop vilket framgår av figur 7-1.

Startrören är slitsade så att diamantvajern kan såga från fronten av tunneln och inåt så långt hörnhålen är borrade. Denna utformning av utrustningen medger bättre möjlighet att optimera produktionskapacitet och produktionskostnader för vajersågningen.

Även utveckling av teknik för att borra längre borrhål med önskvärd precision skulle bidra att öka produktiviteten eftersom borringen är på kritiska linjen. Längre borrhål ger färre etapper vilket minskar kostnaderna för arbetet.

7.5 Summering

Projektet med sågning av alla sidor för en deponeringstunnel genomfördes för att demonstrera och jämföra teknik och kostnader för berguttaget för deponeringstunnlarna genom konventionell borring och sprängningen eller genom att vajersåga golv, väggar och tak.

Projektförutsättningarna inom ramen för en stor tunnelentreprenad var inte helt optimala, men detta relativt begränsade demonstrationsförsök visar på möjligheten att såga deponeringstunnlar. Några övergripande tekniska slutsatser kan dras:

- Etablerad teknik för styrd borring tillämpades inte eftersom endast korta borrhål ingick i projektet.
- Sågning ger mycket slät yta, helt överlägsen konventionell borring/sprängteknik.
- Sprängplanen för att bryta ut sågat berg krävde anpassning, troligen främst på grund av att spränggaser fann läckagevägar via sprickor till den sågade spalten, i stället för att bryta som vid konventionell tunneldrivning.
- I detta försök var sprängskadezonen obefintlig.
- Försöket har gett värdefull information om enhetstider för borring, rymning av hål och sågning.
- Ur produktionssynpunkt förefaller losshållning med helt sågad kontur något billigare än konventionell drivning, men det finns flera parametrar kring kostnadsbesparing i mindre överberg, slätare kontur och mindre återfyllningsmaterial som behöver analyseras mer detaljerat.
- Alternativet med att endast såga tunnelgolvet blir dyrare än konventionell drivning eftersom man även behöver både borr- och sågutrustning men alternativet bedöms ge stora fördelar för deponerings- och återfyllnadsarbetet. Detta alternativ bedöms även som robustare än att såga hela konturen eftersom man i huvudsak använder sig av konventionell bergdrivningsteknik.

8 Rekommendationer

Baserat på resultatet av projektet rekommenderas att fortsättningsvis noggrant följa utvecklingen av teknik och kostnader för vajersågning av berg genom sågning utifrån och in närmare. Ett antal frågor har identifierats och som måste studeras:

- Det är produktionseffektivt att förlänga styrhålen för vajersågning i syfte att reducera antalet sågningsetapper. Kalkylen är baserad på en borrlängd av 50 m men kan borrlängden ökas till 100 m halveras antalet uppställningar av utrustningarna. Detta skulle preliminärt ge en kostnadsbesparing på ca 400 000 kr/år.
- Möjligheten att kunna borra långa raka kärnborrhål utreds inom andra SKB-projekt. Bland annat planerar KBS-3H projektet borring av ett 300 m långt pilothål som ett demonstrationsprojekt.
- Denna studie har strikt utgått från toleranser enligt aktuell referensutförning för deponerings-tunnlar. Vilka variationer i toleranser kan man tolerera? Borrhålsavvikelser kan gå åt vilket håll som helst, att hålla golvet på rätt nivå är troligen viktigare än om det lokalt blir för snäv tunnelsektion. Detta kan justeras i samband med sprängning av färdig kontur. Det rekommenderas dock att utreda vad det innebär om stickningen blir för stor eller hur korrigering av eventuell felborring utanför avsedd kontur kan göras. Olika scenarioanalyser behöver genomföras.
- Nyttan och kostnadsbesparingar med ett plant golv i stället för en rå, sprängd yta bör för deponerings- och återfyllnadsarbetena kvantifieras bättre.
- Osäkerheten i sågningskapacitet i det kvartsrika berget i Forsmark bör kunna reduceras i framtiden. Kunskap om slitaget av vajern bör säkerställas genom tester för att en säkrare uppskattning om kapacitet och kostnad ska erhållas.
- Det fortsatta arbetet med att ta fram nästa generation sågutrustning bör bevakas.
- Slutgiltigt teknikval kan göras först när resultat från planerade och pågående utvecklingsprojekt avseende tunnelbyggnad och återfyllnad föreligger.

Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på www.skb.se/publikationer.

Nyberg U, Harefjord L, Bergman B, Christiansson R, 2009. Äspö Hard Rock Laboratory. Monitoring of vibrations during blasting of the APSE tunnel. SKB R-05-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Olsson M, Markström I, Pettersson A, Sträng M, 2009. Examination of the Excavation Damage Zone in the TASS tunnel, Äspö HRL. SKB R-09-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010. Ramprogram för detaljundersökningar vid uppförande och drift av slutförvar för använt kärnbränsle. SKB R-10-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Detaljerad beskrivning av borr- och sprängningsarbetet

För uppborrning av salvorna användes ett Atlas Copco Rocket Boomer 353 aggregat. Borr aggregatet hade tre bommar och var i största laget för denna tunnel, se figur B1-1. Två av salvorna laddades med SSE med hjälp av en laddbil från Orica, se figur B1-2. Tre av salvorna laddades med patronerat sprängmedel.

Salvorna lastades ut med en stor hjullastare och efter utlastning kontrollerades tak och väggar med hjälp av rivande skrotning. Berget i området var sämre än väntat och området tvärades av många kraftiga sprickor.

Etapp 1

Denna etapp bestod av tre salvor på 3,5 m vardera baserad på planerad borrarplan med parallellhålsöppning med fyra grovhål, se figur 3-6. Salva 1 och Salva 2 laddades med SSE medan Salva 3 laddades med patronerade sprängämnen.

Salva 1

Salva 1 borrades den 2012-02-14. Figur B1-3 är ett foto av tunnelfronten och visar de borrarade hålen enligt sprängplan för salva 1. Salvan laddades med SSE men inte riktigt efter den föreslagna laddplanen, vilket framgår av tabell B1-1. Laddningen ökades i hjälpare och stross medan laddningsmängden reducerades i öppningen. Som primer användes Pentex™ 25 som har en längd av 150 mm och väger 25 g. Specifik borrning var 5,2 bm/m³ och laddning 3,3 kg/m³ och max samverkande laddning var 3 kg, allt enligt NCCs sprängjournal.



Figur B1-1. Borr aggregat för borrning av hålen för sprängningen – Atlas Copco Rocket Boomer 353.



Figur B1-2. Laddbil.



Figur B1-3. Foto av fronten färdigborrad inför laddning av salva 1.

Salva 2

Salva 2 laddades den 2012-02-23. Figur B1-4 är ett foto av fronten inför salva 2 och till höger visas laddningen av salva 2. Salvan laddades med SSE, se figur B1-4. Här framgår det att berget var tvärat av sprickor som gav upphov till stora block i taket. Ett antal hål rasade igen och var svåra att ladda med pumpemulsion. Dessa hål laddades istället patronerat med 17 mm Detonex. En intressant observation var att det inte såg ut att finnas någon slits i väggarna vilket kan tyda på att berget expanderat vid sprängningen på grund av sprickor, eller föregående salva.

Specifikationer för salva 2 var de samma som för salva 1 enligt tabell B1-1.

Salva 3

Denna salva borrades 2012-03-06 och laddades den 2012-03-07. Salvan laddades enbart med patronerade sprängämnen och varje hål laddades enligt tabell B1-2. Avladdningen var ca 0,75 m. Den specifika borrhningen var 5,2 bm/m³ och den specifika laddningen 1,5 kg/m³ vilket är betydligt mindre än emulsionssalvorna i salva 1 och 2.



Figur B1-4. Foto av fronten inför salva 2 och till höger visas laddningen av salva 2.

Tabell B1-1. Laddplan för salva 1 och 2.

Hål	Planerad		Verklig		
	Laddning (g/m)	Avladdning (m)	Laddning (g/m)	Avladdning (m)*	Laddningsmängd (kg)*
Kontur	350	0,35	400	0,5	1,2
Hjälpåre	800	0,55	1 000	0,5	3
Stross	800	0,55	1 000	0,5	3
Öppning	1 600	0,3	1 000	0,5	3

*Enligt NCC sprängjournal.

Tabell B1-2. Laddningsplan för salva 3.

Laddningstyp	Sprängämne	Laddningslängd (mm)	Laddningsmängd/hål (kg)
Bottenladdning (Röd)	DynoRex 32 mm	260	0,3
Pipladdning 1 (Blå)	Kemix 22 mm	1 000	0,42
Pipladdning 2 (Grön)	Kemix 17 mm	1 000	0,22
Pipladdning 3 (Gul)	Dynotex 17 mm	460	0,095



Etapp 2

Denna etapp bestod av två salvor, salva 4 och 5. Salvorna borrades utan öppningshål där salvhålen nu var vinklade mot den sågade slitsen i vänster vägg. Hålen i dessa salvor laddades patronerat.

Salva 4

Salva 4, som sprängdes 2012-05-04, bestod av 48 stycken hål med en salvlängd av 2,0 m. Den specifika borrningen var $4,0 \text{ bm/m}^3$ och den specifika laddningen $2,3 \text{ kg/m}^3$. Hålen intervallfördelades enligt figur B1-5 som också visar ett foto av den uppborrade fronten för salva 4. Maximal samverkande laddning var 1,26 kg.

Salvan laddades patronerat enligt tabell B1-3. Avladdad längd ca 0,35 m.



Figur B1-5. Den vänstra bilden visar borrhplanen för salva 4 med 48 borrhål för sprängladdningen med angivande av tändföljd. Bilden till höger är ett foto av den borrhade fronten.

Tabell B1-3. Laddplan för salva 4.

Laddning	Sprängämne	Laddningslängd (mm)	Laddningsmängd/hål (kg)
Kontur	DynoRex 25 mm	1 650	1,02
Stross			
Bottenladdning	DynoRex 32 mm	550	0,58
Pipladdning	DynoRex 25 mm	1 100	0,68

Salva 5

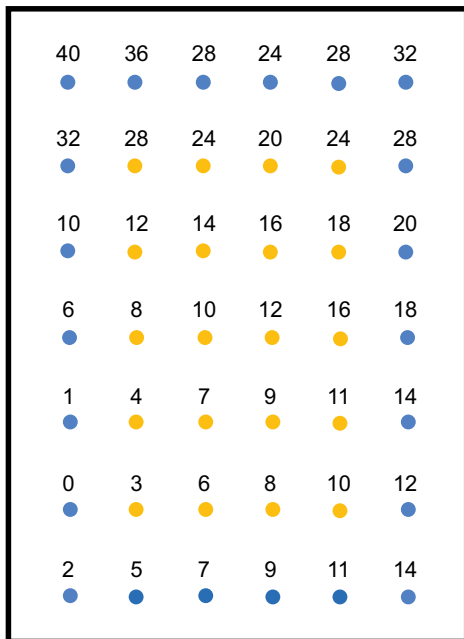
Salva 5, som sprängdes den 2012-05-14, bestod av 42 stycken hål och hade en salvlängd på 4,5 m. Den specifika bormningen var 2,6 bm/m³ och den specifika laddningen var endast 0,9 kg/m³. Maximal samverkande laddning var 1,6 kg. Laddningsplanen för salvan framgår av tabell B1-4. Salvan laddades med patronerade sprängämnen och avladdningen var ca 1,2 m.

Figur B1-6 visar en borrh- och laddplan för salva 5. Salva 5 medförde att det blev en öppning mot spårtunneln.

Tabell B1-4. Specifik laddning för salva 5.

Laddning	Sprängämne	Laddningslängd (mm)	Laddningsmängd/hål (kg)
Bottenladdning (Röd)	DynoRex 32 mm	260	0,3
Pipladdning 1 (Brun)	DynoRex 25 mm	1 620	1
Pipladdning 2 (Gul)	Dynotex 17 mm	1 400	0,29

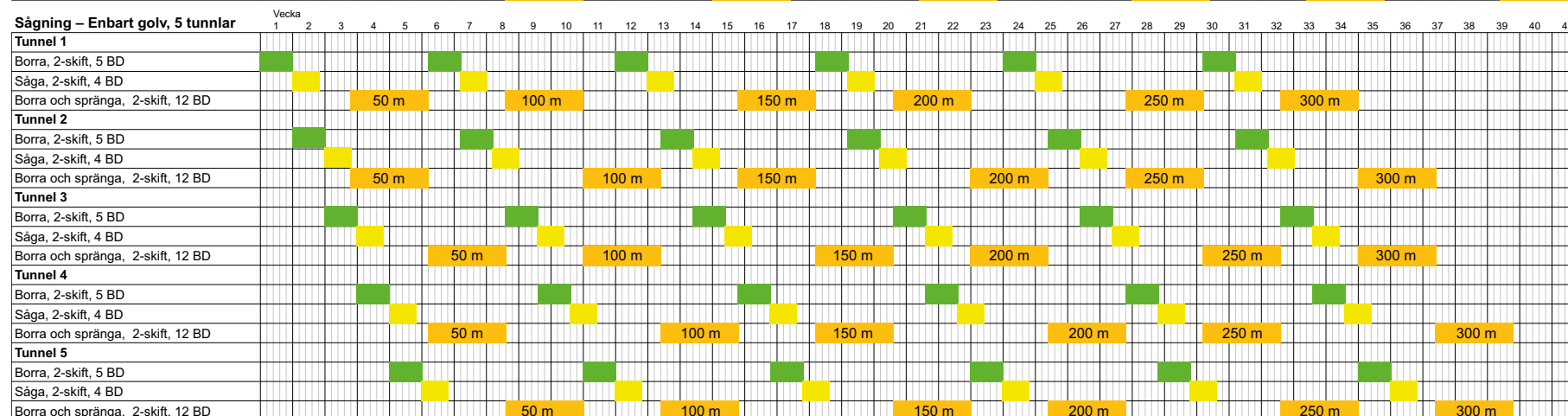
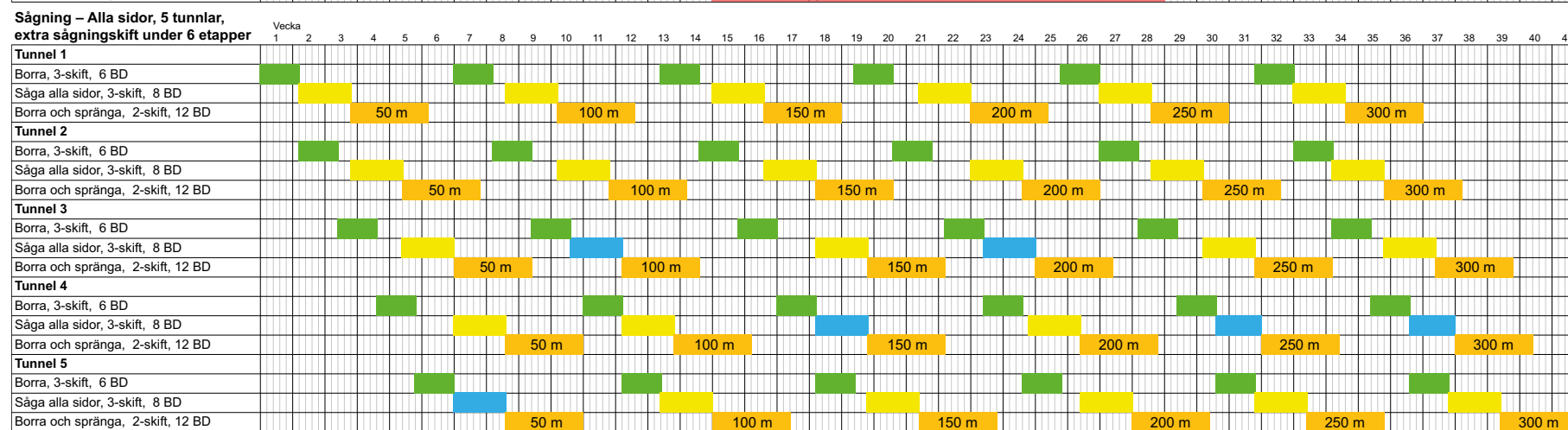
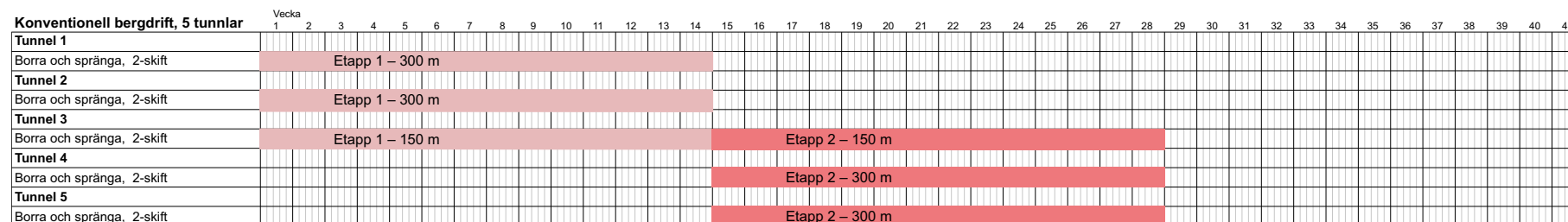




Figur B1-6. Borrplan för salva 5 med angivande av tändföljd för sprängsalvan. Salva 5 medförde att det blev en öppning av mot spårtunneln.

Produktionstider för de tre berguttagsalternativen

SKB R-13-06



55