

## Utbyggnaden av Äspölaboratoriet 2011–2012

### Karakterisering, projektering och tunneldrivning

Emmeli Johansson, Leif Stenberg, Isabelle Olofsson  
Svensk Kärnbränslehantering AB

Rickard Karlzén  
Uppländska Bergborrnings AB

September 2015

#### **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-13-28**

ID 1408003

September 2015

# **Utbyggnaden av Äspölaboratoriet 2011–2012**

## **Karakterisering, projektering och tunneldrivning**

Emmeli Johansson, Leif Stenberg, Isabelle Olofsson  
Svensk Kärnbränslehantering AB

Rickard Karlzén  
Uppländska Bergborrnings AB

*Nyckelord:* Detaljundersökning, Geovetenskaplig modellering, Utbyggnad Äspölaboratoriet, Karakterisering, Tunnelkartering, RoCS, HMS, Geologi, Hydrogeologi, Tunneldrivning, Projektering, Injektering.

En pdf-version av rapporten kan laddas ner från [www.skb.se](http://www.skb.se).

© 2015 Svensk Kärnbränslehantering AB

## Sammanfattning

Tunneldrivningen i projekt TUDP002 Utbyggnad Äspölaboratoriet 2011–2012 har genomförts för att skapa nya utrymmen för framtida experimentplatser under jord för fortsatt teknikutveckling i full skala och under realistiska förhållanden. Projektet var indelat i tre delprojekt med olika ansvarområden. Projektets mål var att bidra med förberedelser med avseende på test och vidareutveckling av metoder och teknik inför byggstarten av Kärnbränsleförvaret. Delprojekt karakterisering hade uppgiften att testa och vidareutveckla metoder och teknik för detaljundersökning och dokumentation av rådande förhållanden i berget. Delprojekt projektering hade uppgiften att testa och vidareutveckla metoder och teknik för projektering och upphandling av bergentreprenader. Delprojekt tunneldrivning hade uppgiften att testa och vidareutveckla metoder och teknik för bergbyggnad, inklusive uppföljning och styrning av bergentreprenader.

Undersökningarna av berget omfattade borrning av två stycken förundersökningsborrhål; KA2051A01 och KA3007A01, samt två stycken pilotborrhål; KA3011A01 och KA3065A01, vilka borrades inom tunnelkonturen för transporttunnlarna. Geovetenskaplig modellering utfördes i samspel mellan undersökningsgruppen i delprojekt karakterisering och delprojekt projektering med särskilda arbetsmöten för att ta fram underlag till beslut för lägen av transport- och experimenttunnlar. Detta arbetssätt var grundläggande för att uppnå kraven att behålla ett högt grundvattentryck och undvika injektering i tre experimenttunnlar.

Utbyggnaden av Äspölaboratoriet utfördes huvudsakligen på nivån –410 m.ö.h., men även på nivån –450 m.ö.h. Totalt drevs 308 m tunnlar i form av tre transporttunnlar och åtta experimenttunnlar. Projektet klarade att uppnå kraven, i form av uppgiften att leverera tre experimenttunnlar där ingen injektering fick utföras och en experimenttunnel med önskat högt grundvattentryck.

Projektets resultat visar att funktionskraven gällande tunneldrivning kan uppnås med dagens maskiner och resurser. Dock finns det behov av att se över hur funktionskraven ska verifieras inför kommande byggnation av Kärnbränsleförvaret. Förutsättning för att utvecklingsbehov ska definieras är att alla krav på t ex injektering och tunneldrivning fastläggs och specificeras i detalj. Detta gäller även de detaljundersökningar och utvärderingar som behöver integreras i bergbyggnaden. På detta sätt kan en helhetssyn skapas och utvärderingar genomföras för att erhålla en säker och effektiv bergbyggnadsmethodik. Detta ger underlag för att göra realistiska planer och budget på ett strukturerat sätt.

En plan för att upprätta och implementera ett system för kvalitetsstyrning och kontroll av tunnelproduktion behöver beskriva vilka data som är relevant och hur dessa ska utvärderas, samt åtgärder vid avvikelser och hur data ska hanteras för att uppnå önskad spårbarhet. Kvalitetskontroller behöver beskriva vilken fältdokumentation som ska samlas in, loggning, provning i fält, utvärdering samt hur den ska kvalitetsgranskas i de olika stegen. Det är viktigt att identifiera mål och syfte för varje kontroll och att tydliggöra hur beslut ska tas och av vem. Utifrån detta kan sedan en organisation utformas för att kunna hantera tunnelproduktion där ansvar, befogenhet och roll tydliggörs.

## Summary

In the project Expansion of Äspö HRL (Hard Rock Laboratory) 2011–2012, tunnels were excavated to provide new experimental sites for continued technology development in full scale under realistic conditions. The objective of the project was to contribute with preparation in accordance with testing and further development of methods and technology before starting the construction of the Final Repository for Spent Nuclear Fuel. The project was divided into three sub projects with different areas of responsibility. Sub project characterisation was responsible for testing and further development in the area of detailed investigation and documentation of the current conditions of the rock. Sub project planning and design was responsible for testing and further development in the area of planning, design and the process of purchasing the contractor. Sub project tunnelling was responsible for testing and further development in the area of tunnel excavation, including follow-up and management of the contractor.

The geoscientific investigations included drilling of two pre-investigation boreholes; KA2051A01 and KA3007A01, and two pilot boreholes; KA3011A01 and KA3065A01, drilled inside the tunnel contour of the planned access tunnels. Geoscientific modelling was carried out as teamwork between the investigation group in subproject characterisation and sub project planning and design through dedicated sessions in support of decision making for the emplacement of access tunnels and experimental tunnels. This close cooperation proved fundamental in fulfilling the design constraint of maintaining high ground water pressure and avoiding grouting in three experimental tunnels. The expansion of Äspö HRL was mainly carried out at –410 m.a.s.l. but also at –450 m.a.s.l. A total of 308 m of tunnels were excavated, which consisted of three access tunnels and eight experimental tunnels. The project achieved the design constraint in terms of the assignment of providing three experimental tunnels where no grouting was allowed and one experimental tunnel with required high ground water pressure.

The results of the project show that the functional requirements on tunnel excavation can be achieved with the machinery, equipment and resources available today. However, there is a need to review how the functional requirements shall be verified before starting the construction of the Final Repository for Spent Nuclear Fuel. The prerequisite for needs of development is to define and establish all the requirements in detail for i.e grouting and tunnel excavation. This also applies for the detailed investigations and evaluations that need to be integrated in tunnel production. In this way a comprehensive view can be created and evaluations can be done to obtain a safe and efficient tunnel production process. This is expected to provide the basis for creating realistic time schedule and budget in a structured way.

A plan to establish and implement a quality management system and control of tunnel production needs to describe which data is relevant and how it shall be evaluated, together with data management procedures to achieve required traceability and description on measurements when a deviation from plan has occurred. Quality control need to include which field documents that shall be gathered, which logging, testing in field and evaluation that shall be executed, together with description on how the data shall be quality reviewed in the different steps. It is important to identify objective and purpose of each quality control and to clarify how decisions shall be taken and by whom. An organization can then be designed based on this, where responsibility, authority and roles are clarified, in order to handle tunnel production.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Introduktion</b>	7
1.1	Rapportens syfte	7
<b>2</b>	<b>Förutsättningar</b>	9
2.1	Mål för projektet	9
2.1.1	Effektmål	9
2.1.2	Projektmål	9
2.2	Intressenternas kravställningar	9
2.2.1	Intressenter med behov av experimentplatser	9
2.2.2	Intressenter med behov av teknikutveckling	11
2.2.3	Kärnbränsleförvarets krav på deponeringstunnlar	13
2.3	Geovetenskapliga förhållanden	14
2.4	Utbyggnadsprojektets omfattning	16
2.5	Projektorganisationen	18
2.5.1	Projekt	18
2.5.2	Styrgrupp	19
2.5.3	Referensgrupp	19
2.6	Befintlig anläggning Äspölaboratoriet	19
<b>3</b>	<b>Metoder</b>	21
3.1	Karakterisering och geovetenskaplig modellering	21
3.1.1	Kärnbörning	21
3.1.2	Injektering av kärnborrhål	22
3.1.3	Undersökningar i kärnborrhål	23
3.1.4	Rock Characterisation System (RoCS)	29
3.1.5	Strategi för geovetenskaplig modellering	30
3.2	Projektering	31
3.2.1	Sammanställning av konstruktionsförutsättningar, tillkommande förändringar i omfattning och krav	31
3.2.2	Upphandlingsprocessen	32
3.3	Kontrollprogram för grundvattentryck	34
3.4	Observationsmetodens tillämpning	35
3.5	Injektering	35
3.5.1	Injekteringsutrustning	36
3.5.2	Injekteringsbruk	36
3.5.3	Injekteringsutförande	37
3.5.4	Hydrauliska mätningar	39
3.5.5	Fortlöpande provning av injekteringsbruk	39
3.6	Tunneldrivning	40
3.6.1	Börning	40
3.6.2	Laddning	41
3.6.3	Sprängning	43
3.7	Bergförstärkning	45
3.7.1	Bergbult	45
3.7.2	Sprutbetong	46
3.8	Kvalitetssäkring och kontroll	47
3.8.1	Projektet	47
3.8.2	Tunnelentreprenaden	47
<b>4</b>	<b>Genomförande och resultat</b>	49
4.1	Karakterisering	49
4.1.1	Förundersökningshål KA2051A01 och KA3007A01	50
4.1.2	Pilotborrhål KA3011A01 och KA3065A01	52
4.1.3	Tunnelkartering med RoCS	53
4.2	Projektering	54
4.2.1	Förberedande arbete inför upphandling	54
4.2.2	Upphandling	55

4.3	Geovetenskaplig modellering	57
4.3.1	Geovetenskaplig modell M1	57
4.3.2	Geovetenskaplig modell M2	58
4.4	Platsanpassning av layouten mot verkliga bergförhållanden	59
4.4.1	Prognos och platsval för TASJ och TAS01	59
4.4.2	Prognos och platsval för TASP och TASU	60
4.4.3	Prognos och platsval för experimenttunnlar	61
4.5	Geovetenskaplig modell M2.5	62
4.6	Utbyggnadens slutliga layout	63
4.7	Kontrollprogram för grundvattentryck	64
4.7.1	Utfall av kontrollprogrammet	66
4.8	Observationsmetodens tillämpning	66
4.9	Injektering	67
4.10	Tunneldrivning	70
4.10.1	Borrning	71
4.10.2	Laddning	71
4.10.3	Sprängning	73
4.10.4	Geometri och kontur	75
4.11	Bergförstärkning	75
4.11.1	Bultning	76
4.11.2	Sprutbetong	76
4.12	Organisation respektive tidsplan	77
4.12.1	Utfall tunneldrivning	79
4.13	Uppfyllelse av uppställda krav från intressenter	80
4.13.1	Återkoppling till intressenter med behov av experimentplatser	80
4.13.2	Återkoppling till intressenter av teknikutveckling	81
<b>5</b>	<b>Summering av viktiga erfarenheter och rekommendationer</b>	<b>83</b>
5.1	Anpassning till befintlig anläggning Äspölaboratoriet	83
5.2	Karakterisering och geovetenskaplig modellering	83
5.2.1	Kärnbörning	83
5.2.2	Karakterisering	83
5.2.3	Tunnelkartering	84
5.2.4	Geovetenskaplig modellering	84
5.3	Projektering	85
5.3.1	Upphandlingsprocessen	85
5.4	Observationsmetodens tillämpning	86
5.5	Injektering	86
5.6	Tunneldrivning	87
5.6.1	Borrning	87
5.6.2	Laddning	88
5.6.3	Sprängning	88
5.6.4	Bergsförstärkning	89
5.7	Kvalitetssäkring och kontroll	89
5.8	Organisation respektive tidsplan	89
5.9	Teknikutveckling i ett produktionsprojekt	91
	<b>Referenser</b>	<b>93</b>
<b>Bilaga A</b>	Definitioner och begrepp	95
<b>Bilaga B</b>	Geologisk enhålstolkning (SHI) KA2051A01	99
<b>Bilaga C</b>	Geologisk enhålstolkning (SHI) KA3007A01	101
<b>Bilaga D</b>	Geologisk enhålstolkning (SHI) KA3011A01	103
<b>Bilaga E</b>	Geologisk enhålstolkning (SHI) KA3065A01	105
<b>Bilaga F</b>	Handlingar förfrågningsunderlag	107
<b>Bilaga G</b>	Visualisering av geovetenskaplig prognos utifrån Modell M2.1-M2.4 vid platsanpassning av experimenttunnlar	109
<b>Bilaga H</b>	Schema över arbetsprocesser vid drivning av en experimenttunnel	113
<b>Bilaga I</b>	Variationer för tvärsnittsarea för tunnlar TASJ, TASN och TAS04	115

# 1 Introduktion

Vid Äspölaboratoriet bedrivs forskning och utveckling med realistiska förutsättningar – verkliga och naturliga förhållanden i berget – som en förberedelse inför byggandet av Kärnbränsleförvaret. Anläggningen används även för viss forskning och teknikutveckling inom avdelning A, Avfall och Rivning.

Projektet Utbyggnad av Äspölaboratoriet 2011–2012 genomfördes då nya utrymmen under jord i Äspölaboratoriet krävdes för att stödja framdriften av forskningen och utvecklingen på uppdrag av Kärnbränsleprogrammet och Avdelning Avfall och Rivning. Dessutom behövdes en ny experimentplats för vidareutveckling av horisontell deponering; KBS-3H metoden (SKB 2012). SKB International behövde även få tillgång till experimentplatser under jord för att utveckla Äspölaboratoriet till ett internationellt forskningscentrum. Som en del av det växande samarbetet med universitet och högskolor, som är intresserade av att bedriva annan typ av forskning i Äspölaboratoriet, framfördes behov av nya faciliteter och experimentplatser såväl ovan som under jord. De nya intressenterna kunde få sina behov tillgodosedda på ett relativt enkelt sätt genom att utbyggnaden gjordes samordnat med SKB:s planerade utbyggnad av anläggningen.

Inför byggandet av slutförvaret för använt kärnbränsle är det av avgörande betydelse för SKB att kunna visa att långsiktig säkerhet kan uppnås med de tre barriärerna som ingår i KBS-3 konceptet; kapsel, buffert och berg. För att upprätthålla flerbarriärprincipen förutsätts att bufferten hålls på plats med hjälp av ett återfyllnadsmaterial med egenskaper som begränsar vattenflödet längs tunnarna. Det är viktigt att uppnå en god konturhållning som också uppfyller krav på minimal utbredning av den från sprängningen skadade zonen i det kvarstående berget runt deponeringstunnarna. Återfyllningens och sprängskadezonens hydrauliska egenskaper påverkar den storskaliga hydrauliska konduktiviteten för deponeringstunnarna. Därför behövs även demonstration av metoder och teknik för såväl byggande i berg som undersökning av berget. Detta uppnås genom att successivt anpassa och vidareutveckla teknik och metoder från aktuellt kunskapsläge. Det är också viktigt att tillvarata hittills uppnådda framsteg och erfarenheter från verksamheten vid Äspölaboratoriet och andra relevanta verksamheter inom och utom bergbyggnadsbranschen.

## 1.1 Rapportens syfte

Denna rapport sammanfattar projekt Utbyggnad av Äspölaboratoriet 2011–2012, och beskriver omfattning, strategi, genomförande och resultat.

Erfarenhetsrapporten är strukturerad efter de förutsättningar och aktiviteter som varit viktiga för att nå projektets mål och bibehålla kvalitet och säkerhet under arbetets gång. För definitioner och begrepp inom de olika aktiviteterna, se bilaga A.

## 2 Förutsättningar

### 2.1 Mål för projektet

#### 2.1.1 Effektmål

Projektets effektmål var att:

- Skapa utökade och nya möjligheter, genom nya experimentplatser under jord, för fortsatt teknik-utveckling i fullskala och under realistiska förhållanden på uppdrag av:
  - Avdelning A, Avfall och Rivning.
  - Avdelning B, Kärnbränsle.
  - KBS-3H-projektet.
  - SKB International.
  - Nova Forskning och Utveckling.

#### 2.1.2 Projekt mål

För att uppnå effektmålet behövde projektet uppnå följande mål:

- 1) Skapa nya tunnlar och experimentplatser för:
  - a. Test av en valvplugg i full skala (projekt KBP1004).
  - b. KBS-3H-projektets avslutande konceptfas.
  - c. Projektet för utveckling av detaljundersökningsmetodik (DETUM-1).
  - d. Projektet Concrete and Clay.
  - e. SKB Internationals kunders räkning.
  - f. Forskningsprojekt inom Nova Forskning och Utveckling (FoU).

Se vidare avsnitt 2.2.

- 2) Att inför byggstarten av Kärnbränsleförvaret inleda förberedelser med avseende på test och vidareutveckling av metoder och teknik i form av:
  - a. Detaljundersökningar och dokumentation av rådande förhållanden i berget.
  - b. Projektering och upphandling av bergentreprenader.
  - c. Byggande i berg inklusive uppföljning och styrning av bergentreprenader.

## 2.2 Intressenternas kravställningar

Under beredningen inför utbyggnaden av Äspölaboratoriet genomfördes en intressentförfrågan inom SKB och dess samarbetspartner. Ett flertal intresseanmälningar kom in och utifrån dem fastlades kravspecifikationer från respektive intressent och utgjorde underlag för utbyggnadens omfattning. Resultat av kravuppfyllelse framgår i avsnitt 4.13.

### 2.2.1 Intressenter med behov av experimentplatser

Projektet hade som projektmål att skapa tunnlar för de intressenter som beskrivs under projektmål nummer 1 under avsnitt 2.1.2. Nedan sammanfattas kravspecifikationerna från respektive intressent.

#### ***KBP1004 systemutveckling av valvplugg***

Valvpluggsprojektet var i behov av en experimenttunnel för konstruktion av en valvplugg (Malm 2011) enligt referensutformningen, se figur 2-2. Krav för experimenttunneln var att den behövde förläggas parallellt med största huvudspänningsriktningen. Experimenttunneln behövde drivas i ett område utan uthålliga sprickor längre än tunneldiametern. Detta gällde framförallt i pluggläge men rekommenderades för hela tunneln. I området för plugg samt bakomliggande försöksutrymme, total



längd 7 m, fick inga synliga sprickor längre än 1 m förekomma. Det högst prioriterade kravet var att inget vatteninläckage i pluggområdet och utrymmet fram till tunnelfronten fick förekomma. Detta för att få önskade randvillkor och förutsättningar för valvpluggsförsöket.

Geometri för tunneln behövde överensstämma med den gällande utformningen för deponerings-tunnel enligt KBS-3 metoden (SKB 2010c), se sektion D-D figur 2-6. Med hänsyn till att minimera risken för att skapa en vattenförande störd zon bedömdes det att tunneldrivningen behövde genomföras med en drivningsteknik framtagen för att minimera skadezonen utöver vad som krävs för en deponeringstunnel. Samtliga borrhål av alla typer borrades upp i en följd. Därefter laddades och sprängdes stross- och hjälparhålen och till sist laddades konturhålen med momentan upptändning för respektive vägg, sula och tak för att minimera skadezonen och generera bästa konturen.

Ingen bergförstärkning fick utföras inom det valda läget för valvpluggen. För övrigt kunde all typ av konventionell bergförstärkning accepteras i området mellan påslaget och läget för framkant av plugg, så länge kravet på säkerställd stabilitet uppnåts. Om berget inte kunde motsvara kraven om minimal förekomst av vattenförande sprickor kunde injektering accepteras, utförd antingen som förinjektering eller efterinjektering.

Total tunnellängd bedömdes ursprungligen till ca 20 m. Slutlig längd planerades sedan fastställas utifrån utförda undersökningar i ett 30 m lång pilothål som Valvpluggsprojektet planerade att kärnborra. Avstånd mellan påslag och framkant av plugg planerades till ca 6,60 m. Dessutom behövde avståndet vara så stort att spänningsomlagringar på grund av transporttunneln ej påverkade pluggläget och avfasning fick endast utföras till max 1,7 m från påslaget.

Valvpluggsprojektet hade tydliggjort att de skulle vara störningskänsliga under tiden som pluggen gjuts och härdar. Vilket medförde att under denna period kunde inga sprängningar tillåtas i närområdet.

### **KBS-3H**

KBS-3H efterfrågade en bergvolym med ett grundvattentryck på 4–5 MPa, motsvarande förvarsdjup, för att kunna genomföra sina planerade Mega Packer-tester (Eriksson och Lindström 2008) och möjliggöra för framtida systemtest på relevant djup. Redan innan förundersökningarna av bergvolymen utfördes kunde det konstateras att ett så högt grundvattentryck ej kunde erhållas på Äspölaboratoriet. I bästa fall kunde ett område med ett grundvattentryck på 3,4–3,6 MPa identifieras. Ett grundvattentryck på över 3 500 kPa bedömdes vara tillräckligt för att Mega Packer-tester ska kunna genomföras under realistiska förhållanden.

Nischen och borrhålet för planerat fullskaligt prototyp för KBS-3H behöver orienteras nära parallellt med den största huvudspänningsriktningen och därmed parallellt med det största konduktiva spricksetet på Äspö. Inga subhorisontella eller subvertikala sprickor får skära den tänkta deponeringsorten. Planen från KBS-3H sida var att strategiskt placera nischen samt den planerade deponeringsorten i förhållande till större konduktiva sprickor/zoner som stryker subparallellt med KBS3H-nischen. Genom detta minimeras i viss mån inläckage till nischen samt den planerade deponeringsorten.

Geometri för nischen var beställd enligt; djup 25 m, höjd 7 m och bredd 15 m, se sektion C-C figur 2-6. Permanent bergförstärkning behövde genomföras i nischen. Bergförstärkning kunde vara både nätning, bultning och sprutbetong, dock bedömde KBS-3H att användandet av sprutbetong var att föredra. Inga krav fanns från KBS-3H på att nischen inte fick injekteras, dock var kravet att injekteringsmedel inte fick sprida sig några längre sträckor in i KBS-3H projektets tänkta borriktning bortom nischens planerade slut.

### **DETUM-1**

Projekt DETUM-1 ansvarar för att identifiera behov och genomföra vidareutveckling av metoder och verktyg för undersökningar, modellering och datahantering, samt tillhörande kvalitets- och ledningssystem för användning i samband med Kärnbränsleförvarets uppförande. DETUM-1 hade önskemål om att borra ett kärnborrhål parallellt med KBS-3H projektets deponeringstunnel för att kunna testa metoder för identifiering av och bestämning av geometrisk utbredning av sprickor/mindre

deformationszoner som underlag för modellering, under geometriska förhållanden som efterliknar ett deponeringsområde. Projekt DETUM-1 planerar att borra sitt kärnbråhåll parallellt med, och på 40 m avstånd från KBS-3H:s planerade pilothål, för undersökning av bergvolymen mellan dessa borrhål. En förutsättning var också att dessa tester kan planeras utgående från detaljerade modeller över aktuell bergvolym (främst geologi och hydrogeologi) som har upprättats på basis av undersökningsresultat från utbyggnadens uppförande och data från närliggande rampavsnitt.

### **Concrete and Clay**

Projekt Concrete and Clay var i behov av två experimenttunnlar på vardera 12,5 m. Båda experimenttunnlarna skulle ha samma geometri och takhöjden i tunnlar fick inte understiga 5 meter, se sektion A-A figur 2-6. Innan överlämning skulle geologisk kartering av väggar, tak och front av vattenförande strukturer och andra sprickor vara genomförd.

Projekt Concrete and Clay hade önskemål om att minimera närheten till cementprodukter andra än de som projektet planerar att använda i sina egna experiment. Projektet är i behov av ett säkert flöde av opåverkat grundvatten, vilket innebär att så lite injektering som möjligt kunde ske i experimenttunnlarna. Närheten till injekteringsbruk behövde minimeras då detta i värsta fall kan orsaka förändringar i grundvattnets sammansättning, något som kan påverka projekt Concrete and Clay:s studie av pH-plymens utbredning. Detta medförde också att bergförstärkning med bultning och nät föredrogs framför sprutbetong.

### **SKB International och Nova FoU**

För experimentplatserna för SKB International och Nova FoU fanns inga specifika krav för angivna. Sammanlagt behövde det byggas 100 m tunnel med en tunnelgeometri som överensstämmer med den gällande utformningen för deponeringstunnel enligt KBS-3-metoden (se sektion D-D figur 2-6). Tunnellängderna var föreslagna till 50 m, 30 m samt två tunnlar på 10 m som behövde placeras i så olika geologiska förhållande som gick att åstadkomma inom valt utbyggnadsområde.

## **2.2.2 Intressenter med behov av teknikutveckling**

Från avdelning Kärnbränsle var målet att krav på teknik, säkerhet och effektiviseringar för att skapa en industrialiserad tunneldrivningsprocess, inarbetas, provas och utvecklas. Detta så att utbyggnadsprojektet kunde utgöra en referens för projekt Kärnbränsleförvaret samt ett underlag till kommande säkerhetsredovisning. Detta kanaliseras genom definierade utvecklingsprojekt inom ramen för Teknikutveckling Berg, såsom projekt Utveckling av bergprojekteringsmetodik baserad på observationsmetodens principer, projekt Metodik för utförande- och resultatkontroll av bergschakt (RESKONTR), och projekt DETUM-1. Nedan sammanfattas kravspecifikationerna från respektive intressent.

### **DETUM-1**

Projekt DETUM-1 ska upprätta detaljerade program för detaljundersökningars genomförande, dels i samband med uppförandet av tillfarter och centralområde, dels i samband med detaljundersökningar i deponeringsområdena. Ett önskemål som var ställt på utbyggnadsprojektet var att det organiseras så att projektet i möjligaste mån efterliknar den organisation som kan tänkas vara lämplig för uppförandet av Kärnbränsleförvaret (SKB 2010a). En undersökningsgrupp inom utbyggnadsprojektet behövde ansvara för alla undersökningar och geovetenskaplig modellering som underlag för upprättande av prognoser över förväntade bergförhållanden. Undersökningarna behövde genomföras integrerade med projektering och tunneldrivning och med tydliga kommunikationsvägar mellan dessa aktörer vilket säkerställdes med hjälp av styrande och redovisande dokument.

Tunnelkartering behövde genomföras med hjälp av det nya systemet RoCS (Rock Characterisation System) i 3D. Tunnelkarteringen i utbyggnadsprojektet är den första riktiga tillämpningen av RoCS. Projekt DETUM-1 bedömde att erfarenheterna från utbyggnadsprojektet kommer att vara mycket värdefulla och ge underlag till fastläggande av metodbeskrivning för RoCS.

I samband med tunneldrivning finns det olika sätt och behov att använda undersökningar i pilot-borrhål som underlag för byggprognoser gällande förinjektering och bergförstärkning. Dessa byggprognoser baseras i sin tur på geovetenskapliga prognoser för bergets egenskaper och vatteninflöden. Projekt DETUM-1 föreslog att geologisk enhålstolkning och geovetenskapliga prognoser skulle upprättas på olika underlag:

- På översiktlig kartering av borrhärlar och information insamlad under borrhållning (inklusive tryckresponser i närliggande borrhål).
- Förenklad geologisk enhålstolkning, utan BIPS (Borehole Image Processing System), geofysik och hydrotester som underlag.
- Geologisk enhålstolkning, med BIPS, geofysik och hydrotester som underlag.

De olika geologiska enhålstolkningarna och geovetenskapliga prognoserna kan sedan jämföras med varandra för att utvärdera det relativa värdet av den insamlade informationen och lämplig metodikutformning.

Tydlig styrning och dokumentation av alla aktiviteter i ett projekt är viktigt. I detta ingår bl a att tydliggöra vem som är beställare/avsnämare av varje aktivitet, hur informationsflödet går i projektet, inte minst hur resultat och redovisande dokument ska levereras och vem som är ansvarig för varje del. För att tydliggöra detta har DETUM-1 tidigare tagit fram generella scheman över arbetsprocesser. Dessa generella scheman över arbetsprocesser överlämnades till utbyggnadsprojektet för att kunna anpassas till projektet och därmed kunna prövas i verkligheten.

Utveckling av bergprojekteringsmetodik baserad på observationsmetodens principer och Metodik för utförande- och resultatkontroll av bergschakt (RESKONTR)

Projektet Utveckling av bergprojekteringsmetodik baserad på observationsmetodens principer, har som mål att definiera och utveckla krav, strategier och metoder som behövs för projektering, upphandling av bergentreprenader och uppförande av slutförvarsanläggningen till den omfattning som behövs för att planera och styra uppförandet av Kärnbränsleförvaret.

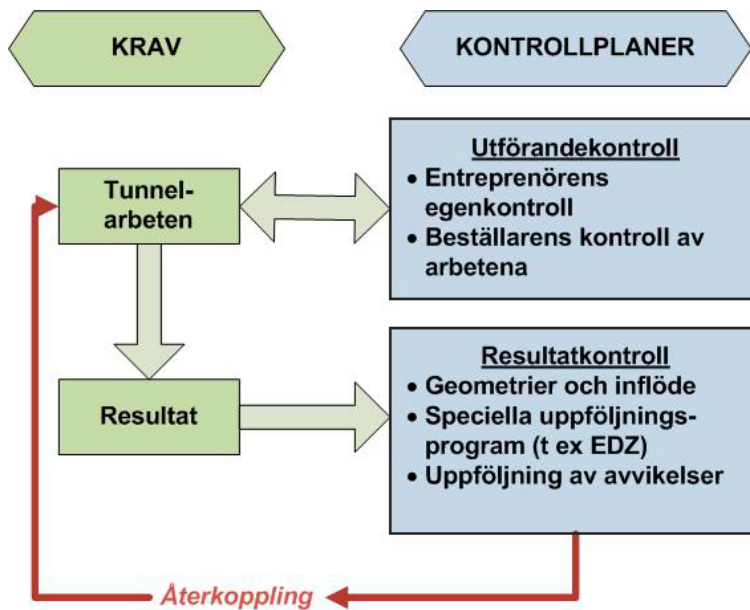
Observationsmetoden tillämpas när förhållandena är osäkra, eller när den geotekniska risken är stor. Det finns en stor kunskap om bergförhållandena i Äspö, och erfarenhet att bygga säkert i berg där. Den enda osäkerheten som detta projekt identifierade för utbyggnadsprojektet relaterade till förekomst av vatten och att uppfylla ställda krav på att bibehålla ett så högt grundvattentryck som möjligt. Det föreslogs därför att observationsmetoden endast tillämpas på injektering. Äspölaboratoriets Hydro Monitoring System (HMS) möjliggjorde ett unikt tillfälle att använda kvalificerad monitoring av grundvattentrycknivåer liknande det system som finns i Forsmark, för att avse prova möjligheten att använda detta system som observationsobjekt, parallellt med inflöden.

Projekt RESKONTR:s mål är att definiera och utveckla krav, strategier och metoder som behövs för projektering, upphandling av bergentreprenader och uppförande av slutförvarsanläggningen avseende bergschakt, till den omfattning som behövs för att planera och styra bergschakt vid uppförandet av Kärnbränsleförvaret, samt för att verifiera initialtillståndet avseende utbredning av sprängskadepåverkan (EDZ).

Projekt RESKONTR hade önskemål om att effektiviseringar skulle inarbetas i utbyggnadsprojektets planering för att skapa en industrialiserad tunneldrivningsprocess. Dessa effektiviseringar var:

- Användande av emulsionssprängämne.
- Ge möjlighet till att göra resultatkontroll av skadepåverkanens omfattning (EDZ), samt testa och verifiera undersökningsmetoder och strategier för detta.
- Rationella beslut avseende injekteringsstrategi som baseras på enkla beslutsmodeller och koncept enligt Real Time Grout Control för att få så korta injekteringstider som möjligt, men med erforderlig täthet.

Ambitionen från projekt RESKONTR var att slutresultatet från utbyggnadsprojektet skulle bidra till uppfyllelse av verifiering av initialtillstånd avseende byggets påverkan på berget. Detta genom att tydliggöra hur krav omsätts i specifikationer för arbetet och kontrollplaner av dessa, samt hur utförande- och resultatkontroller används i en process för ständiga förbättringar, se figur 2-1.



**Figur 2-1.** Projekt RESKONTR:s vision för kvalitetssäkrat arbetssätt med förutsättning till löpande återkoppling till tunneldrivning.

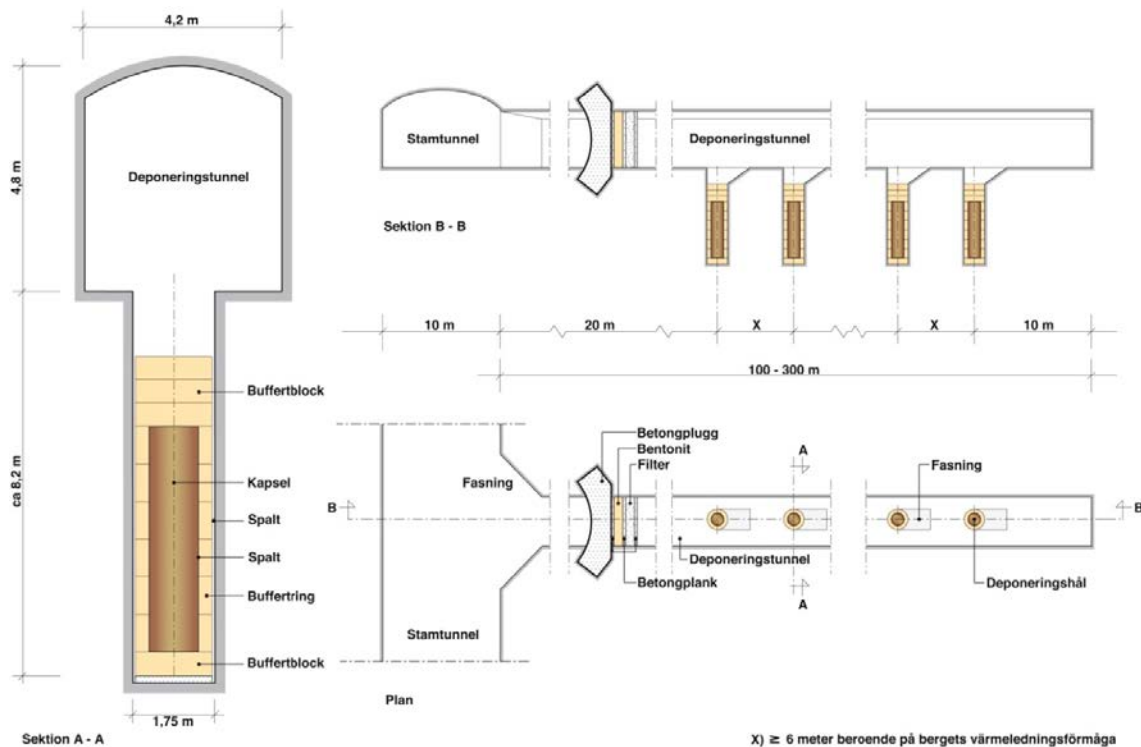
### 2.2.3 Kärnbränsleförvarets krav på deponeringstunnlar

Långsiktig säkerhet i ett slutförvar ställer krav på den utsprängda och återfyllda tunneln. Dessa krav är formulerade i konstruktionsförutsättningar för att utforma, dimensionera och bygga anläggningen. Kraven på den utsprängda och återfyllda tunneln avser den storskaliga hydrauliska konduktiviteten som en deponeringstunnel ska uppnå genom att återfylla tunnarna samt minimera utbredningen av den från sprängningen skadade zonen i kvarstående berg. Referensmetoderna för utbyggnad ska resultera i bergutrymmen som överensstämmer med konstruktionsförutsättningarna för EDZ (Excavated Damaged Zone), geometri och inflöde. Referensmetoden för bergschakt av deponeringstunnlar är skonsam sprängning. Erfarenheter visar att förutsatt att lämplig styrning av borr-, ladd- och sprängförfarandet tillämpas så kan tunnlar med godtagbar EDZ och geometri byggas (Olsson et al. 2009, Ericsson et al. 2009, Karlzén och Johansson 2010). Referensmetoden för att täta deponeringstunnlar är injektering framför tunnelfronten, dvs förinjektering med låg-pH injekteringsmedel (Funehag och Emmelin 2011).

Återfyllning av deponeringstunnlarna i Kärnbränsleförvaret avses göras med bentonit med en viss densitet per m<sup>3</sup> tunnel, för att hindra eventuella läckagevägar i tunneln. Återfyllnaden har också uppgiften att fungera som ett mothåll för bufferten och kapseln i deponeringshålet. Återfyllnaden sker med bentonitblock som staplas och de tomrum som uppstår mellan block och berg fylls med bentonitpellets, (figur 2-2). Fyllningen med pellets uppnår dock inte den densitet som block har och därav behöver uttag av berg utanför teoretisk tunnelkontur (överberg) minimeras. Samtidigt är berg innanför teoretisk tunnelkontur (underberg) inte önskvärt, då detta försämrar det praktiska arbetet med att installera pellets mellan bentonitblock och bergkontur.

Återfyllnaden och risken för läckagevägar ställer stora krav på konturens geometri, begränsad skadezon i konturen samt tätheten i berget (SKB 2010b). Målsättningen var att med detaljkrav och uppföljningar genom kontrollprogram kunna nå konstruktionsförutsättningarna från Kärnbränsleförvaret:

- Tillåten bergvolym utanför teoretisk kontur fick inte överstiga 30 volym-% per salva ("överberg").
- Ingen tillåten bergvolym innanför teoretisk kontur ("underberg").
- Sprängskador skulle begränsas och får inte leda till en sammanhängande effektiv transmissivitet, utefter en betydande del (minst 20–30 m) av deponeringstunneln och medelvärdesbildat över tunnelsulan, som är högre än 10<sup>-8</sup> m<sup>2</sup>/s.



**Figur 2-2.** Tvärsnitt av deponeringstunnel och topp av deponeringshål med kapsel (SKB 2010c).

Utifrån långsiktig säkerhet finns ett starkt uttryckt önskemål att använda ett injekteringsmedel vars lakvatten har pH lägre än 11. Lågt pH är önskvärt eftersom bentoniten i buffert och återfyllning annars riskerar att få försämrade svällförmåga (Alexander et al. 2013, Gaucher och Blanc 2006). Vanligt cementbaserat injekteringsbruk genererar ett lakvatten med pH 13-14. Ett cementbaserat injekteringsbruk penetrerar endast sprickor ner till 50  $\mu\text{m}$ , SKB har tillsammans med Posiva utvecklat ett cementbaserat bruk med lågt pH för de större sprickor som behöver tätas (Bodén och Sievänen 2005). SKB har även genomfört studier av silica sol (Funehag och Emmelin 2011), som är ett medel som klarar att tränga in i fina sprickor under 50  $\mu\text{m}$  och vars lakvatten även har pH lägre än 11.

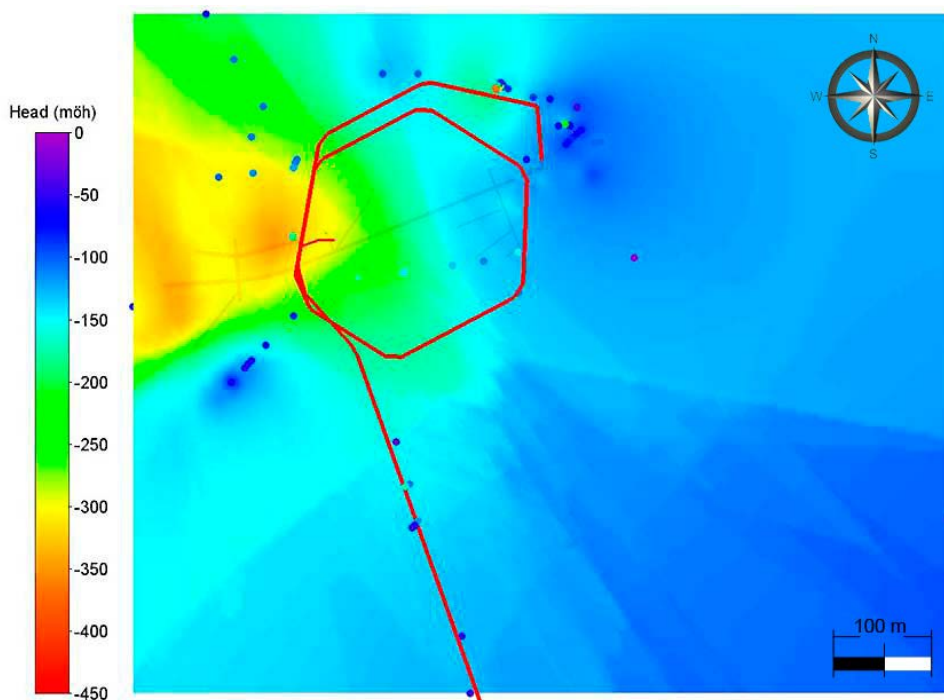
### 2.3 Geovetenskapliga förhållanden

Ett inledande arbete hade utförts för att identifiera en potentiellt passande bergvolym för experimentområdet som uppfyllde projektets krav på ett så högt grundvattentryck som möjligt.

Den potentiellt intressanta bergvolymen visades sig ligga i de nordöstra delarna av anläggningen på nivån -420 m.ö.h. Huvudargumenten för valet av detta område var:

- Potentiellt relativt höga grundvattentryck.
- Potentiellt icke-störande av de mest aktiva experimentområdena.
- Tunneln skulle inte behöva gå igenom större kända deformationszoner.
- Logistiskt fördelaktigt för transporter av maskiner och utrustningar, då den nedre delen från -430 m.ö.h. till -450 m.ö.h. av Äspölaboratoriet har drivits genom TBM.

Grunden för bedömningen av grundvattentryck utgjordes av data insamlade med Äspölaboratoriets monitoringsystem Hydro Monitoring System (HMS). Efter många års avtagande inflöden till tunneln har flödet på senare tid nått ett stabilt läge och en situationsbild har sammanställts som visar uppskattade tryck på -420 m nivån över hela anläggningen, se figur 2-3. Störst avsänkning ses i laboratoriets västliga och nordvästliga volymer (avsänkning ca 300 m), i närheten av schakten samt där experimenten är som mest aktiva. Högre tryck föreligger i de östliga volymerna.



**Figur 2-3.** Grundvattnets tryckhöjd (Head) runt Äspölaboratoriet på nivån  $-420$  m.ö.h. De högsta tryckhöjderna (blå färg) ses nordöst om tunnelspiralen. De lägsta tryckhöjderna som motsvarar området med störst avsänkning ses väster om spiralen (orange färg).

Det uppskattas att grundvattentrycken i den intressanta bergvolymen bör ligga på ca  $-60$  till  $-80$  m.ö.h. vilket motsvarar ca  $3\,500$  kPa. Grundvattentrycken inom spiralen förväntas vara lägre än utanför spiralen (figur 2-3). Det överliggande berget agerar som ett lock som innesluter grundvattentrycket och borrningen utgör en punktering av grundvattenmagasinet. Tryckhöjd är den nivå som vattnet i borrhålet stiger till pga. grundvattentrycket i magasinet. Nivån anges enligt lantmäteriets höjdsystem RHB70 där nollnivån motsvarar "medelvärde" av havsytans nivå, t ex en tryckhöjd =  $-50$  m innebär  $50$  m under havsytanivån. Detta innebär att  $-50$  m är en högre tryckhöjd än  $-100$  m.

En inledande förståelse för de geovetenskapliga förhållandena åstadkoms baserad på existerande geovetenskaplig information som samlades in och sammanställdes i form av en modell M0 som beskrivs i detta avsnitt. (För vidare beskrivning av metod för geovetenskaplig modellering se avsnitt 3.1.5.) Modell M0 baserades på data från geologisk karteringen av tunneln runt  $-420$  m nivån samt geologisk enhålstolkning (SHI) av KA2050A som är ett borrhål som sträcker sig en bit ut i den aktuella bergvolymen (figur 2-4), samt GeoMod-modellen (Berglund et al. 2003).

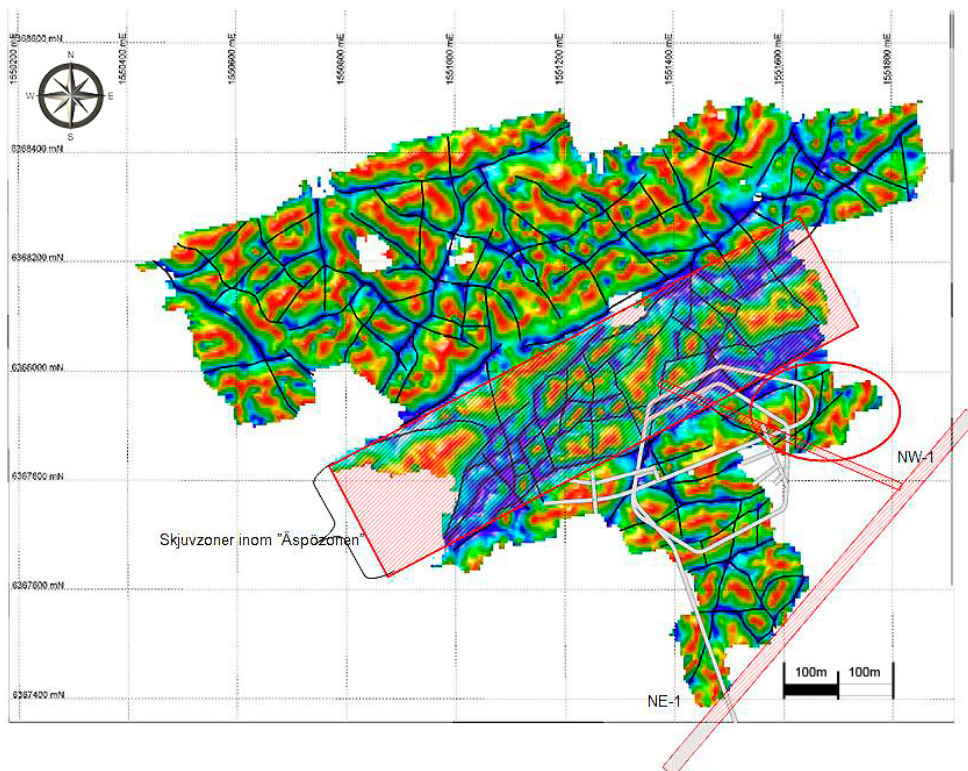
Prediktion av mindre deformationszoner (MDZ) är svårt att utföra beroende på bristen på data i den tilltänkta volymen. De flesta större deformationszoner som påverkat berggrunden på Äspö är branta och stryker i nordost-sydväst, medan de hydrauliskt dominerande sprickorna är branta och stryker i nordväst-sydost. Enligt GeoMod (Berglund et al. 2003) förekommer dock sprickor i de flesta riktningar och andra framträdande riktningar är brant stupande sprickor i nord-syd, brant stupande i nordost-sydväst samt flacka sprickor. I den markmagnetiska anomalikartan, baserat på omprocessering av detaljerade markmagnetiska mätningar genomförda inom ramen av Äspö Site Description Model (SDM) (Matsson 2011), framträder några lågmagnetiska lineament med ungefärlig nord-sydlig och nordostlig-sydvästlig orientering inom den tilltänkta utbyggnadsvolymen (figur 2-5). Två av dessa lineament borde ha påträffats i tunneln om de motsvarar deformationszoner med ett djupgående på  $-400$ – $500$  m. Så är dock inte fallet vilket innebär att lineamenten antingen inte motsvarar deformationszoner eller att de inte har ett så stort djupgående. Det lågmagnetiska, blå bältet i nordostlig-sydvästlig utsträckning genom Äspö markerar Äspö skjuvzonssystem (Wahlgren et al. 2008).

Inga större deformationszoner förväntades förekomma centralt i den planerade bergvolymen. Bergvolymen förväntades domineras av i första hand Ävrögranodiorit. Underordnade bergarter bedömdes i första hand utgöras av finkornig granit och gabbroid-dioritoid. Även inslag av Äspödiorit var att förvänta då Äspödioriten, baserat på både yt- och underjordskarteringar, volymmässigt utgör den dominerande bergarten på Äspö.





**Figur 2-4.** Kärnbränsleförvaret KA2050A i förhållande till planerad utbyggnadsvolym. De olika färgerna längs bränsleförvaret representerar de tre manschetterade sektionerna: sektion 6–101 m (röd), sektion 101–154 m (blå) respektive sektion 154–211 m (grön).



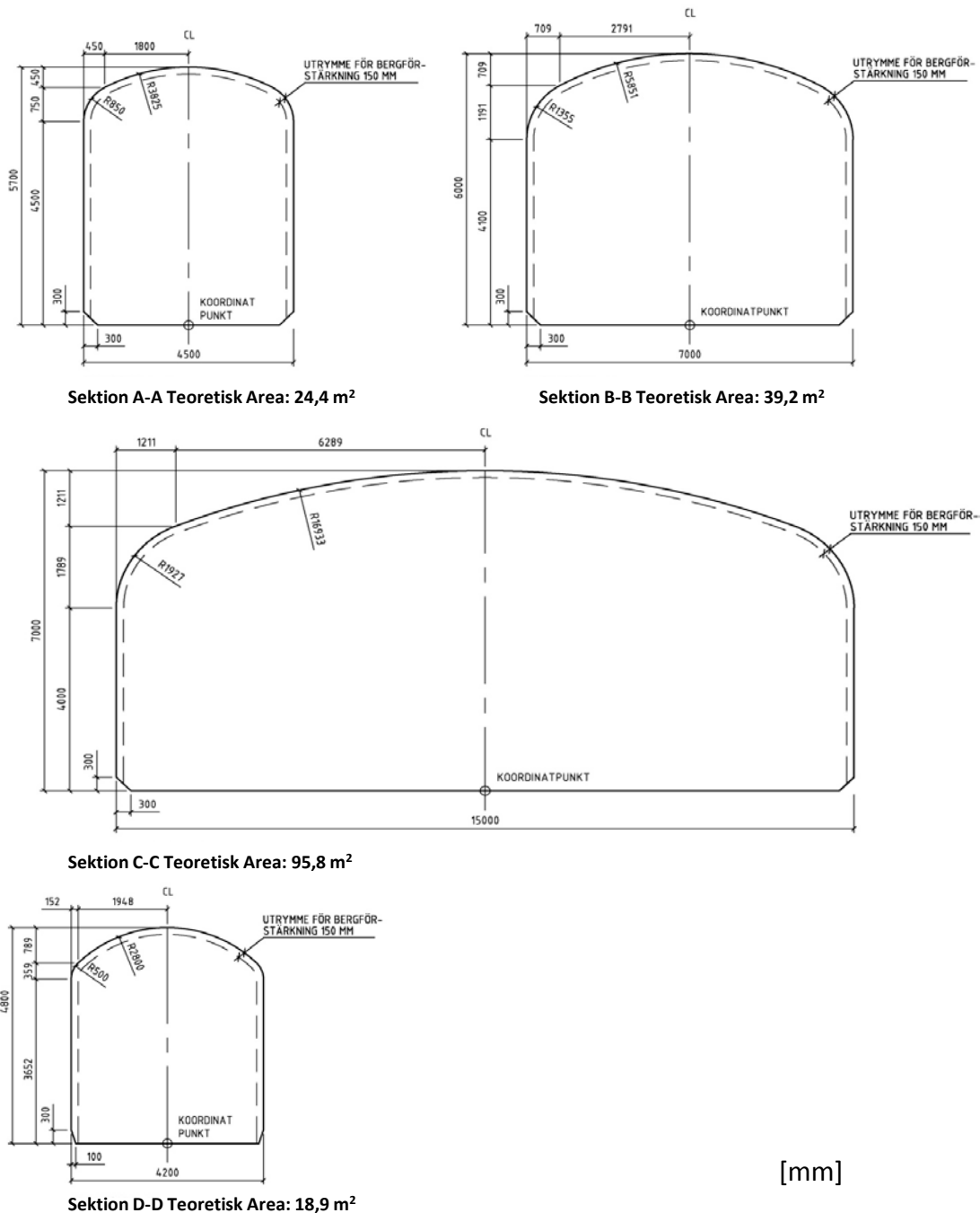
**Figur 2-5.** Det magnetiska totalfältet över Äspö baserat på detaljerade markmagnetiska mätningar genomförda 1989 och omprocesserade data under 2010 (Mattson 2011). Blått är lågmagnetiskt område och rött är högmagnetiskt område. Inringat område är planerad utbyggnadsvolym.

## 2.4 Utbyggnadsprojektets omfattning

Utifrån intressenternas huvudsakliga behov som identifierades i beredningen av projektet planerades tre transporttunnlar och nio experimenttunnlar drivna, för tvärsnittsarea för tunnel samt planerad tunnellängd se tabell 2-1 och figur 2-6. Kraven på utformning av utrymmena hämtades från kravspecifikationerna för de aktuella intressenterna. För de så kallade transporttunnlarna styrdes geometrin utifrån referensutformningen för Kärnbränsleförvaret (SKB 2010c). Figur 2-7 visar det planerade arbetsområdet för utbyggnaden av Äspölaboratoriet.

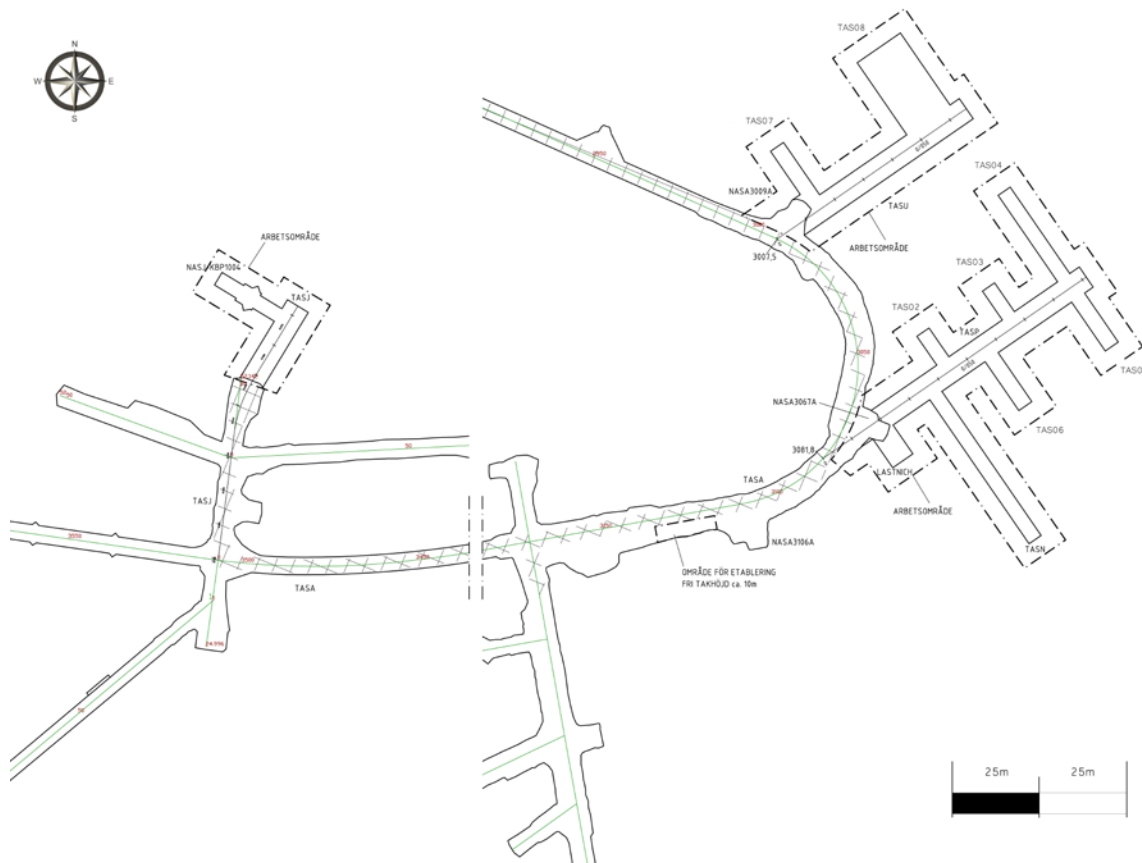
**Tabell 2-1. Intressent, tunnelnamn och tunnellängd.**

Intressent	Tunnelnamn	Tunnel	Antal	Tunneltvårsnitt enligt figur 2-6	Längd (m)
Äspölaboratoriet	TASU, TASP, TASJ	Transporttunnel	3	B-B	50, 100, 25
KBS-3H	TAS08	Experimenttunnel	1	C-C	25
Valvpluggsprojektet (KBP1004)	TAS01	Experimenttunnel	1	D-D	20
Concrete and Clay	TAS05, TAS06	Experimenttunnel	2	A-A	12,5, 12,5
SKB International	TASN, TAS04, TAS02, TAS03	Experimenttunnel	4	D-D	50, 30, 10, 10
Detum-1	TAS07	Experimenttunnel	1	D-D	8



**Figur 2-6.** Tunneltvårsnitt för transporttunnlar (sektion B-B) och experimenttunnlar (sektion A-A, C-C och D-D).





Figur 2-7. Planerat arbetsområde för utbyggnaden av Äspölaboratoriet.

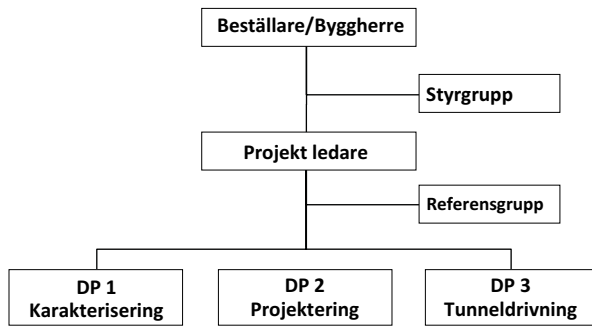
## 2.5 Projektorganisationen

### 2.5.1 Projekt

Projektet delades upp i tre delprojekt utifrån projektmål nr 2, se avsnitt 2.1.2, och kraven enligt avsnitt 2.2.1 och 2.2.2. I figur 2-8 presenteras projektorganisationen.

- Delprojekt Karakterisering ansvarade för projektmål 2a; att inför byggstart av Kärnbränsleförvaret inleda förberedelser med avseende på test och vidareutveckling av metoder och teknik i form av detaljundersökningar och dokumentation av rådande förhållanden i berget.
- Delprojekt Projektering ansvarade för projektmål 2b; att inför byggstart av Kärnbränsleförvaret inleda förberedelser med avseende på test och vidareutveckling av metoder och teknik i form av projektering och upphandling av bergentreprenader.
- Delprojekt Tunnelldrivning ansvarade för projektmål 2c; att inför byggstart av Kärnbränsleförvaret inleda förberedelser med avseende på test och vidareutveckling av metoder och teknik i form av byggande i berg inklusive uppföljning och styrning av bergentreprenader.

Gränsytorerna mellan delprojekten var ej strikta då mycket arbete utfördes integrerat mellan delprojekten. Exempelvis arbetade delprojekt tunnelldrivning och delprojekt projektering tätt samman under upphandlingen av bergentreprenaden. Delprojekt projektering jobbade som kravställande även tätt samman med undersökningsgruppen i delprojekt karakterisering vid fastläggning av experimentplatserna. Undersökningsgruppen i delprojekt karakteriserings bestod av geolog, hydrogeolog, hydrogeokemist och geofysiker. I delprojekt tunnelldrivnings organisation fanns byggleddning och aktivitetsledare för injektering samt entreprenörens organisation. En aktivitetsledare leder och kontrollerar en aktivitets genomförande, samt kontrollerar producerade resultat och ansvarar för att dessa arkiveras inom SKB.



Figur 2-8. Projektorganisation.

## 2.5.2 Stygrupp

Styrgruppen bestod av personer som har kompetens och erfarenheter inom för projektet relevanta ämnes- och verksamhetsområden. Styrgruppsmedlemmarna var dels intressenter till projektet vilka genom sitt deltagande fick möjlighet att direkt påverka styrningen av projektet mot de uppställda projektmålen, dels representanter för bergbyggnadsbranschen samt från Äspölaboratoriets driftorganisation (TDD). Denna gruppssammansättning gav bra förutsättningar för att projektets innehåll och inriktning kunde nå många delar i företaget och inom bergforskning. Projektets beställare var ordförande och beslutsfattare i styrgruppen. Projektledaren var föredragande vid styrgruppsmöten.

Beställarens förväntningar på styrgruppens medlemmar var att de ämnade:

- ge råd, stöd och rekommendationer till beställaren och projektledaren,
- medverka vid förankring av beslut i linjeorganisationen,
- aktivt stödja projektet och projektledaren vid resurskonflikter,
- följa upp projektarbetet tillsammans med beställare och att stödja vid implementering effektiv hemtagning (säkerställa långsiktig nytta) och erfarenhetsåterföring.

## 2.5.3 Referensgrupp

Projektet har haft en gemensam referensgrupp som har bestått av SKB-representanter från teknikutveckling berg, samt konsulter med teknisk kompetens inom tunneldrivning, injektering och observationsmetoden. Referensgruppen har inte haft en beslutande funktion utan har utgjort stöd och fungerat som rådgivare till projektmedlemmarna. Vid referensgruppsmötena har projektledare och delprojektledare varit ordinarie medlemmar, ibland med stöd av medlemmar från respektive delprojekt vid specifika redovisningar till referensgruppen.

## 2.6 Befintlig anläggning Äspölaboratoriet

Äspölaboratoriet är en anläggning som är öppen för allmänheten och tar emot tusentals besökare per år samtidigt som ett flertal experiment utför verksamhet i anläggningen. Detta medför att tunneldrivningen behövde samordnas dagligen med övrig verksamhet och anpassas till krav som är satta efter den dagliga verksamheten. Det finns två utrymningsvägar under jord; huvudtunneln TASA och hisschaktet. Dessa måste hållas fria och får inte blockeras. Om någon av dessa utrymningsvägar är blockerade så medges inte arbete i tunneln. Detsamma gäller om telefonin ligger nere i tunneln. Vid sprängning av en salva på Äspölaboratoriet, medför detta att hela anläggningen under jord utryms då spränggaser ventileras bort via huvudtunneln TASA, den ena flyktvägen. Detta ledde till att skjuttider samordnades med anläggningens behov. Driftorganisationen samt övrig verksamhet hade önskemål om att skjuttiden förlades på eftermiddagen i samband med att ordinarie arbetstid avslutats. Totalt 60 personer får vistas under jord samtidigt. Vid nedfart till tunneln tilldelas en vistelsetid på tre timmar. Samtliga under jord ansvarar för att tilldelad tid inte överskrids. Personal som har för avsikt att vara i tunneln längre än tilldelad vistelsetid ska i god tid ringa Äspölaboratoriets reception eller bevakning på Clab (Centralt mellanlager för använt kärnbränsle) för att förlänga denna vistelsetid. Detta gällde även för entreprenören och påverkade inte utförandet, då tiden kunde förlängas under hela arbetspasset.

Äspölaboratoriet har en befintlig infrastruktur för el, vatten, belysning, ventilation och ett system för bergdränage. En driftorganisation finns på plats under ordinarie arbetstid och stödde projektet med styrning av brandlarm, ventilation etc. Efter ordinarie arbetstid finns en beredskapstelefon dit det går att ringa för att få stöd och hjälp, dock tillkommer då en inställelsetid som medför att stillestånd kan uppstå i tunneldrivningen då entreprenören arbetar utanför ordinarie arbetstid. I driftorganisationen finns en bergrumsansvarig som stöttat projektet i beslut om förstärkningsarbetets omfattning. Projektets arbetsmiljöarbete kunde också samordnas med anläggningens arbetsmiljöarbete genom gemensamma skyddsronder. Efter att tunneldrivningen var klar utförde Äspölaboratoriets driftorganisation alla installationsarbeten i de nya tunnlarna.

Äspölaboratoriet har en rutin för hantering av aktiviteter som styr initiering, planering, uppföljning och arkivering av aktivitetens dokumentation och resultat. Syftet med aktivitetshanteringen är att förbättra styrningen av projekten via nedbrytning av projektets omfattning i mer hanterbara delar i aktivitetsplaner.

## 3 Metoder

### 3.1 Karakterisering och geovetenskaplig modellering

Detaljundersökning inom ramen för projektet gjordes i flera steg och med ett antal olika syften. Undersökningar av berget genomfördes i tre huvudsakliga steg; a) förundersökningar, b) undersökningar i pilotborrhål och c) undersökningar/dokumentation i samband med tunneldrivning. Efter varje steg uppdaterades de geovetenskapliga modellerna i varierande omfattning och med olika syften.

Syften med geovetenskaplig modellering var:

- 1) Modellering för upprättande av geovetenskapliga prognoser över vatteninflöden, deformations-zoners/större sprickors läge och geometri som kommer att påträffas vid respektive tunnels framdrift, samt hur bergvolymen kommer att påverkas vad gäller grundvattenavsänkning m m.
- 2) Geologiska och hydrogeologiska modeller för uppdatering av bergvolymen som omfattar utbyggnadsområdet.

Utbyggnadsområdets lämplighet undersöktes genom kärnborrning av fyra kärnborrhål med borrhålsdiameter 76 mm, samt geologiska, geofysiska, hydrogeologiska och hydrogeokemiska undersökningar i dessa.

#### 3.1.1 Kärnborrning

Borriggen för kärnborrningen var en Onram 1000. Kärnborrningen utfördes med triple-tube med wireline system av typen CORAC N3/50 (3 m innerrör och 50 mm borrhålskärna). Detta är särskilt framtaget för minsta möjliga påverkan av borrhålskärna. Detta innebär bl a att kärnfångarskallen är designad så att det blir vattenstopp om inte kärnan utan motstånd glider in i kärnröret. Vid t ex en kilformad spricka så låser den kärnan i kärnröret och borringen måste avbrytas och kärnröret tömmas.

Borrning för foderrör (Ø 100/80 mm) utförs med Ø116 mm kärnrör av typ T6 eftersom en smal injekteringspalt eftersträvas. Typ T6 är ett dubbelt kärnrör där det inre röret inte roterar under borring och där vattenspolningen till borrhålskronan leds mellan det inre och yttre röret. Därmed skyddas borrhålskärnan från rotationsskador och vattenspolning. Borrningen fortsätter till beslutad borrhålslängd (ca 10 cm längre än foderrörets tänkta placering). För att ha möjlighet att stänga borrhålet och kunna utföra hydrauliska tester installeras ett ventilpaket. Ventilpaketet som användes vid borring av förundersökningshålen hade tagits fram vid kärnborrning i projektet Fintätning av tunnel på stort djup (SU32516, Fintättningsprojektet), se figur 3-1.

Vid borringen av förundersökningshålen var ventilpaketet för långt vilket medförde vibrationer i dessa under borring. Vidare hade sidoutkastet på ventilpaketet för liten dimension vilket innebar en strypning tillsammans med slangar och flödesgivarna. Erfarenheterna från SFR var att ventilpaketet behövde vara så kort som möjligt, därför modifierades ventilpaketet inför borringarna av pilotborrhålen, se figur 3-2.

Som spolvatten för borringen användes inledningsvis formationsvatten. Detta ändrades senare till kranvatten. Uranin doserades i spolvattnet med en koncentration av 0,2 mg/l. Kontrollprov på spolvatten för bestämning av uraninhalten togs i början på varje skift samt då ett annat vattenprov togs. Eftersom uranin är ljuskänsligt var tanken för uranin övertäckt. Kontrollen av uraninhalten i spolvattnet är mycket viktigt för att kunna tolka hydrogeokemidata och de ingående parametrarnas koncentration.



**Figur 3-1.** Ventilpaket som tagits fram vid kärnborrning i projektet Fintätning av tunnel på stort djup (SU32516), som användes vid borrning av de två förundersökningshål.



**Figur 3-2.** Rostfritt foderrör  $\varnothing$  100/80 mm, längd 3 000 mm. På rörets vänstra ände är en förankringsbalk, T-rör och fläns monterad. På flänsen monteras den bultförsedda avledaren under borrning och mätning. På foderrörets högra del syns svarvade spår; till för att få ökad infästning i cementen.

### 3.1.2 Injektering av kärnborrhål

Injektering av kärnborrhål var bestämd att tillämpas vid vatteninflöden över 100 l/min. Begränsning på vatteninflöde 100 l/min gäller främst för införsel av undersökningsutrustning, speciellt för radarutrustning men även utrustning för hydrologiska tester. Både manöverstänger/rör och rigg måste vara dimensionerade för aktuella krafter. Syftet med injekteringen av kärnborrhål var också att minska vatteninflödet till en nivå där det inte stör borrararbetet. Mer preciserat är att ett inflöde på ca 150 l/min medför att kax dras in i rörsträngen och förhindrar hämtning av kärnfångarrör med wireline-teknik. Rörsträngen får då hanteras för hand för att hämta kärnfångarröret. Tidigare erfarenhet av övre gräns för införsel av radarutrustning i Äspölaboratoriets borrhål under jord var 50 l/min (Almén och Stenberg 2005).

Injekteringsmanschett som användes för injektering och hålfyllnad av kärnborrhål var en Van Ruth injekteringsmanschett, se figur 3-3. Injekteringen utfördes med Atlas Copco Unigrout, EH22-200-140AWBSS se även avsnitt 3.5.1. Injekteringsbruket var cement av typ Uttrafin16 som färgsattes rött med Pieri Kaolor PP200 för att underlätta identifiering på borrhålsväggen. Tre kaliberringar användes sedan för att fräsa bort cement i kärnborrhålet efter utförd injektering. De hårdmetallsatta kaliberringarna ligger inom någon tiondels millimeter i diameter och håller samma diameter över hela hållängden.

Van Ruth® SSGP  
injekteringsmanschett



Van Ruth®SS CWBP  
bottenmanschett



**Figur 3-3.** Van Ruth® injekteringsmanschett (SSGP) samt Van Ruth® bottenmanschett (SS CWBP) (<http://www.vanruth.com/downloads.htm>).

### 3.1.3 Undersökningar i kärnborrhål

Nedan listas vilka undersökningar som genomfördes i kärnborrhålen:

- Kontinuerlig registrering av spolvattenflöde in och vatten ut, manuell registrering av borrhålets läge, registrering av borrhålets samt registrering med DMS-logger.
- Tryckkuppbyggnadstest.
- Hydrogeokemisk provtagning klass 3 och 5.
- Översiktsskartering av borrhålets kärna.
- Kärnskartering Boremap baserade på BIPS.
- Krökningsmätning med Maxibor och Flexit Multismart.
- BIPS och borrhålsradar (20 MHz samt radar riktantenn).
- Geofysisk loggning.
- Flödesloggning med Posiva Flow Log (PFL).
- Injektionstester, HWIC (High pressure Water Injection Control).
- Respons- och interferenstester.
- Geologisk enhålstolkning (SHI).
- Förenklad geologisk enhålstolkning (SHI-light).

#### **Mätning av vatteninflöden under borrhåll**

Flödesloggning under borrhåll av kärnborrhål ger ett snabbt underlag för läge av inflödande partier av ett borrhål. Resultat från flödesloggning är styrande för fortsatta insatser t ex vid bedömning om injektering behövs av en del av borrhålet. Loggningen har utförts med två olika system; manuellt samt med Drilling Monitoring System (DMS). Den manuella flödesloggningen gjordes var tredje meter, vid varje kärnupptag. Det är ett enkelt och robust system för att fånga de mest vattenflödande partierna. Med ett DMS-system blir inflödesströskeln lägre, längdupplösningen blir mycket hög och DMS-data kan kopplas till tryckresponser och därmed utgöra ett underlag för den geovetenskapliga modelleringen av deformationszoner/sprickor.



### Krökningsmätning med Maxibor och Flexit Multismart

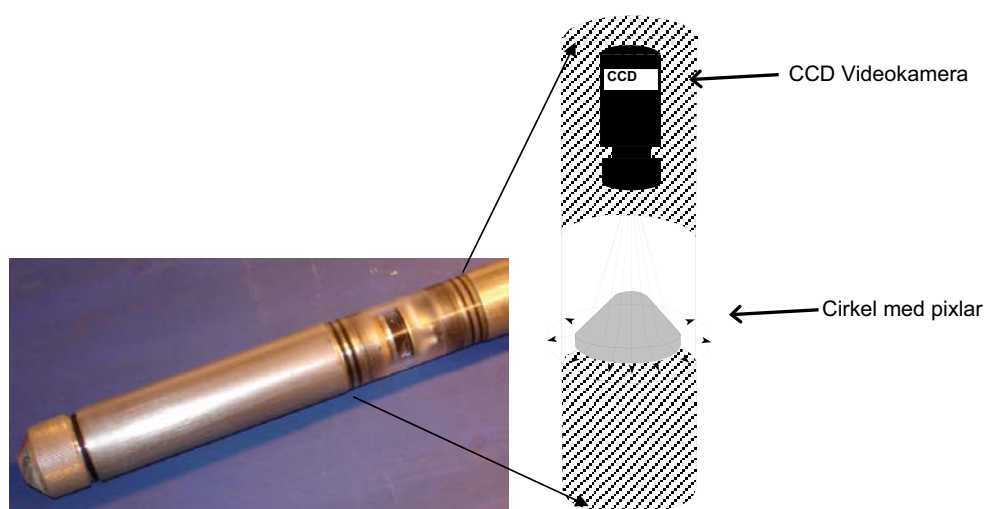
Krökningsmätning med Maxibor och Flexit Multismart används för att bestämma ett borrhåls geometri i rummet, dvs x-, y- och z koordinater för punkter längs borrhålet. Krökningsmätning utfördes var tredje meter såväl på nervägen som på uppvägen i borrhålet. Maxibor är ett optiskt instrument och Flexit Multismart består av 3-komponent magnetometrar och 3-komponent accelerometrar. Mätningar genomförs genom att föra ner mätsonden med hjälp av borrhagens stänger eller med hjälp av wireline-teknik.

### BIPS

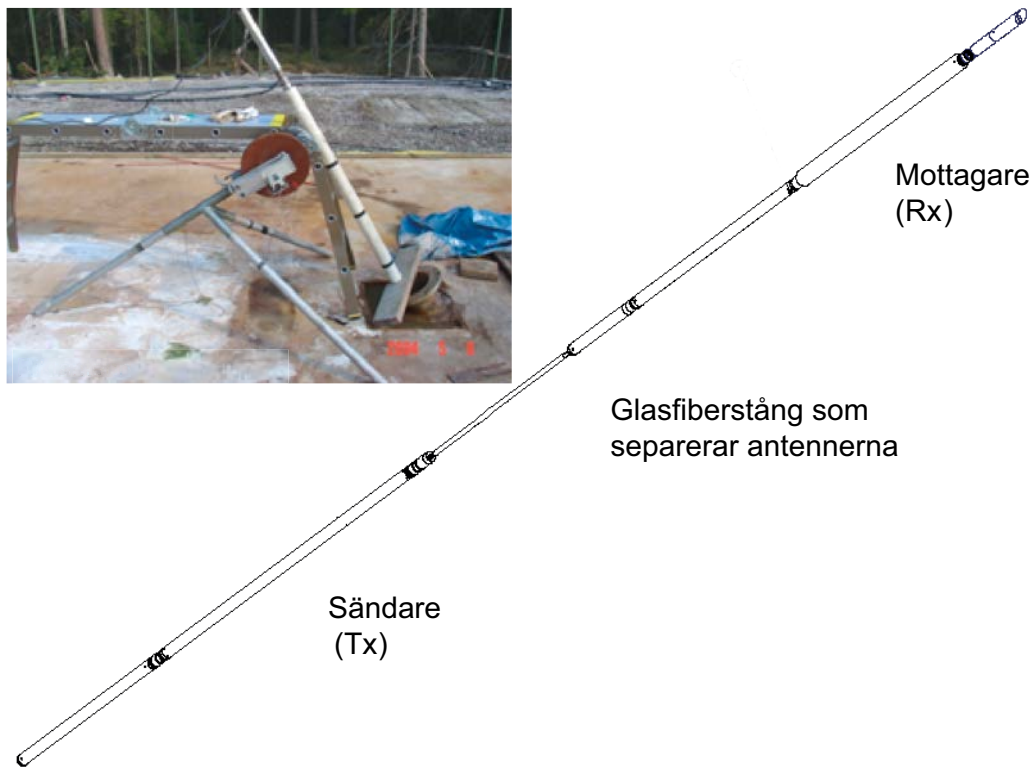
BIPS 1500-systemet ägs av SKB och producerar en digital skanning av borrhålsväggen med en CCD videokamera som är installerad framför en konisk spegel (figur 3-4). En bild av borrhålsväggen speglas på konen. Under mätning registreras 360 pixlar per cirkelvarv och mätning genomförs med 1 mm vertikal upplösning. I lutande borrhål orienteras kameran med en gravitativ sensor och i vertikala borrhål orienteras kameran med en kompass. BIPS skapar en digital, kontinuerlig och orienterad 360 graders färgbild av borrhålsväggen, som används vid Boremapkartering och efterföljande geologisk enhålstolkning.

### Radar

RAMAC GPR-systemet ägs av SKB och är ett digitalt system där vikten har lagts på ett snabbt och lätthanterligt system i fält. Radarsystemet för borrhål består av en sändarantenn och en mottagarantenn, se figur 3-5. Borrhålsradar är en metod för att lokalisera och orientera strukturer i berggrunden såsom sprickor, sprickzoner, krosszoner och bergartskontakter som penetreras av borrhålet eller som förekommer i borrhålets omgivning. Två typer av borrhålssonder används, dipol respektive riktantenn. Dipolantennerna ger information om reflektorer i och runt borrhålet, deras utsträckning utanför borrhålet, vinkel mellan borrhålsaxel och reflektor (skärningsvinkeln) samt borrhåls-längd vid vilken reflektorn skärs. Därtill ger riktantennen information om riktningen till reflektorn och därmed möjlighet att tolka reflektorns absoluta orientering (strykning och stupning) i rummet. Vid loggning med borrhålsradar skickas en elektromagnetisk puls från en sändare ut i omgivande berg. För dipolantennen används en frekvens på 20 MHz och för riktantennen används en frekvens på 60MHz. Strukturer med avvikande elektriska egenskaper fungerar som reflektorer för de utsända radarvågorna. Reflektade radarvågor registreras av mottagaren och skickas via den fiberoptiska kabeln till en fältdator där varje mätpunkt lagras. Resultatet ritas upp i en radarbild (radargram) där den ena axeln visar borrhåls-längd och den andra axeln visar reflektorns avstånd från borrhålet.



Figur 3-4. BIPS-systemet, skanning med hjälp av konisk spegel.



*Figur 3-5. Exempel på radarantennerna för borrhål.*

### **Kärnkartering Boremap**

Boremapkartering är en metod för geologisk kartläggning av kärn- och hammarborrhål. Först genomförs en översiktskartering av kärnborrhålet enbart baserat på borrhälskärnan, därefter genomförs en full boremapkartering med karteringsunderlaget av borrhälskärnan och bilder från TV loggning med BIPS. Från borrhälskärnan erhålls bergartsinformation och sprickegenskaper. Baserat på BIPS-bilderna bestäms orientering av bergartsgränser, sprickor och andra strukturer.

Boremapkarteringen kan utföras innan geofysiska resultat finns tillgängliga, under förutsättning att kontroll och eventuell komplettering senare görs mot geofysik medan borrhälskärnan fortfarande finns på karteringsbordet. Det är synnerligen viktigt att karterade sprickors orienteringar blir rätt beräknade. För att detta ska uppnås är det viktigt att kontrollera att rätt krökdatafil använts innan leverans av Boremapdata sker.

### **Geologisk enhålstolkning (SHI)**

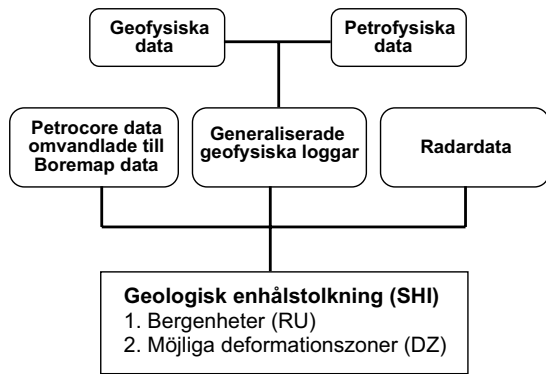
Underlaget för geologisk enhålstolkning (SHI) är:

- Detaljerad geologisk kartering (Boremap).
- Geofysiska borrhålsundersökningar.
- Hydrogeologiska borrhålsundersökningar.

Den geologiska enhålstolkningen utfördes av en grupp geovetare bestående av geologer, geofysiker och hydrogeologer. Arbetsproceduren beskrivs i figur 3-6.

Först studeras data som beskriver bergartsenheter. Dessa data jämförs med en visuell inspektion av borrhälskärnan. Sektioner med gemensam karaktär på bergartstypen slås ihop till enheter (> 5 m). En beskrivning läggs in i vardera bergarten som visualiseras i WellCad. Även effekter på bergarter som påverkas av omvandling i och omkring deformationszoner beskrivs. Konfidensintervall för bestämning av bergartsenheter ansätts enligt följande: 3 = hög, 2 = medium and 1 = låg.





**Figur 3-6.** Beskrivning av arbetsproceduren vid en geologisk enhålstolkning.

Därefter studeras möjliga deformationszoner genom att titta på underlag från geologisk kartering (sprickfrekvens, sprickmineral, apertur (sprickvidd), omvandling, etc.) tillsammans med resultat från geofysisk loggning och radardata. Dessa data jämförs med en visuell inspektion av borrhärnan. Sektioner med möjliga deformationszoner avgränsas längs med borrhålet och presenteras i WellCad med en beskrivning av de möjliga deformationszonerna. Konfidensintervall för bestämning av möjliga deformationszoner ansätts enligt följande: 3 = hög, 2 = medium and 1 = låg.

### **Förenklad geologisk enhålstolkning (SHI-light)**

Förenklad geologisk enhålstolkning (SHI-light) baseras på en översiktlig karaktär, såsom information från översiktlig borrhärnekartering och vattenflödesmätningar i samband med borrhning.

SHI-light (prognos) har annat syfte och underlag jämfört med traditionell geologisk enhålstolkning (SHI). Fokus för prognosen (SHI-light) är spröda strukturer av betydelse för tunnelstabilitet och vatteninflöden i tunneln, medan läkta sprickor och plastiska strukturer är av underordnad betydelse. För att ge erforderlig information om stabilitet och inflöde ska följande enheter beskrivas:

- Bergartsenheter.
- Möjliga sprickzoner.
- Transmissiva borrhålsintervall.

### **Geofysisk loggning**

Typer av geofysisk loggning som utfördes samt olika instrumentgrupper framgår av tabell 3-1. Loggningshastighet var 10 m/min förutom för gammadensitet som var 5 m/min och magnetisk susceptibilitet som var 20 m/min. Loggningshastighet för akustisk televiwer var 2 m/min. Tolkningen av geofysiska loggningsdata ger ett värdefullt underlag och stöd till den geologiska enhålstolkningen vilken i sin tur utgör det första steget i den geologiska modelleringen.

### **Posiva Flow Log (PFL)**

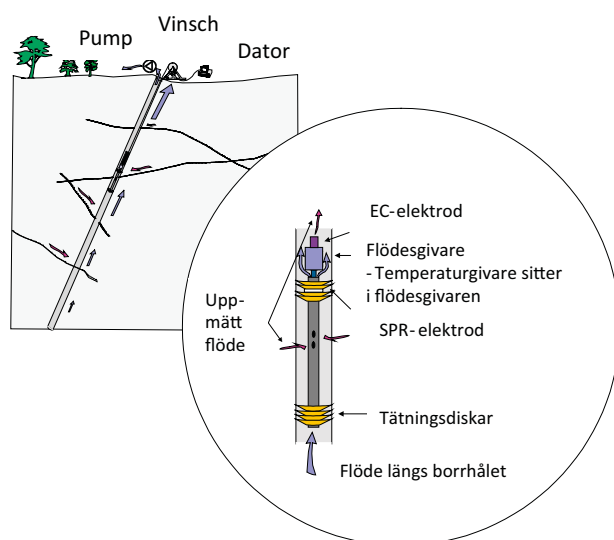
Posiva Flow Log, differensflödesloggning (PFL DIFF) är en utrustning för flödesmätning i borrhål som ägs av Posiva, Finland. Traditionella flödesmätare mäter det kumulativa flödet längs med ett borrhål. Posiva Flow Log – PFL DIFF-sonden mäter flödet in i eller ut från specificerade borrhålssektioner. Fördelen med detta är att ändrade in- eller utflöden i sektioner kan mätas. Eftersom dessa ändrade inflöden är relativt små kan de lätt förbises med konventionella flödesmätare. Gummidiskar som placeras ovanför och under sonden avgränsar in- eller utflödet från resten av borrhålet, se figur 3-7. Vattenflöde inom testsektionen styrs genom flödessensorn. Vattenflöde längs med borrhålet leds förbi testsektionen genom ett förbipassagerör. Hela flödescellen kallas för “flow guide”. Vanligen genomförs två separata mätningar med två olika sektionslängder som för undersökningarna var 5 m och 1 m.

**Tabell 3-1. Loggningsmetoder geofysisk loggning.**

Instrument	Loggningsmetoder	Dimension (L x Ø) [cm]	Avstånd mellan strålningskälla och mottagare	Kommentar
GeoVista NGAM naturlig gamma	Naturlig gamma	70 x 3,8		
Century 9139, kompenserad gamma, densitet	Kompenserad gamma densitet, naturlig gamma, 127 cm fokuserad gard resistivitet, 15 cm, 1-arm kaliper	280,3 x 5,6	20,3 cm	7 400 MBq Cs137
Century 9310,sonic	Fullvågssonic levererande P- och S-vågs-hastighet och naturlig gamma	300 x 6,1	Inre 91,4 cm Yttre 121,9 cm	Centraliserad
GeoVista, magnetisk susceptibilitet	Magnetisk susceptibilitet	200 x 3,6		
Century 8144 normal resistivitet, lateral resistivitet, självpotential och punktresistans	Normal resistivitet (16 & 64 tum) och lateral resistivitet, punktresistans, självpotential och naturlig gamma.	237 x 5,3		
Century 9042 vätske- resistivitet och temperatur	Vätskeresistivitet, temperatur och naturlig gamma	137 x 4,1		
GeoVista, dubbel gard fokuserad resistivitet	Medium och djup, LL3, fokuserad resistivitet	237 x 3,8		
GeoVista BHTV, akustisk televier	Fullvågs akustisk amplitud och gångtid, 360° orienterad akustisk bild, 360° mycket högupplöst kaliper, borrhålsriktning och -lutning och naturlig gamma	210 x 4,2		

Inledningsvis används 5 m-uppställningen för att få en generell uppfattning av var de vattenförande partierna är lokaliserade. Den är också användbar för att mäta större deformationszoner (smalare än 5 m). Uppställningen med 1 m-sektioner kan separera vattenförande partier som ligger nära varandra och uppfattats som en samlad vattenförande struktur i 5 m-uppställningen. Vid flödesmätningar med en 1 m lång testsektion förflyttas mätsonden successivt i steg om 0,1 m i den mätbara delen av borrhålet. Borrhålet var delvis stängt under mätningarna. Tryck i borrhålet förändrades genom att justera flödet från borrhålet. Flödesmätningarna utfördes i två tryckförhållanden i borrhålet.

Elektrisk konduktivitet (EC), Single Point Resistance (SPR) och temperatur på borrhålsvattnet mättes också. EC-mätningarna användes för att studera variabler i vattnets salthalt längs borrhålet. Utflödet från borrhålet mättes under tiden detta var öppet eller delvis öppet under mätningarna.



**Figur 3-7.** Schematisk skiss av flödesgivaren som används i Posiva Flow Log (PFL) DIFF, som även mäter Elektrisk konduktivitet (EC), Single Point Resistance (SPR) och temperatur på borrhålsvattnet.

## **Respons och interferenstester**

Med hjälp av det befintliga monitoringsystemet HMS (Hydro Monitoring System) kunde tryckresponser som genererades av borrhningen detekteras i närliggande borrhål. Tryckresponser gav en tidig information om möjliga vattenflödande strukturers utsträckning och konnektivitet. Ett antal selektiva respons- och interferenstester utfördes i förundersökningsborrhålen och pilotborrhålen med syfte att förstå den hydrauliska konnektiviteten i bergmassan i experimentvolymen. Med responstester avses hydrauliska responser vilka genereras av annan aktivitet än riktade interferenstester. Interferenstesterna utfördes genom att sektioner i den ena pilotborrhålet flödades enskilt och tryckobservationer genomfördes i det andra pilotborrhålet.

## **HWIC injektionstest**

SKB har hydrotestutrustningar för att exempelvis utföra injektionstester (PSS och UHT1). Dessa utrustningar är framtagna under 90-talet och är anpassade för mätning i kärnborrhål från ytan (PSS) och mätning under jord (UHT1). Dessa utrustningar svarar ej upp till de funktionskrav som kommer ställas på utrustningen under förberedande och genomförande fasen för exempelvis byggnation av Kärnbränsleförvaret. Geosigma har utvecklat en mätutrustning WIC (Water Injection Control) som till stora delar svarar upp på de krav som kommer att ställas i framtiden, dock klarar den inte de höga formationstryck, ca 500 kPa som kan bli aktuella på förvaringsnivå. Med utgångspunkt från detta beställde SKB en vidareutvecklad WIC (HWIC, High pressure Water Injection Control) från Geosigma som konstruerats för de högre formationstryck som förväntas på förvaringsnivå. Denna utrustning fanns framtagen och SAT (Site Acceptance Test) av utrustningen kunde utföras i förundersökningsborrhålen.

Injektionstester med HWIC utfördes genom att vidmakthålla en konstant "head" på 500 kPa i en 5 m lång testsektion. Före start av injektionsperioden åstadkoms en "steady-state" trycksituation i testsektionen. Efter injektionsperioden mättes återhämtning av trycket. En testcykel av standardtyp består av följande faser:

- 1) Flytt av utrustning till mätsektion.
- 2) Uppblåsande av manschett (ca 25 min).
- 3) Stabilisering av tryck (ca 5 min).
- 4) Injektionsperiod (ca 20 min).
- 5) Återhämtning av tryck (ca 20 min).
- 6) Släppning av manschett.

Injektionsperioden avbröts om vattenflödeshastigheten var klart under mätgränsen, i det aktuella fallet mindre än 5 ml/min. Därefter mättes återhämtningen under minst 5 minuter för att fastställa den låga hydrauliska konduktiviteten i sektionen.

Införingsutrustningen, den gamla UHT-riggen, är inte försedd med en nivåindikator och därför kunde ingen längdkorrektion utföras i denna mätkampanj. Andra åtgärder vidtogs så att det kunde fastställas rätt längdnivå. Åtgärderna bestod av att räkna antalet stänger och lägga dem åt sidan för att kunna räkna dem igen. En markering gjordes också på papper för varje stång som installerades.

## **Hydrogeokemisk provtagning**

Integreringen mellan de olika ämnesdisciplinerna – hydrogeokemi, hydrologi och geologi, är viktig för en kvalitativ karakterisering av och förståelse för grundvattnet i berget. En kombination av data är grunden för en robust geovetenskaplig modellering. Hydrogeokemin spelar här en alltmer betydande roll för att ge en detaljerad bild, såsom ålder, ursprung och blandning av grundvattnet i berget. I det här avseendet kan kemidata därför ge viktig information som stöd till tolkningen av de olika flöden som observeras i berget. Geologin kan med hjälp av karakteriseringen av de olika vattentyperna få en ökad förståelse för hur olika sprickor och strukturer är kopplade till varandra. Detta betyder att det är viktigt att genomföra provtagning dels under själva borrhningen men även i samband med manschettering och genomförande av hydrotester.

Ett vattenprov tas ut och samlas upp i ett stort antal flaskor eftersom många komponenter ska analyseras. För att definiera omfattning och utförande av grundvatten använder SKB en klassindelning med fem olika kemiklasser för att säkerställa att jämförbara data produceras oberoende av projekt samt att proven blir så kompletta som möjligt och därmed att inga viktiga komponenter uteblir.

Klass 3-provtagning innebär en enkel provtagning med bestämning av huvudkomponenter samt utvalda isotoper ( $\delta^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) och  $^{34}\text{S}$ . Denna enkla provtagning syftar till att ge tidiga analysresultat som kan ge en snabb och tillräckligt tydlig karakterisering av det provtagna vattnet. En klass 5-provtagning innebär en fullständig och omfattande provtagning med en stor uppsättning isotopbestämningar, samtliga spårmetaller och flera parametrar. En klass 5-provtagning kräver att utföraren har kunskap om provtagning och kontamineringsrisker. Ett flertal av de parametrar som ingår i denna provtagning kräver relativt lång tid att analyseras vilket innebär att de kompletta resultaten dröjer längre tid än för en klass 3-provtagning. Några nyckelparametrar kommer dock normalt att kunna levereras tidigt för att kunna tillgodose vissa behov hos exempelvis hydrogeologi.

Under borring genomförs en hydrogeokemisk provtagning enligt klass 3 ungefär var 25:e meter, samt när ett större vatteninflöde påträffas. Provet tas i en 5-litersdunk på utgående vatten ur borrhålet och en fältmätning av EC, T, pH och temperatur genomförs. Dunken levereras till kemilaboratoriet som filtrerar och preparerar provet för analys. EC, T och pH mäts även återigen på samma vatten i kemilaboratoriet.

I samband med hydromätningar under borring (när borrhålet är manschetterat) utförs en hydrogeokemisk provtagning enligt klass 5. Denna typ av hydromätningar genomförs alltid som försteg till och som underlag för injektering. Efter att kranen öppnats och sektionen är helt omsatt enligt beräkning från sektionsvolym och flödesanomali, eller minst 5 sektionsvolymter utförs en omfattande provtagning. Utbildad personal utför provtagningen genom så kallad on-line filtrering (vars utrustning kopplas på vid vattenuttaget) i förpreparerade flaskor för specialanalyser. Detta medför att fältmätningarna blir kvalitetssäkrade.

### 3.1.4 Rock Characterisation System (RoCS)

De geologiska karteringarna på Äspö har tidigare utförts med det s.k. TMS systemet (Tunnel Mapping System). I detta system ritas kartören/geologen i fält in de geologiska objekten för hand på papper och skriver in geologiska data i färdiga tabeller. Digitalisering av fältkartan/ritningen samt inskrivning av data i den digitala databasen sker sedan på kontoret. I samband med utbyggnadsprojektet användes det nya karteringssystemet RoCS (Rock Characterisation System) i produktion för första gången. All kartering sker direkt i en 3D-modell i en laptop. Modellen skapas med hjälp av fotogrammetri.

För fotogrammetrin användes en för ändamålet anpassad Nikon D300s försedd med ett kalibrerat Tokina AT-X pro SD 11-16 F2.8 (IF) DX objektiv med vilken väggar, tak och fronter fotograferades. 3D-modeller konstruerades med hjälp av programvaran Shape Metrix.

Karteringsarbetet var uppdelat i två huvudmoment:

- 1) **Salvkartering**, som utfördes efter varje salva. Salvkarteringen bestod av två delmoment: a) frontkartering som utfördes som en standardkartering med RoCS och/eller TMS samt b) en ”analog” översiktskartering av tak och väggar som presenterades på ett pappersark där den teoretiska tunnelkonturen var inritad och där endast större strukturer ritades in, exempelvis sprickor eller deformationszon som kan följas runt hela tunnelperiferin (Full Perimeter Intersections (FPI)), observationer av vatteninflöde och sämre bergpartier.
- 2) **Geologisk kartering av tak och väggar**, som utfördes med RoCS och/eller TMS när det var praktiskt möjligt efter det att borrhälen lämnat aktuell tunnelsektion.

Vid kartering rengjordes aktuellt tunnelavsnitt och hjälplinjer samt sektionsangivelser markerades ut. Vidare placerades referensmarkörer för fotogrammetrin ut och mättes in med totalstation och koordinater levererades på ett usb-minne till de karterande geologerna. Med hjälp av sprayfärg märktes ett antal punkter ut på den/de ytor som sedan fotograferades. Punkterna var till hjälp vid skapandet av 3D-modellen och vid karteringsarbetet var de till hjälp för orientering. Därefter placerades bärbara led-lampor ut. Efter detta fotograferades hela salvan; två bilder av fronten, två bilder av vänster respektive höger vägg, två bilder av vänster respektive höger anfang, två bilder av vänster respektive höger takhalva och ibland även två bilder av takmitt. Förutom denna fotografering

utfördes fotografering även med en mindre, konventionell kamera av modell Canon G5. Denna fotografering användes för att i bild dokumentera de karterade bergytorna när karteringen utfördes enligt TMS-systemet.

De två bilderna från fronten sattes sedan ihop till ett stereopar i fält, som kom att utgöra den 3D-modell som låg till grund för frontkarteringen med RoCS. Modellen för resterande del av salvan skapades på kontoret. Till en början kopplades koordinaterna till den skapade modellen i Shape Metrix, men kom senare att kopplas till modellen med hjälp av RoCS. Därefter utfördes den geologiska salvkarteringen.

Karteringsarbetet med RoCS utfördes huvudsakligen av två geologer/kartörer. Den ena hanterar datorn medan den andra utför mätningar, kontrollerar sprickmineral etc på bergväggen och rapporterar sina iakttagelser till datoroperatören. Det går dock att utföra karteringen med en person. Då det till stor del var två kartörer samt en stödresurs som deltog vid karteringsarbete kunde översiktskarteringen utföras av en kartör medan de två andra fotograferade samt satte ihop 3D-modellen över fronten.

### 3.1.5 Strategi för geovetenskaplig modellering

Huvudsyftena för den geovetenskapliga modelleringen kan brytas ner enligt följande:

- Modellering för upprättande av geovetenskapliga prognoser över vad som kommer att påträffas och ske vid respektive tunnels framdrift, så som vatteninflöden, läge av deformationszoner/större sprickor, samt hur bergvolymen kommer att påverkas vad gäller grundvattenavsänkningar m m.
- Modellering avseende uppdatering av geologiska och hydrogeologiska modeller inom bergvolymen som omfattar utbyggnadsområdet.

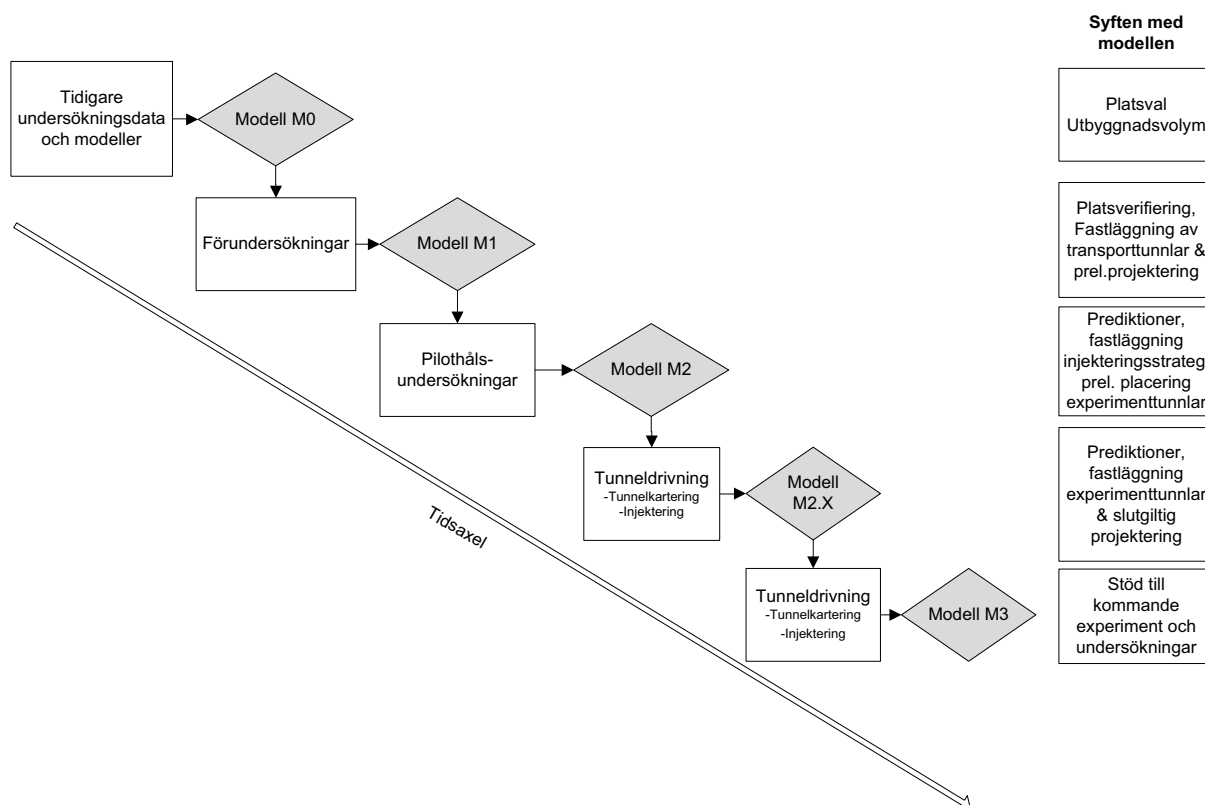
Projektets modelleringsprogram avsåg modellering i samband med utbyggnaden vid –410 m nivån, med huvudsyftet att successivt upprätta och uppdatera en geovetenskaplig modell över utbyggnadsvolymen. Uppdateringen avser främst läge, geometri och vattenföring av deformationszoner och stora sprickor samt litologi. Geologiska och hydrogeologiska modeller togs fram som ett underlag för upprättande av prognoser samt underlag för projektering och tunnelbyggande.

Ett stegvis tillvägagångssätt för detaljundersökning och geovetenskaplig modellering genomfördes med kontinuerlig och iterativ återkoppling mellan modellering och projektering för olika typer av beslutsfattande. De geovetenskapliga modellerna användes för att göra prognoser för projektering, se figur 3-8. För att uppfylla kraven enligt avsnitt 2.2 krävdes en inledande geovetenskaplig förståelse av platsen och en konceptuell modell att utgå ifrån, Modell M0, se avsnitt 2.3. En modell är en förenkling av verkligheten där graden av förenkling väljs med hänsyn till de frågeställningar som behöver lösas. En deterministisk diskret modelleringsansats tillämpades för att geometriskt definiera och tillsätta parametrar på deformationszoner, stora sprickor, bergartsenheter och större hydrauliska strukturer (hydraulic features).

Den geovetenskapliga modellen M1 baserades på modell M0 och data från undersökningar i förundersökningsborrhålen vilka borrades avgränsande till utbyggnadsvolymen. Syftet med denna geovetenskapliga modell var att ligga till grund för verifiering av platsen för utbyggnaden, samt utgöra underlag för prognos och preliminär layout och bergprojektering inför upprättande av kontrakt med entreprenör.

Den geovetenskapliga modellen M2 baserades på modell M1 och data från undersökningar i pilotborrhål, vilka borrades inom tunnelkonturen för transporttunnlarna TASU och TASP. Syftet med denna modell var prognostisering avseende vatteninflöden och bergstabilitet som underlag för projektering inför start av tunneldrivning. Under tunneldrivningen uppdaterades modell M2 till modell M2.X (M2.1-M2.4) inför fastläggning av experimenttunnlar, med data från tunnelproduktion i form av inflödesdata från sonderingshål i injekterings-skärmarna och geologisk tunnelkartering, se vidare avsnitt 4.4.3.

Den slutgiltiga geovetenskapliga modellen, M3, inkluderar all produktionsdata från tunneldrivning och geologisk kartering av transporttunnlarna samt experimenttunnlarna. Syftet med denna modell är att stödja framtida experiment med detaljbeskrivning av berget. Modell M3 kommer att färdigställas inom ramen för den verksamhet gruppen Undersöknings- och Bergbyggnadsteknik ansvarar för inom enheten Slutförvarsteknik.



**Figur 3-8.** Schematisk sekvens av de geovetenskapliga modellernas utveckling, M0 till M3, med deras respektive syfte.

## 3.2 Projektering

Projekteringsprocessen har följt rekommendationerna enligt Eurocode (SS-EN 1997-1:2005). Informationen från undersökningarna sammanställdes i undersökningsrapporter, en för varje arbetsområde, och dessa användes sedan som underlag till projekteringsrapporter som presenterar den ingenjörgeologiska prognosen och dess osäkerheter samt deras konsekvenser på byggandet. Utifrån denna information tillämpades hävdvunna metoder eller observationsmetoden för dimensioneringen. Hur injektering och förstärkning dimensionerades presenteras i avsnitt 3.5 respektive 3.7.

Innan start av tunnelarbetena upprättades bygghandlingar med enbart preliminära lägen för experimenttunnlarna. Dessa bygghandlingar uppdaterades i takt med att läget för dessa tunnlar fastlades. Relationshandlingar på färdigbyggda utrymmena, samt på utförd injektering och förstärkning, upprättades innan slutbesiktningen.

### 3.2.1 Sammanställning av konstruktionsförutsättningar, tillkommande förändringar i omfattning och krav

Konstruktionsförutsättningar för projektering från start var:

- De nya bergöppningarna ska vara självdränerande och befintligt pumpsystem i tunneln ska kunna användas.
- Förväntade framtida transportbehov samt utrymmesbehov för installationer styr utformningen av nya tillfartstunnlar. Uppgifter om de nya experimentplatsernas geometriska utformning inhämtas från intressenterna av utbyggnaden.
- Bergförstärkningsåtgärder ska undvikas. Säkerheten upprätthålls genom skrotning under projektiden. I samband med förberedelser inför överlämning av experimentplatserna till intressenterna beslutas vilka bergförstärkningsåtgärder som behöver vidtas för att upprätthålla säkerheten efter överlämningen av utbyggnaden till beställaren.

- Projektet har inte som mål att minimera inflödet av inläckande vatten genom tillämpning av t ex systematisk injektering med Silica sol och eller cementbaserat injekteringsbruk. Det är dock angeläget att berget tätas i den omfattning som krävs för att tryckförhållandena inom området för utbyggnaden är oförändrad eller att den sänkning av trycket som uppstår kan accepteras. I det fallet att någon eller några av intressenterna ställer särskilda täthetskrav för sina respektive delar av utbyggnaden ska dessa beaktas.
- Tillåten bergvolym utanför teoretisk kontur får inte överstiga 30 volym-% per salva ("överberg").
- Ingen tillåten bergvolym innanför teoretisk kontur ("underberg").
- Sprängskador ska begränsas och får inte leda till en sammanhängande effektiv transmissivitet utefter en betydande del (minst 20–30 m) av deponeringstunneln och medelvärdesbildat över tunnelsulan, som är högre än  $10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s.

Tillkommande förändringar i omfattning under projektets gång var:

- Vid injektering ska låg-pH injekteringsbruk användas. Erfarenheter från den injektering som genomfördes inom Fintättningsprojektet (Funehag och Emmelin 2011) ska beaktas.
- Omfattning av utbyggnaden utökades med tillägg av 100 m tunnlar för SKB Internationals räkning.
- En del av utbyggnaden behövde göras som option, hela underlaget för bygghandlingen fick skrivas om i upphandlingsprocessen.
- Omfattning av Valvpluggsprojektets experimentplats utökades med en extra instrumenteringsnisch.
- Tillämpning av observationsmetoden behövde demonstreras vid injektering.
- Användande av emulsionssprängämne för att skapa en effektiv tunneldrivningsprocess.
- Tunnelkartering genomfördes med hjälp av det nya systemet RoCS (Rock Characterisation System).
- Programmet för hydrauliska tester i sonderingshål utökades i samband med injektering av TASP och TASU. Detta i syfte att ge en förbättrad beskrivning av den hydrauliska heterogeniteten i enskilda sprickplan/zoner som "provatas" med sonderingshål och därmed ge ett utökat statistiskt underlag för beskrivning av heterogenitet i DFN-modeller (Discrete Fracture Network).

De styrande kraven för experimenten kan sammanfattas som:

- Så högt grundvattentryck som möjligt (KBS-3H).
- Bra berg utan uthålliga sprickor som skär tunnelarean eller löper längst med tunneln (varken på sidorna eller över tak/sula) (KBS-3H, Valvpluggsprojektet).
- Områden där grundvattnet är opåverkat av injektering, vilket innebär antingen selektiv injektering eller bra kontroll och begränsning av spridning av injekteringsbruket (Concrete and Clay).
- Miniavstånd mellan tunnlar samt från rampen till första experimenttunneln anpassade till bergförhållandena på Äspö.
- Layouten ska utformas så att två experimentplatser medgör att två pilothål kan borrar parallellt ca 40 m ifrån varandra (DETUM-1).

### 3.2.2 Upphandlingsprocessen

Tunneldrivningen har genomförts enligt princip löpande räkning och med Allmän material- och arbetsbeskrivning (AMA) som referensverk. AMA beskriver krav på material, utförande och färdigt resultat. Förfrågningsunderlaget omfattade Administrativa Föreskrifter (AF), Teknisk Beskrivning (TB) och Mängdförteckning (MF) som anbudsgivarna prissatte. Förfrågningsunderlaget innehöll också andra handlingar som t ex ritningar, principutförande av borrar-, ladd- och tändplaner och projektets kvalitets- och miljöplan. Den tekniska beskrivningen beskrev utförande och materialkrav samt de kontroller som behövde utföras.

Anbudsförfrågan föreskrev att nedan angivna uppgifter skulle bifogas anbudet.

1. Prissatt mängdförteckning samt kompletterande prissatt mängdförteckning med maskiner, utrustningar och material som anbudsgivaren bedömde krävdes för entreprenadens genomförande. Anbudssumman utgjordes av de prissatta mängdförteckningarnas summa.
2. Optimeringsförslag av huvudtidsplan utifrån överlämnad tidsplan.
3. Förteckning samt tekniska specifikationer över planerad maskinutrustning; ålder, utsläpp, inklusive riktinstrument för riktning av borrhål samt utrustning för rakhetsmätning av borrhål. Kalibrerings- och underhållsrutiner och frekvens för kalibrering av mätutrustning och maskiner. Förteckning över utrustning för utsättning och inmätning.
4. Entreprenörens organisationsplan med ansvar och befogenheter för ombud, ansvarig arbetschef, platschef, kvalitets- och miljöansvarig, arbetsledare, servicetekniker samt yrkesarbetare.
5. Curriculum Vitae för nämnda personer, inklusive innehav av sprängkort och referensobjekt.
6. Organisering av skiftgång.
7. Kort redovisning av referensprojekt avseende injektering, skonsam och försiktig sprängning samt krav på rak borring som är relevanta för det aktuella projektet. Referensbeställare med namn på kontaktperson samt uppgift om dennes kontaktppgifter.
8. En beskrivning av företagets kvalitetssystem, samt ett förslag till egenkontrollplan för att uppfylla kraven enligt utförande av sprängning och injektering.
9. En beskrivning av företagets miljöledningssystem.
10. Redovisning av anbudsgivarens bedömning, med kortfattad motivering, av de i detta åtagande förekommande mest kvalitetskritiska arbetena, vilka i ett senare skede särskilt ska beaktas i entreprenörens egenkontrollplan.

Anbudsförfrågan utvärderades enligt grunderna nedan enligt inbördes ordning.

- 1. Platsledningens och yrkesarbetarnas kompetens, speciellt vad avser erfarenhet av bergarbeten med höga krav gällande t ex borrhålsprecision, vibrationer och injekteringsteknik.** Projektet bedömde att platsledningen och bergarbetarnas kompetens och erfarenhet av relevanta arbeten var av högsta vikt då det är dessa personer som kvalitetssäkrar bergarbetena.
- 2. Tidsplan/Tillgänglighet.** Projektet bedömde att tillgängligheten var viktig för att projektet skulle kunna leverera experimenttunnlar till olika SKB-intressenter samt utvärdera och rapportera resultaten till andra SKB-intressenter. Leverans av tunnel till Valvpluggsprojektet behövde ske senast i februari 2012, vilket blev en styrande faktor för projektet för att kunna komma igång med arbetena. Entreprenörens eventuella optimeringsförslag på drivningen var också en viktig faktor, då den påverkade både tid och budget samt kunde ge mer tid för utvärdering av arbetet och rapportering efter att entreprenaden var avslutad. Det var viktigt att projektet och Äspölaboratoriets organisation hade resurser att hantera ett optimeringsförslag på drivningen samt med bibehållen kvalitet.
- 3. Föreslagen maskinutrustning, ålder, utsläpp etc.** Projektet bedömde att tillförlitlig utrustning var viktigt då detta gav bra förutsättningar för repeterbarhet i utförande. De nyare utrustningarna har också möjlighet att samla in data som i vissa fall kan ligga till grund för kontroll av utförandet. Data ger också bra underlag för utvärdering samt underlättar arbetet vid djupare analyser och avrapporteringar.
- 4. Företagets erfarenhet av projekt med stora krav på försiktig sprängning med noggrann kontroll av resultatet (referensprojekt).** Projektet bedömde att det var bra om företaget hade dessa erfarenheter vilket underlättar om tillkommande behov uppstod i projektet. Att personalen som arbetade i projektet hade dessa erfarenheter bedömdes dock vara av större vikt.
- 5. Affärsvillkor/Kommersiella villkor. Härmed avses angiven anbudssumma och övriga prispåverkande kommersiella villkor med justering för reservationer och i anbud angivna från förfrågningsunderlaget avvikande förutsättningar.** Projektet planerade att till stor del upphandla arbete per timma. Därmed kom erfarenhet (CV för både yrkesarbetare och platsledning) samt föreslagen maskinutrustning att spela en större roll än anbudspriser. Anledningen var att projektet förväntades få mer utträttat och med bättre kvalitet om entreprenörens erfarenhet och maskinparksuppsättning värderades högre än å priserna för t ex äldre maskiner.



- 6. Företagets finansiella styrka och tillgång på resurser för projektet.** Projektet bedömde att detta inledningsvis hanteras av Upphandlingsenhetens kontroller. Beroende på vilken skiftgång anbudsgivaren föreslog, så kunde det bli aktuellt att få input gällande back up resurser i form av personal och maskiner.
- 7. Företagets organisation och system för kvalitets- och miljösäkring.** Projektet bedömde att detta inte var lika viktigt, då det är entreprenörens och beställarens gemensamma kontrollplan som styr organisation, kvalitet och miljösäkring. Värdering och kontroll av hur det kunde fungera gjordes först när entreprenören hade valts.

Inom en vecka efter beställning behövde entreprenören lämna följande uppgifter:

1. Underentreprenörer, leverantörer m m inklusive omfattning av uppdraget som utförs av underentreprenörer.
2. Disposition av arbetsområde. Anbudsgivare anger sitt behov av ytor som behövs för upplag, etc. Entreprenören tillhandahåller sina egna bodar både ovan och under jord.

Inom tre veckor efter beställning behövde entreprenören lämna följande uppgifter:

1. En objektsanpassad kvalitetsplan inklusive kontrollprogram.
2. En uppdragsspecifik miljöplan med tillhörande kontrollprogram.

### 3.3 Kontrollprogram för grundvattentryck

För att under utbyggnaden kunna verifiera projektets huvudkrav på bibehållet grundvattentryck tog projektet fram ett kontrollprogram för observation av grundvattentryck. Kontrollen av grundvattentryck påbörjades från det att pilotborrhålen började borrar tills det att tunnelsystemen hade överlämnats till Äspölaboratoriets driftgrupp. Programmet syftade till att mäta påverkan av borrning av pilotborrhål samt tunneldrivning på grundvattentrycken, så att korrigerande och/eller avhjälpande åtgärder kunde implementeras för att i möjligaste mån upprätthålla trycken kring transport – och experimenttunnlarna. Kontrollprogrammet omfattade mätobjekt (sektioner i borrhål) inom Hydro Monitoring System (HMS) och mätobjekt upprättade av projektet, inom påverkansavstånd från de tilltänkta tunnlar. Kontrollprogrammet motiverades främst av krav från intressenterna på att identifiera en bergvolym med höga grundvattentryck vid leverans av experimenttunnlar. Syftet var även att kunna bedöma avsänkningens storlek inom påverkansområdet för att vid behov sätta in förebyggande åtgärder. Kontrollprogrammet utgjorde ett underlag för kontinuerlig uppföljning av tunneldrivningens påverkan på tryck och flöden.

En störning som avsåg en inducerad förändring i det hydrogeologiska systemet kunde t ex orsakas av att borrhålsventiler öppnades/stängdes, manschetter trycksattes/släpptes, sprängningar, och injekteringar i berget. Störningarna orsakade responser i det hydrogeologiska systemet i form av förändrade tryck. Kontrollprogrammet var tänkt att registrera dessa tryckförändringar och att korrelera de som förorsakats av borrningen av pilotborrhål och aktiviteter i tunneldrivningsprocessen, inför tunneldrivningen av transporttunnlarna TASP och TASU samt experimenttunnlarna.

Viktiga moment vid borrningen av pilotborrhål var tidpunkter för borrningen och kronpositionens läge, samt tidpunkter för när borrhål stängs och öppnas. Viktiga moment i tunneldrivningen var följande; borrning av sonderings- och injekteringshål, hydrauliska mätningar i sonderingshål, injektering av sonderings- och injekteringshål, borrning av salvhål, sprängning samt borrning av bulthål och bultning.

Kontrollnivå avsåg både den nivå och den trend (förändring i tryck per tidsenhet) relativt referensnivån utanför vilken en uppföljningskontroll genomfördes. Den dagliga kontrollen utfördes av representant från delprojekt tunneldrivning. Denne rapporterade större förändringar till hydrogeologen i delprojekt karakterisering som gjorde bedömning om uppföljningskontroll var nödvändigt.

Den dagliga kontrollen utfördes i två steg:

1. Aktivitetsledare för injektering utförde kontroll om observerade nivåer i monitoringsystemet understeg definierad referensnivå, samt om tryckändringen bedömdes vara varaktig. Om tryckändringen bedömdes vara varaktig rapporterades detta till delprojektledare projektering och delprojektledare tunneldrivning samt till hydrogeologen i delprojekt karakterisering.

2. Hydrogeologen i delprojekt karakterisering följde upp utfall av kontrollen enligt punkt 1 ovan när tryckförändringen bedömdes vara varaktig. Uppföljningen bestod av tre huvudsakliga bedömningar;
  - Orsaken till tryckändringen, främst huruvida den kunde relateras till störningar genererade av projektet.
  - Om tryckförändringen bedömdes vara varaktig.
  - Om/hur trycket bedömdes återställas efter störning.

### 3.4 Observationsmetodens tillämpning

I enlighet med Eurocode (SS-EN 1997-1:2005) kan observationsmetoden vara tillämpbar när det är svårt att förutsäga det geotekniska beteendet och är en accepterad metod för att verifiera geokonstruktioners bärförmåga, stadga, beständighet och täthet. Projektets primära krav var att bibehålla ett högt grundvattentryck och den stora osäkerheten för projektet var relaterad till påträffande av vattenförande strukturer och att bibehålla täthet i berget.

Enligt observationsmetoden (SS-EN 1997-1:2005) ska följande krav uppfyllas innan utförandet kan påbörjas:

1. Acceptabla gränser för beteendet ska bestämmas.
2. Gränserna för möjligt beteende ska utredas och det ska kunna påvisas att sannolikheten för att det verkliga beteendet ligger inom de acceptabla gränserna är godtagbar.
3. En plan för uppföljning ska tas fram som ska kunna visa om det verkliga beteendet ligger inom acceptabla gränser. Uppföljningen ska på ett tillräckligt tidigt stadium klargöra detta och med tillräckligt korta tidsintervall för att framgångsrikt kunna vidta korrigerande åtgärder.
4. Responstiden hos mätinstrumenten och i sättet att analysera resultaten ska vara tillräckligt snabb för att möjliggöra förändringar i systemet.
5. En plan för korrigerande åtgärder ska upprättas, vilken kan följas om uppföljningen visar ett beteende som ligger utanför acceptabla gränser.

Under byggnadsskedet ska uppföljningen utföras som planerat. Resultaten av uppföljningen ska utvärderas vid lämpliga steg och de planerade korrigerande åtgärderna ska vidtas om gränserna för beteendet överskrids. Uppföljande instrumentering ska antingen bytas ut eller utökas om den inte ger tillförlitliga data av avsett slag eller i tillräcklig mängd.

### 3.5 Injektering

Det styrande kravet för bestämning av injekteringsbehovet var att under drivningen av tunnarna TASP och TASU samt tillhörande nischer, bibehålla befintligt grundvattentryck eller sänka det så lite som möjligt. Detta på grund av KBS-3H:s behov av vattentryck högre än 3,5 MPa för sitt experiment.

Projektet hade från början kravet att inte utföra systematisk injektering för att påverka berget och rådande förhållande så lite som möjligt. Detta diskuterades men valdes bort då tunnarna är relativt korta, ca 100 m, och lokala vattenförande deformationszoner, som behöver injekteras, troligtvis förekommer regelbundet. Dessutom hade projektet önskemål om effektiviseringar i injekteringsprocessen vilket fås med en systematisk injektering, med begränsade tillvägagångssätt och beslut under processen.

Dimensioneringsförutsättningarna för injekteringen baserades på analys av inflöden som uppmättes under borrning av respektive pilothål KA3011A01 och KA3065A01. Maximal hydraulisk sprickapertur som förväntades förekomma i de aktuella bergvolymerna bedömdes vara cirka 230  $\mu\text{m}$  i TASU respektive 160  $\mu\text{m}$  i TASP. Utifrån ett statistiskt synsätt med lognormal fördelning av hydraulisk sprickapertur bedömdes sannolikheten 5 % att summa transmissivitet för mer än en delsträcka i tunneln motsvarar den förväntade maximala hydrauliska sprickaperturen. Stoppvillkor fastlades utifrån injekteringsbrukets egenskaper, effektivt injekteringstryck samt spetsavstånd mellan borrhål.

### 3.5.1 Injekteringsutrustning

#### *Unigrout*

En Atlas Copco Unigrout, modell EH22 200-140AWB-SS utrustad med kompressor, pump, blandare 200 l och omrörare 400 l samt Logac G 5, för loggning av tryck, flöde och volym, användes vid injektering. Utrustningen hade en injekteringslina och var inköpt 2007 för Fintättningsprojektet (Funehag och Emmelin 2011).

För att avgöra om injekteringsriggen klarade injektering med föreskrivet stopptryck 12 MPa genomförde entreprenören ett injekteringstest 2012-02-23. Testet genomfördes med Unigrouten i två testborrhål som borrades 1 m upp från sulan i vänster tunnelvägg i salva 1 TASJ och var 3 m långa. 6 MPa nåddes i det första borrhålet innan manschetten började glida ut och testet avbröts. I det andra borrhålet nåddes 9,5 MPa, vartefter Unigroutens tryckregulator och flödesgivare havererade. Projektet bedömde att 9,5 MPa var Unigroutens gräns.

Loggning av tryck, flöde, volym och tid gjordes med en Atlas Copco Logac G5. Mätenheten består av en flödesmätare och en tryckmätare som är monterade i linje med gängor på vardera sidan, en för slanganslutning till pumpen och en för slanganslutning till utloppet på injekteringslinjen. Tryckmätaren består av en tryckgivare som är monterad på ett membran. Den elektromagnetiska flödesmätaren har två induktiva givare inbyggda i ett keramiskt hus.

Registreringsenheten kan registrera ett tryck på upp till 10 MPa, och ett flöde på upp till 100 l/min. Data lagras i enheten 1 gång/10 s och hämtas ut i formatet textdokument via en USB-port. Imatning av injekteringsskärm, sektion och hålnummer sker manuellt i samband med att loggfilen skapas vid injektering. Vid störningar i injekteringsarbetet skapades ibland skräploggar dvs loggar utan eller med felaktig data. Det var därför viktigt att ha en noggrann dokumentation av injekteringsarbetet för att kunna utröna vilka filer som var relevanta för analys av resultatet.

#### *Manschetter*

I förfrågningsunderlaget lämnades följande krav på injekteringsmanschetter baserat från Fintättningsprojektet (Funehag och Emmelin 2011): Samtliga manschetter ska vara av typen flergångsmanschetter, kunna justeras i hålen vid läckage och vara täta efter utförd injektering. Vidare behövde manschetterna klara borrhålsdiametern, dvs mellan 62 till 66 mm, och vara dimensionerade för ett totaltryck på 25 MPa.

Då projektet behövde arbeta mot effektiviseringar i tunneldrivningsprocessen kom entreprenören med förslag, som accepterades, att i stället använda engångsmanschetter (modell GX HD) från leverantören Gurlita GMA AB. Denna typ av manschett är produktionsvänlig eftersom den inte behöver tas ut ur injekteringshålet och rengöras efter injektering. Injekteringsröret skruvas av och engångsmanschetten lämnas kvar i borrhålet.

### 3.5.2 Injekteringsbruk

Ett av projektets tillkommande mål var att genomföra fullskalig injektering med låg-pH bruk. För detta användes låg-pH injekteringsbruk framtaget för att pH i lakvattnet inte ska överstiga 11. Bruket består av Cement, Groutaid (kisellösning silica fume), flytmedel och vatten. På grund av den stora mängden tillsatt silica fume är det traditionella begreppet för blandningsförhållandet mellan vatten och cement, vattencementtalet vct, mindre relevant. Därför används i stället förhållandet mellan mängden vatten och torrmaterial, W/DM (water to dry material). Två olika recept finns framtagna se tabell 3-2. Bruk 1 (Vatten/torrt material (W/DM) 1,4) tillämpades för grovinjektering i sonderingshålen och bruk 2 (W/DM 1,6) tillämpades för injektering av resterande skärm. Bruk med W/DM 1,4 har tidigare använts av Fintättningsprojektet (Funehag och Emmelin 2011). Innan injekteringsarbetena inleddes genomfördes en förprovning. Yrkesarbetare och arbetsledare från Entreprenören deltog tillsammans med SKB:s bygglidning. Syftet var att avgöra om vilket låg pH-bruk, baserat på cementtypen Injektering 30 eller Ultrafin 16, som hade de bästa egenskaperna. Under förprovningen testades följande egenskaper med respektive testmetoder i parentes:

- Bruks- och lufttemperatur (termometer).
- Flytgränsspänning (rheometer och Yield stick).
- Viskositet (rheometer).
- Penetrationsegenskaper (filterpump och filterpress).
- Hållfasthetsutveckling (kopptest).
- Vattenseparation (mätrör).
- Indirekt viskositet (marshkon).
- Densitet (Mud balance).

Baserat på resultatet från förprovningsen (uppmätta pumpegenskaper (viskositet) och inträngningsförmåga (bmin och bkrit)) valdes bruk baserade på Injektering 30, tabell 3-2 redovisar viktförhållande för ingående material.

**Tabell 3-2. Recept för låg-pH injekteringsbruk (pH < 11).**

Material	Injekteringsbruk i viktförhållande		Kommentarer
	Bruk 1	Bruk 2	
Vatten/torrt material (W/DM)	1,4	1,6	
Vatten (kg)	1,67	1,67	Dricksvatten
Cement (kg)	1,00	0,8	INJ30
Silica slurry (kg)	1,37	1,37	Grout aid
Flytmedel (kg)	0,068	0,07	Melcrete (naftalenbaserat)

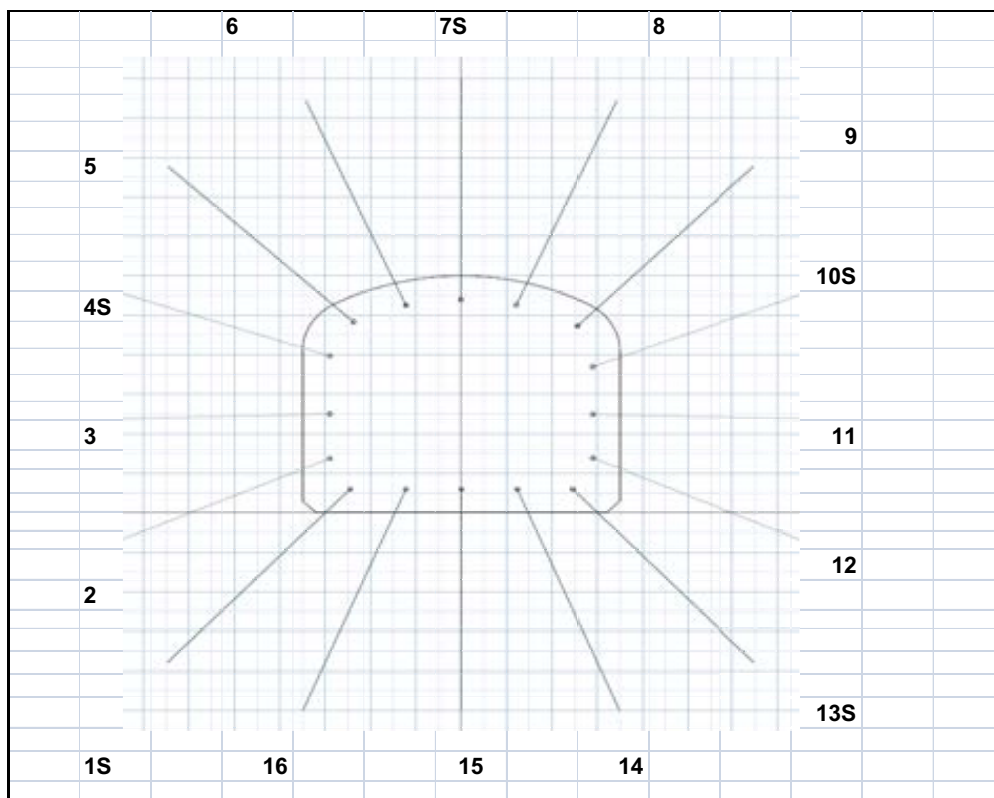
Blandning av bruket gjordes enligt metoden beskriven i teknisk beskrivning som utprovades i Fin-tättningsprojektet (Funehag och Emmelin 2011) och som där fastslogs var väsentlig för att få brukets egenskaper. Blandning av injekteringsbruket gjordes manuellt med hjälp av Unigroutens registreringssystem. En sats anpassades till två cementsäckar om vardera 20 kg. Vatten tillsattes automatiskt av Unigrouten, varefter cementen tillsattes manuellt. Efter blandning pumpades silica slurry över i blandaren, med dosering efter vikt. Flytmedlets vikt var inkluderad i vikten för silica slurry i den programmerade blandningssekvensen i Unigrouten och dessa tillsattes samtidigt. Flytmedlet mättes upp manuellt med mätkärl.

### 3.5.3 Injekteringsutförande

Injekteringsutförandet var följande:

- Borring, inklusive hållrengöring av 5 st sonderingshål, se figur 3-9.
- Hydrauliska mätningar, se avsnitt 3.5.4.
- Vid inflöde större än 20 l/min i minst ett av dessa hål, grovinjektering av dessa 5 sonderingshål med bruk 1. Stoppkriterierna framgår av tabell 3-3.
- Väntetid efter avslutad injektering i grovinjekteringskärm, minst 12 timmar, se figur 3-9.
- Borring, inklusive hållrengöring av resterande skärmen, dvs sammanlagt 11 borrhål.
- Injektering av dessa borrhål med bruk 2. Stoppkriterierna framgår av tabell 3-4.
- Väntetid efter avslutad förinjektering, minst 12 timmar.
- Borring av kontrollhål om fler än 2 injekteringshål överskrider stoppkriterium för maxvolym (> 200 l bruk). Dessa borrar på vardera sidan av dessa injekteringshål.

Rakhetsmätning utfördes med FLEXIT/Multismart i alla borrhål som ingår i första injekterings-skärmen på varje transporttunnel (först mätning i de 5 sonderingshålen, därefter mätning i resterande borrhål i skärmen). Mätningen genomfördes var tredje meter både fram och tillbaka i borrhålet.



**Figur 3-9.** Schematisk skiss över injekteringshål och hålnummerering. S-hål är sonderingshål. Kontrollhål som ej visas i figuren numreras därefter löpande från vänster till höger från nr. 17 osv.

Vid stora vatteninflöden påbörjades injekteringen i det mest flödande borrhålet. Injekteringsordningen styrdes av hydrauliskt samband mellan injekteringshål om sådant uppvisades. Vid påvisat hydrauliskt samband till närliggande borrhål injekterades sambandsborrhålet direkt efter det första avslutats, enligt gällande stoppkriterier. Stoppkriterier som hade tagits fram gällde per injekteringshål för ett injekteringsstryck på 8 MPa. Tabell 3-3 och tabell 3-4 presenterar stoppkriterierna för grovinjektering respektive injektering av resterande skärm.

**Tabell 3-3. Stoppkriterier för injektering med bruk 1 (W/DM 1,4), grovinjektering.**

Stoppkriterier – Injekterad volym	Stoppkriterium – Injekteringstid
Injekterad volym = 200 l	Injekteringstid < 20 min
Injekterad volym ≤ 5 l	Injekteringstid = 10 min
5 l < Injekterad volym ≤ 200 l	Injekteringstid = 20 min

**Tabell 3-4. Stoppkriterier för injektering med bruk 2 (W/DM 1,6), injektering resterande skärm.**

Stoppkriterier – Injekterad volym	Stoppkriterium – Injekteringstid
Injekterad volym = 200 l	Injekteringstid < 20 min
Injekterad volym < 3 l	Injekteringstid = 5 min
3 l < Injekterad volym ≤ 5 l	Injekteringstid = 15 min
5 l < Injekterad volym ≤ 200 l	Injekteringstid = 20 min

### 3.5.4 Hydrauliska mätningar

Två olika typer av hydrauliska mätningar genomfördes vid injektering. Den ena hydrauliska mätningen utfördes efter önskemål från projekt DETUM-1 (se avsnitt 3.2.1) och utfördes i sonderingshålen under drivning av TASP och TASU. Manschetter monterades i de 5 sonderingshålen och ventilpacker/tryckgivare anslöts till manschetterna. De hydrauliska mätningarna utfördes i ett hål i taget med början av det minst flödande och avslutade i det mest flödande med utgångspunkt från flödesobservation under borrhning. För varje hål utfördes följande:

- Ventil öppnades för borrhålet och hålet tilläts flöda i 10 min.
- Flödesmätning utfördes med graderat kärl 1 l, 5 l eller 10 l beroende på flöde. Volym samt tid att fylla kärlet, i minuter och sekunder, noterades i protokoll.
- Ventil stängdes och trycket tilläts byggas upp under 10 min. Trycket från manometern noterades i protokollet. Först efter dessa 10 min kunde nästa hål testas, enligt punkterna ovan.

En enklare form av hydraulisk mätning, som tog kortare tid att utföra, genomfördes i sonderingshålen i tunnel TASJ samt experimenttunnlar som injekterades. Manschetter monterades i de 5 sonderingshålen och det mest flödande borrhålet instrumenterades med manometer samt snabbkoppling. De hydrauliska mätningarna utfördes i ett hål i taget. Manschetten öppnades och när flödet hade stabiliserats ställdes en hink fram vid öppningen och hålet tilläts flöda under 30 sekunder eller tid för att fylla 10 liter. Därefter stängdes hålet och mätningen utfördes i nästa hål. Vattentrycket avlästes av entreprenören vid manometern innan injektering av sonderingshål påbörjades.

### 3.5.5 Fortlöpande provning av injekteringsbruk

Fortlöpande provning av injekteringsbruket genomfördes på var fjärde sats per recept och avser att kontrollera blandningens kvalitet i förhållande till förprovningen. Provningsmetoder omfattade densitet (mätmetod Mud balance) och indirekt viskositet (mätmetod Marshkon). Provningsmetoder omfattade flytgränsspänning (mätmetod Yield Stick) fanns tillgänglig som stickprovskontroll. Dåligt eller felaktigt bruk fick inte injekteras.

Provningsmetoden Mud balance mäter brukets densitet genom att en balansvåg med en behållare i ena änden fylls med bruk. Eftersom volymen i behållaren är konstant kan densiteten avläsas på instrumentet.

Provningsmetoden Marshkon mäter brukets indirekta viskositet. Tiden det tar för 1 liter bruk att rinna genom en kon med ett litet hål i botten noteras. Tiden påverkas av hur länge bruket tillåts att härda efter blandning och det är därför viktigt att provningen görs på blandningar som tillåts härda ungefär lika länge för att dessa ska kunna jämföras.

Provningsmetoden Yield stick är en sticka av trä som sänks ned i injekteringsbruket och baserat på sjunkdjupet kan brukets flytgränsspänning bestämmas med hjälp av en graf. Varje enskild Yield stick är individuellt kalibrerad mot en specifik graf, och efter provning kasseras Yield sticken.

Riktvärden för toleranser för densitet uppmätt med Mud balance var den styrande parametern, referensvärdet för Marshkon fungerade som en extra kontroll utöver Mud balance. Tabell 3-5 visar riktvärden för toleranser och referensvärden för provningsmetoderna.

**Tabell 3-5. Föreskrivna riktvärde för toleranser och referensvärden för fortlöpande provning av injekteringsbruk.**

Provningsmetod	Bruk 1	Bruk 2
Mud balance – densitet (riktvärde från teknisk beskrivning)	1,32 ± 0,04 g/cm <sup>3</sup>	1,30 ± 0,04 g/cm <sup>3</sup>
Marshkon – indirekt viskositet (riktvärde från förprovningen)	40 s	38 s
Yield stick – flytgränsspänning (riktvärde från förprovningen)	> 12 Pa, efter 30 minuter. (Stickprovskontroll)	8–10 Pa, efter 30 minuter. (Stickprovskontroll)

## 3.6 Tunneldrivning

Sprängningsarbetet behövde utföras så att funktionskraven < 30 % överberg, inget tillåtet underberg samt minimerad skadezonen kunde uppnås. Dessa funktionskrav är kopplade till att kunna visa att det vid tunneldrivning är möjligt att uppnå en konturhållning som klarar återfyllnadskraven, med minimal utbredning av den från sprängningen skadade zonen i det kvarstående berget. Där innefattas att de tunnlar som byggs ska kunna återfyllas så att den storskaliga hydrauliska konduktiviteten i snitt är som för det berg som togs ut. Det innebär att det är återfyllningen och sprängskadezonen som tillsammans kommer säkerhetsställa att täthetskravet uppfylls. Sambandet mellan återfyllning och bergschakt kan beskrivas på följande sätt:

- Ju snävare tunnelkontur som kan sprängas ut, desto säkrare och effektivare blir återfyllningen.
- Ju mindre omfattande skadezonen blir runt den uttagna tunneln, desto större blir möjligheten att uppfylla täthetskravet.

Erfarenheterna från Fintättningsprojektet (Karlzén och Johansson 2010) var att det var möjligt att uppfylla funktionskraven. Utifrån resultat från Fintättningsprojektet (Karlzén och Johansson 2010) bröts funktionskraven ner till utförandekrav gällande borrhning och laddning samt hur upptändningen ska utföras. Riktlinjer för detta angavs i Teknisk beskrivning tillsammans med övrig handling 13-2 Principutförande för sprängplaner, se bilaga F.

### 3.6.1 Borrhning

Borrhningen är en viktig del för att uppnå önskade geometrier och för att minimera skadezonen. Med god precision och noggrannhet vid borrhningen av hål i kontur och hålraden närmast kontur (hjälparraden) möjliggörs inte bara god konturhållning, utan också att laddningarna kan placeras och anpassas för att minimera skadezonen. Målsättningen var att med utförandekrav och uppföljningar kunna nå kraven för borrhning. Utförandekraven för borrhning redovisas i tabell 3-6. Håldimensionen var 48 mm och håldjupet var 4,5 m för samtliga salvor. Reducerat matartryck tillämpades vid salvborrhning av ansättning. För att det praktiskt ska gå att driva en tunnel utan att minska tunnelarean så behöver borrhålen borras snett (vinklade borrhål), så att slutpunkten på borrhålet kommer utanför teoretisk kontur, så kallad stickning. Den föreskrivna stickningen av konturhålen var inledningsvis 25 cm utanför teoretisk tunnelkontur. Målad kontur på tunnelfronten var föreskriven för att visuellt kunna kontrollera påhuggsnoggrannhet. I projektet användes en fabriksny tvåbomsrigg Sandvik DT 920i med mjukvaran iSURE®. För att säkerställa borrhnoggrannhet enligt uppställda krav på toleranser har regelbunden service och kalibrering genomförts av borrhigen. Kalibrering och service har utförts enligt Sandviks rutiner med ca 1–2 veckors intervall.

**Tabell 3-6. Utförandekrav borrhning.**

Utförandekrav	Radiell avvikelse
Påhuggsnoggrannhet, kontur och hjälparraden	± 7 cm
Tillåten avvikelse vid teoretisk hålbotten, konturhål	± 20 cm

#### **Upprättande av borrhplaner**

Borrhplaner upprättades efter ett navigeringsplan och ett slutpunktsplan med mjukvaran iSURE®. Försättning och hålavstånd har definierats utifrån borrhålens slutpunkter eftersom det är dessa som framförallt påverkar sprängresultatet.

Hålnummeringen i upprättade borrhplaner tillämpades enligt följande princip; det nedre vänstra vägg-hålet har hålnummer 1, varefter ökande nummering sker medsols. Hålnummeringen fortsätter sedan enligt samma princip i hjälparraden och går radvis in mot kilen. Systemet med styrd hålnummering tillämpades för att förenkla utvärdering av borrhning och laddning.

#### **Implementering av borrhplaner**

Upprättade och godkända borrhplaner överförs till borrhigen. I projektet definierades navigeringsplanen utefter den tunnelsektion som var först att inkräkta på teoretisk kontur. Beroende på vilken

tunnelsektion som anges för navigeringsplanet så kan detta ge olika avstånd mellan navigeringsplan och tunnelfront som påverkar indriften per salva. I borrhigen visualiseras borrhålen på en LCD-display. Maskinens programvara markerar borrhålet grönt på LCD-displayen när borroperatören navigerat bommarna enligt korrekt position och vinkel. Toleranserna för bommens avvikelser vid grön markering bestämdes av entreprenören till  $\pm 5$  cm i både ansättning och slutpunkt. Om inte bommen kan uppnå uppställda toleranser vid borrning markeras hålet rött. När grön markering på LCD-displayen har erhållits startar borrningen. Svårigheter vid t ex ojämna påhugg och utrymmesbrist för bommarna har ibland medfört att borrning påbörjats trots röd markering. Vid påbörjad borrning utan korrekt position eller vinkel efterriktar borroperatören bommen efter påbörjad borrning för att sikta in borrhålet mot planerad slutpunkt.

### 3.6.2 Laddning

Emulsion var huvudalternativet för laddning eftersom det var ett krav från teknikutveckling berg att införa effektiviseringar i tunneldrivningsprocessen. Emulsion är den vanligaste laddningsmetoden och den är kostnadseffektiv samt arbetsmiljövänlig. Strängemulsion var föreskrivet i kontur och hjälpare för att begränsa skadezonen. För laddning accepterades det inget spill. Laddning av hålen behöver avslutas så att rätt avladdning uppnås, då emulsionen i hålen jäser och det annars kan finnas risk för att emulsion hamnar på sulan. Renblåsning av laddslang måste utföras i ett särskilt kärl som sedan omhändertogs av leverantören för vidare destruktion.

God kontroll av laddningen är en avgörande faktor för att nå kraven gällande kraven på kontur, skadezon och geometri. Kontrollen berör främst laddningsmängd och typ av sprängämne samt frikoppling (luft kring sprängämnet i borrhålet). Entreprenören tillhandahöll laddutrustning Forcitt Laddenhet 201, med två laddlinjer som registrerade mängden sprängämne precis för varje borrhål i syfte att kunna jämföra utförd laddning mot planlagd laddning. Målsättningen var att med utförandekrav och uppföljningar kunna nå kraven för laddningsmängd i borrhålen. Innan upphandling av Entreprenör fördes diskussioner med leverantörer av sprängemulsion i syfte att fastslå toleranser för laddningsmängd. Utifrån informationen införde projektet krav på laddningstoleranser enligt tabell 3-7.

**Tabell 3-7. Utförande krav på laddningstoleranser.**

Håltyp	Laddningstoleranser
Laddning av konturhål och sulhål	$\pm 0,05$ kg/m
Laddning av hjälpare	$\pm 0,05$ kg/m
Laddning av strosshål	$\pm 0,10$ kg/m
Laddning av kilhål	$\pm 0,10$ kg/m

I projektet användes:

- Kemiitti 810 tillsammans med Gasningsmedel (N9) primärt som emulsionssprängämne (Forcitt Site Sensitized, emulsion explosive, FSE).
- Pentex 25F som primer till FSE.

Vid omskjutningar och funktionsproblem har patronerat sprängämne använts såsom F-rörladdning Ø17, Kemix-A rörladdning Ø22 och Ø25 samt Fordyn Ø29.

Från början var primertyp till bottenladdningen ansatt till en halv patron Dynamit 30 mm av längden 0,19 m för vägg och takhål och i resterande hål var bottenladdningen ansatt till Pentex 25F.

Innan tunneldrivningsstart beslutades det att Pentex 25F används i samtliga hål. Detta medförde ett mer rationellt utförande eftersom olika primertyper inte blandas i salvan. Bottenladdningsvikt med emulsionssprängämne ansattes initialt vid inledande tunneldrivning till 0,3 kg i konturen och 0,4 kg i hjälparna. Oladdad längd för respektive håltyp har föreskrivits enligt tabell 3-8.



**Tabell 3-8. Oladdade längder för respektive håltyp.**

Håltyp	Oladdad längd [m]
Kontur	0,3
Hjälpare/botten	0,55
Stross	0,85
Kil	0,75

Laddenheten registrerar löpnummer, håltyp, och vikt i laddloggen. Vikt för respektive loggning kan inte direkt kopplas till ett specifikt hål i borrplanen. För att möjliggöra spårbarhet av respektive laddningsvikt per hål kopplat till borrplanen har entreprenören dokumenterat laddföljden som tillämpats för respektive salva. Om starthålet där laddningen påbörjades i salvan och turordning som hålen laddades är kända kan sedan laddningsmängden per hål spåras utifrån borrloggen.

Sex olika håltyper finns att tillgå i laddenhetens programvara. Respektive håltyp programmeras med information om begärd laddningsmängd per meter i pipladdningen och begärd bottenladdningsvikt. Programmeringen av vilken laddningsmängd som användes vid respektive håltyp har ändrats under den inledande tunneldrivningen. Den programmering som använts under merparten av projektet och fram till projektets slut redovisas i tabell 3-9.

**Tabell 3-9. Laddningen för olika håltyper enligt laddenhet fr.o.m. salva 8 i TASP och TASU.**

Håltyp enligt laddenhet	Pipladdning [kg/m]	Bottenladdning [kg]	Förklaring
0	–	–	Renspolning
1	0,35	0,4	Kontur
2	0,5	0,5	Hjälpare/Sulhål
4	1,2	0,5	Andra hjälpare sektion A-A och D-D se figur 2-6
5	–	0,2	Toppladdning i samband med extra tändare
6	1,8*	–	Kil/stross

\* Fulladdat hål utan slangdragning.

Vatten i salvhål har stor påverkan på sprängresultatet. Salvhålen behöver därför blåsas torra före laddning. Sulhålens lutas nedåt och p.g.a. sulhålens relativt låga laddningsmängd per meter lutas även bottenhjälparna nedåt eftersom försättningen i annat fall blir för stor. Dubbla rader i sulan med nedåtriktade hål och strängemulsion i kombination med vattenförekomst medför svårigheter vid sprängarbetet. Emulsionssprängmedlet är vattenresistent men eventuell vattenförekomst kan leda till strängavbrott eller ökad skadezon. Vid vattenförekomst i nedåtriktade borrhål har hålen försetts med plaströr (Ø 40 mm), som var förslutna med ett lock för att förhindra vatteninträning. Vid vattenförekomst i uppåtriktade hål har laddning vid behov genomförts med patronerat sprängmedel för att minska risken för avbrott i emulsionsträngen.

### **Service och kalibrering av laddenhet**

För att säkerställa laddnoggrannhet enligt uppställda krav på toleranser har regelbunden service och kalibrering genomförts av laddenheten, enligt Forcits rutiner med ca 1-2 månaders intervall. Utöver Forcits egen service och kalibreringsrutin har kompletterande funktionstester genomförts med laddning av sprängemulsion i genomskinliga plaströr. Plaströren har en inre diameter på ca 40 mm vilket är aningen mindre än ett salvhål. Flera plaströr har sammanfogats för att efterlikna ett borrhål. Sprängemulsion har därefter ”applicerats” i plaströren med slangdragare. Detta medför en visuell kontroll på laddenhetens funktion för respektive laddlinje. Då vikten för respektive rör är känd innan laddning, medför detta att laddningsvikten per meter kan beräknas för både pip- och bottenladdningen. Detta test har inte genomförts med fulladdade plexiglasrör. Kalibrering av laddtrustningen genomfördes både innan och löpande under pågående produktion.

### **Förvaring emulsion**

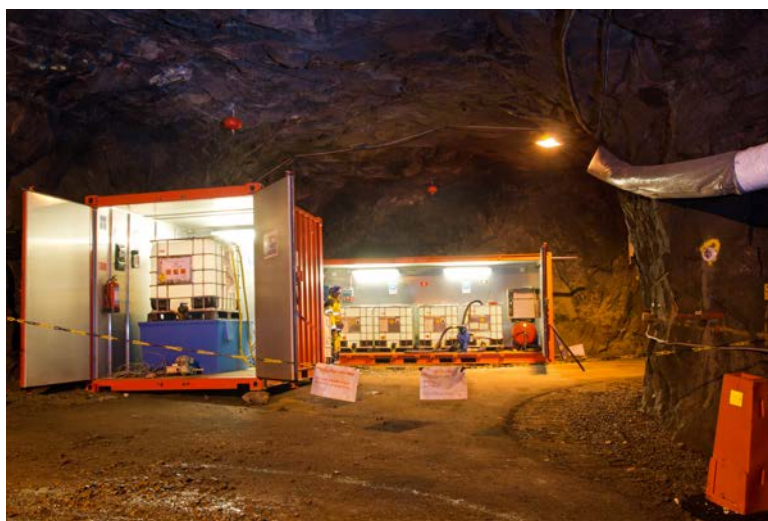
Förvaring av Kemiitti 810 och Gasningsmedel (N9) genomfördes under jord i tunnel TASM belägen på 93-metersnivån. Detta gav fördelar som att kunna hålla jämn kvalitet (temperatur och medför realistiska kalibreringar), ökad säkerhet och tidsbesparande åtgärder då det förvaras närmare planerade sprängningar. Förvaringen under jord medgav också ekonomiska fördelar då uppvärmningskostnader under vintern kunde minskas.

För att kunna utföra förvaring av emulsionssprängämne under jord genomförde projektet tillsammans med entreprenör och leverantör en riskanalys. Riskanalysen sändes till Äspölaboratoriets driftorganisation och Räddningstjänsten Oskarshamn för godkännande innan etablering och inredning av TASM utfördes. Platsen kompletterades med brandslangar, avspärning in till TASM och förbud att utföra heta arbeten närmare än 12 m från brandfarlig vara. Containerarna var utrustade med brandsläckare och TASM kompletterades med brandsläckare i tunneltaket, se figur 3-10.

### **3.6.3 Sprängning**

Borr-, ladd- och tändplanerna är viktiga delar i att minimera skadezon och vibrationer. Föreslagna borr-, ladd- och tändplaner för respektive tunnelsektion var utsänd i förfrågningsunderlaget och var framtagna med underlag från den riskanalys som var upprättad av Bergsäker AB, se vidare avsnitt vibrationer nedan. Grundprincipen var att kombinera pyrotekniska och elektroniska tändare i salvan. Sprängämnet initieras med hjälp av tändare som har olika tidsfördröjningar för de olika laddningarna i borrhålen. Tidsfördröjningen mellan de olika tändarenumren och exakthet för initieringen av samma tändarenummer har en avgörande faktor för fragmenteringen samt för att nå kraven gällande kontur, skadezon och geometri. Initieringen påverkar också vibrationer och luftstötsvågen i samband med sprängning som i sin tur kan påverka närliggande installationer. För att enklast kontrollera detta används elektroniska sprängkapslar, som har en bättre tändspridning (initiering med samma intervallnummer) än de med pyroteknisk fördröjning.

Borrhålen laddades inledningsvis med elektroniska tändare i både kontur- och hjälparhålen. Senare byttes de elektroniska tändarna i hjälparhålen ut till pyrotekniska tändare av typen Nonel LP för att minska risken för ryckare vilket även gav en lägre kostnad. De elektroniska tändarna har varit av typen i-kon VS, som ger en skillnad i intervalltid som är < 1 ms mellan två tändare som programmerats med samma intervalltid. Detta är en förutsättning för att minimera skadezonens utbredning med momentan initiering enligt de försök som Swebrec utfört (Olsson och Ouchterlony 2003). Tändare av typ i-kon VS är en förenklad och billigare variant av i-kon systemet och har samma intervallnoggrannhet som vanliga i-kon systemet medan maximal intervalltid är begränsad till 8 000 ms. För att reducera antalet samverkande laddningar med Nonel LP som kan ge upphov till vibrationer i känslig utrustning har tändplanerna utformats med reduktionsfaktorer enligt (Berg Utbildarna 2005)



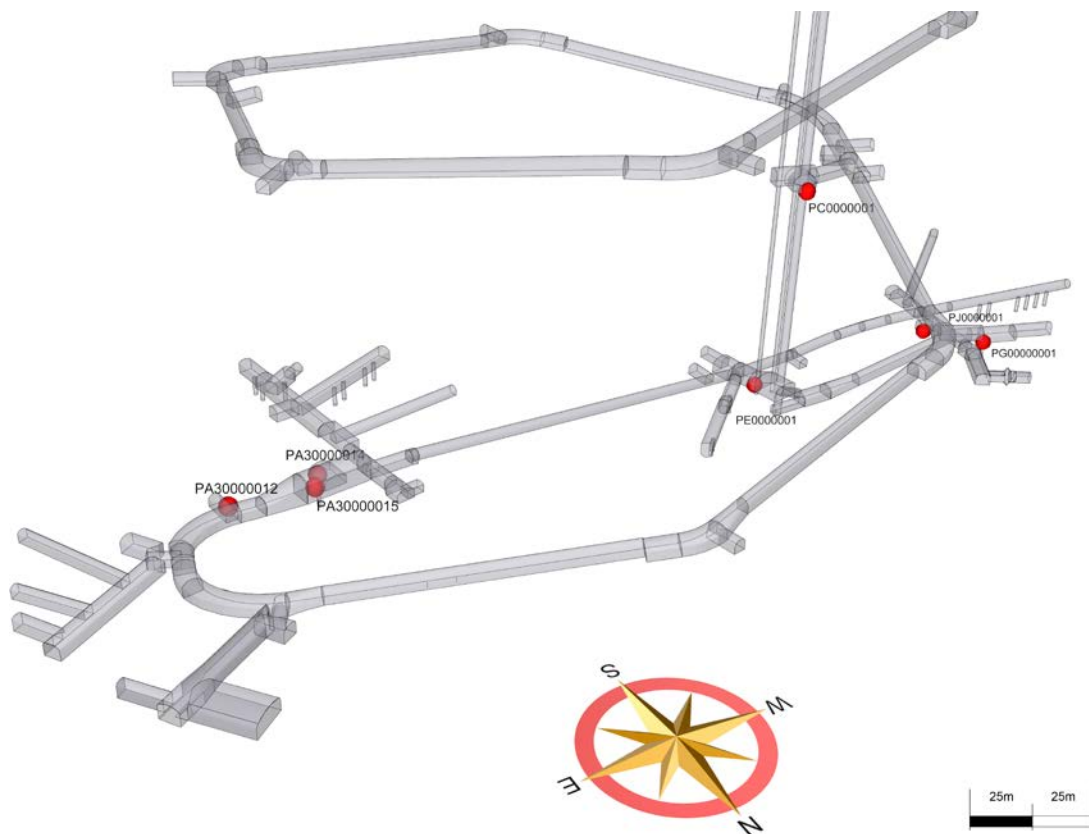
*Figur 3-10. Tunnel TASM där container för gasningsmedel står längst ut och emulsionen står längst in. I taket syns röda monterade brandsläckare.*

## Vibrationer

En riskanalys för sprängningsarbeten upprättades av Bergsäker AB och var en del av förfrågningsunderlaget vid upphandling av entreprenören. Inventering av anläggningen och övriga installationer utfördes inom ett riskområde på ca 100 m radie från arbetsområdena och 8 stycken riskobjekt identifierades, se tabell 3-10 och figur 3-11.  $V_{10}$  redovisar tillåtet vibrationsvärde (mm/s) på 10 meters avstånd från sprängplats. Gränsvärde för aktuell salva beräknas när avståndet mellan sprängplats och objekt är känt enligt SS 4604866:2011. Vibrationsmätning i hisschakt på stannplan -450 m (mät-punkt 2) genomfördes aldrig i enlighet med riskanalys. Riktvärdet på hisschaktet var  $V_{10} = 80$  mm/s. Bedömningen var att vibrationsmätningen på brandväggen i TASE (mät-punkt 3) bredvid kommer att vara begränsande eftersom avståndet mellan de föreslagna vibrationspunkterna är litet och brandväggen har riktvärde  $V_{10} = 50$  mm/s. Vibrationsmätning har genomförts med utrustning i form av instrument Inframaster och Fred04 samt givare. Inframaster har använts till givare som mäter acceleration och Fred04 har använts till givare som mäter svängningshastighet.

**Tabell 3-10. Riskobjekt för vibrationsmätning, vertikal acceleration och vertikal svängningshastighet ( $V_{10}$ , redovisar tillåtet vibrationsvärde (mm/s) på 10 meters avstånd från sprängplats).**

Mät-punkt	ID-kod	Benämning	Mät-riktning	Gränsvärde
1	PG0000001	Mätbod	Vertikal acceleration	2,5 m/s <sup>2</sup>
2		Hisschakt	Vertikal svängningshastighet	$V_{10} = 80$ mm/s
3	PE0000001	Brandvägg	Vertikal svängningshastighet	$V_{10} = 50$ mm/s
4	PJ0000001	Transformator	Vertikal acceleration	30 m/s <sup>2</sup>
5	PA3000014	Mätbod	Vertikal acceleration	2,5 m/s <sup>2</sup>
6	PA3000015	Ställlock	Vertikal acceleration	2,5 m/s <sup>2</sup>
7	PA3000012	Transformator	Vertikal acceleration	30 m/s <sup>2</sup>
8	PC0000001	Hisschakt	Vertikal svängningshastighet	$V_{10} = 80$ mm/s



**Figur 3-11. Vibrationsmätarnas placering i anläggningen i förhållande till utbyggnadsområdena.**

## **Geometrikontroll**

De 3D-modeller som konstruerades med hjälp av programvaran Shape Metrix 3D 3.6 för geologisk kartering med RoCS användes även för geometrikontroller. Programvaran Shape Metrix består av ett antal moduler avsedda för de olika delmoment som genomförs för att bygga och koordinatsätta modellerna. De moduler som används genomgående är i tur och ordning, modulen ”RecAssistent” som skapar 3D-objekt av de foton som tagits i tunneln, modulen ”ModelMerger” som används för att sammanfoga de olika 3D-objekt som skapats i modulen ”RecAssistent” så att de bildar en tunnelsalva. I modulen ”Referencer” koordinatsätts salvorna så att de får en korrekt georeferens. Slutligen sätts samtliga salvor samman i modulen ”Analyst”, ifrån vilken antingen en ytmodell med textur eller en punktdatafil (punktmoln) sedan exporteras.

Geometrikontrollen görs i en för tunnelkontroller avsedd mjukvara, ”GEO Tunneling”. I programmet matas data in för riktning av tunneln, lutning och teoretiskt tunnelkontur samt det punktmoln avseende den tunnelsträckning som avses för kontroll. Vidare ställs parametrar in för avstånd mellan tunneltvärsnitt och vilken sträcka som avses. Beräkningen genererar en grafisk bild av tunnelsektnen med data längs konturen med avvikelser i förhållande till den teoretiska profilen. Den grafiska bilden kan antingen exporteras som PDF- eller DWG CAD-format. Uppgifterna om volymer, area m<sup>2</sup> för varje snitt och intervall mellan snitten mm presenteras i en tabell som exporteras till Excel. Geometrikontroll av tunneltvärsnitt genomfördes var 20:e cm för kontroll av varje salva samt var 5:e cm för kontroll över hela tunneln efter det att denna har drivits klart.

## **3.7 Bergförstärkning**

Direktivet för projektet var inledningsvis att minimal bergförstärkning skulle utföras och sprutbetong inte skulle användas mer än för experimenttunnel TAS08 efter önskemål från KBS-3H. Detta medförde att skydds- och förstärkningsåtgärderna inriktades på skrotning enligt bergrensningsklass 2 i AMA Anläggning 07 och selektiv bergförstärkning med bult. I enlighet med teknisk beskrivning utförs bedömning av omfattning och typ av permanentförstärkning av entreprenören i samråd med beställaren med utgångspunkt från rådande bergförhållanden.

### **3.7.1 Bergbult**

Bedömningen av bergförstärkning i förfrågningsunderlaget baserades på erfarenhet av tidigare förstärka delar av Äspölaboratoriet. I teknisk beskrivning angavs både bergförankring med förspända bultar och bultar utan förspänning. Förspänd bult föreskrevs vara av typ kombinationsbult och de utan förspänning hade inte detta krav. I mängdförteckningen var fördelningen 50/50 mellan bulttyperna.

Innan start av tunneldrivningen föreslog entreprenörens projektchef genomgående användning av Pc-bult (ytbehandlad med Pc-Coat och bricka) inom projektet, dvs en kombinationsbult som går att förspänna med hjälp av en expander och på så sätt uppnå temporär förstärkning direkt utan att hindra tunneldrivningen. I ett senare läge gjuts bulten in och bulten kan bedömas som permanent. Efter samråd med Äspölaboratoriets driftorganisation godkändes användandet av Pc-bult. När det blev aktuellt att montera bult i början av projektet fanns det en önskan från yrkesarbetarna att montera kamjärnsbult enligt SN-metoden i stället, dvs bultar utan förspänning eftersom de bedömde att denna var mer praktisk och att bultsättningen utförs i ett arbetsmoment (ingjutning i samband med bultsättning). Ändringen genomfördes och kamjärnsbultar användes som primär förstärkningsbult och har försetts med bricka. Bultlängd 2,4 m, 3,0 m och 4,0 m har använts inom projektet.

### **Kontroll av bergbult**

Teknisk beskrivning föreskrev att bultarna skulle okulärbesiktigas efter bultsättning. Bulthålen skulle vara helt fyllda med bruk och inget vatteninläckage fick förekomma. Kamjärnsbultar har okulärbesiktigats. Pc-bult okulärbesiktigades inte med avseende på ingjutning, eftersom detta hade krävt nedmontering av samtliga fastgjutna brickor.

Provning var föreskrivet enligt teknisk beskrivning att tillämpas på tio av de första installerade och ingjutna bultarna med Cavimetertest. Bultarna förbereddes för Cavimetertest genom montering av en slang som var försedd med hål. Genom att ansluta en mätcylinder (fylld med kvävgas av ett visst tryck) till cavimeterslangen och registrera tryckfallskurvan, kan kvaliteten på den utförda bergförstärkningen bedömas (Malmfälten, u å). Mätprincipen baseras på allmänna gaslagen:  $pV = nRT$ . Då volym och tryck före respektive tryck efter att mätcylindern anslutits är kända kan de i bergförstärkningen eventuella inneslutna håligheter eller sprickor bestämmas.

Cavimetertestet kompletterades senare med Boltometer i Äspölaboratoriets driftorganisations regi. Boltometertestet mäter inte ingjutningen i de första ca 1,5 m av bulten vilket medför att dessa två kontrollmetoder till viss del kompletterar varandra. Boltometertestet indikerar felaktigheter i form av avsaknad av bruk eller bruk med högt vattencementtal (vct) i ingjutningen. Vid provning med Boltometer (Geodynamik, u å) skickar instrumentet en stötvåg genom bultstålet som benämns som "flexural wave". Vid signaltransporten läcker energi från signalen till berget via bultbruket. Om det finns ihåligheter i bruket så reflekteras vågorna och avläses som eko. Samma sak händer om bultbruket är undermåligt.

### **Vattenförande bulthål**

Teknisk beskrivning föreskrev att bulthål ska vara helt fyllda med bruk och inget vattenläckage får förekomma. Vattenförande bulthål behövde därmed injekteras och borras om. Entreprenören har tillåtit att borra avlastningshål bredvid läckande bulthål. Om endera hålet var torrt monterades bult i detta. Injektering av det läckande hålet har genomförts efter härdning av ingjutningsbruket. Injektering och omborring av bult har vid ett flertal tillfällen inte resulterat i ett torrt hål vid omborring och då har injekteringsbar bult (Thorbolt) monterats. Injekteringsstryck, maxmängd och stopptider för injektering av bulthål har anpassats till rådande förhållanden. Höga tryck vid injektering av bulthål är en arbetsmiljörisk eftersom berget har bedömts vara instabilt och i behov av förstärkning.

### **3.7.2 Sprutbetong**

Fiberarmerad sprutbetong har applicerats primärt i tak inom anläggningen med en tjocklek på 50 mm. Teknisk beskrivning innehöll krav i form av SS/EN-normer och beskrivning på sprutbetong med och utan fiber. Teknisk beskrivning föreskrev även kontroller och tester på sprutbetongen, dock fanns inte något sprutbetongrecept angivet. Efter samråd med entreprenören avropades samma recept på fiberarmerad sprutbetong som Citybanan, (produktnamn: Norrmalm Sprutbetong 35/45 8 S4 LU R3 ANL FM 53). Entreprenören hade tidigare erfarenhet av att arbeta med detta recept.

### **Kontroll av sprutbetong**

Kontroll av bompartier (där vidhäftning mellan sprutbetong och berg inte är tillräcklig) har genomförts på applicerad sprutbetong. Sprutbetongen har bomknackats med skrotspett för att upptäcka eventuella partier med dålig vidhäftning. Entreprenören har ansvarat för kontrollens utförande och bygglösningen har vid ett flertal tillfällen deltagit vid kontrollens genomförande.

Kontroll av tjocklek har genomförts som stickprov med håltagning av fem punkter i ett område på 1×1 m. Områden för kontroll har anvisats av bygglösningen och kontrollen har genomförts av entreprenören.

Kontroll av vidhäftning har genomförts av entreprenören på anvisade lägen av bygglösningen. Lägen för test har till viss del anpassats till vattenförande områden och sedan tidigare utsprängt berg där problem med vidhäftning kunde förekomma.

Kontroll av tryckhållfasthet har genomförts i en serie av 3 prover per påbörjad 1 000 m<sup>2</sup> enligt SS EN 12390-3:2009. Kontroll av sprickhållfasthet och residualhållfasthet har genomförts på balkar (en serie av 3 balkar per påbörjad 2 000 m<sup>2</sup>) enligt SS EN 144488-3:2006.

## 3.8 Kvalitetssäkring och kontroll

### 3.8.1 Projektet

Projektet tog fram en kvalitetsplan med syftet att åstadkomma en gemensam kvalitetsstyrning för projektet. Kvalitetsplanen redogjorde för de dokument som ytterst styrde projektet.

Projektets viktigaste kvalitetsmål var:

- Att leverera resultat med tillräcklig teknisk och vetenskaplig kvalitet med spårbarhet i underlaget.
- Att utnyttja och samordna resurser på ett tids- och kostnadseffektivt sätt.
- Att inom projektet tydliggöra och samordna leveranser av underlag för analys till identifierade intressenter.
- Att säkerställa att kravspecifikationer efterföljs.

Gällande styrande rutiner hämtades på SKB:s interna internetsida för ledningssystemet, vilket säkerställde att aktuella rutiner och instruktioner användes. Styrande dokumentation inom projektet lagrades och hanterades i projektmappen i SKB dokumenthanteringssystem (SKBdoc), där versionshanteringen sker vid varje uppdatering. Vid uppdateringar ansvarade biträdande projektledaren tillika kvalitetssamordnare eller projektadministratören för att informera berörda projektmedlemmar att uppdateringar har skett och förmedla innebörden av uppdateringen. Därigenom säkerställdes att endast aktuella styrande dokument används.

Tabell 3-11 beskriver styrande och stödjande dokument för den övergripande styrningen av projektet och de olika dokumentens syfte. Projektplanen med tillhörande referenser var styrande dokument för delprojekten. Delprojekten skapade inga egna övergripande styrande dokument förutom delprojektplaner och aktivitetsplaner.

**Tabell 3-11. Styrande dokument för den övergripande styrningen av utbyggnaden av Äspölaboratoriet 2011–2012.**

Styrande dokument	Syfte
Projektdirektiv och projektplan	Redogör övergripande för <b>vad</b> som ska göras och <b>varför</b> samt på övergripande nivå <b>vem, när, var, hur</b> och budget för detta.
Projektdirektiv för delprojekten och delprojektplaner	Preciserar <b>vad</b> som ska göras och <b>varför</b> samt <b>vem, när, var</b> och <b>hur</b> . Samt bryter ner budgeten på delprojektnivå.
Kvalitetsplan	<b>Styrande</b> för hur olika delar av projektets arbetsuppgifter ska utföras och vem som ansvarar för vad.
Aktivitetsplan	Preciserar olika aktiviteter mer i detalj avseende <b>vem, när, var</b> och <b>hur</b> , samt anger <b>hur</b> data från aktiviteten ska hanteras och lagras.
Beslutsprotokoll	Innehåller information om <b>beslut och ändringar</b> i projektet som godkänts av beställaren.
Informationshanteringsplan	Beskriver dokumentation och data som produceras i projektet samt <b>hanteringen</b> av dem.
Kravspecifikationer	Sammanställer kärntressentens <b>krav</b> och <b>önskemål</b> på experimentplatsen (avsnitt 2.2).

### 3.8.2 Tunnelentreprenaden

Inför framtagning av förfrågningsunderlaget såg projektet över erfarenheterna ifrån Fintättningsprojektet (Karlzén och Johansson 2010). Detta förarbete resulterade i utförande- och materialkrav samt de kontroller som behövde utföras beskrevs i teknisk beskrivning och låg sedan som grund för att upprätta kontrollplaner. Sex stycken kontrollplaner upprättades i projektet i samråd med entreprenören:

- Kontrollplan nr 1 – 1. Borrning salvhål, 2. Borrning injekteringshål.
- Kontrollplan nr 2 – 1. Laddning salva, 2. Sprängning salva, 3. Omskjutning.
- Kontrollplan nr 3 – Injektering.
- Kontrollplan nr 4 – 1. Skrotning, 2. Bultning.
- Kontrollplan nr 5 – 1. Sprutbetong, 2 Bergnät.
- Kontrollplan nr 6 – Arbetsutrustning.

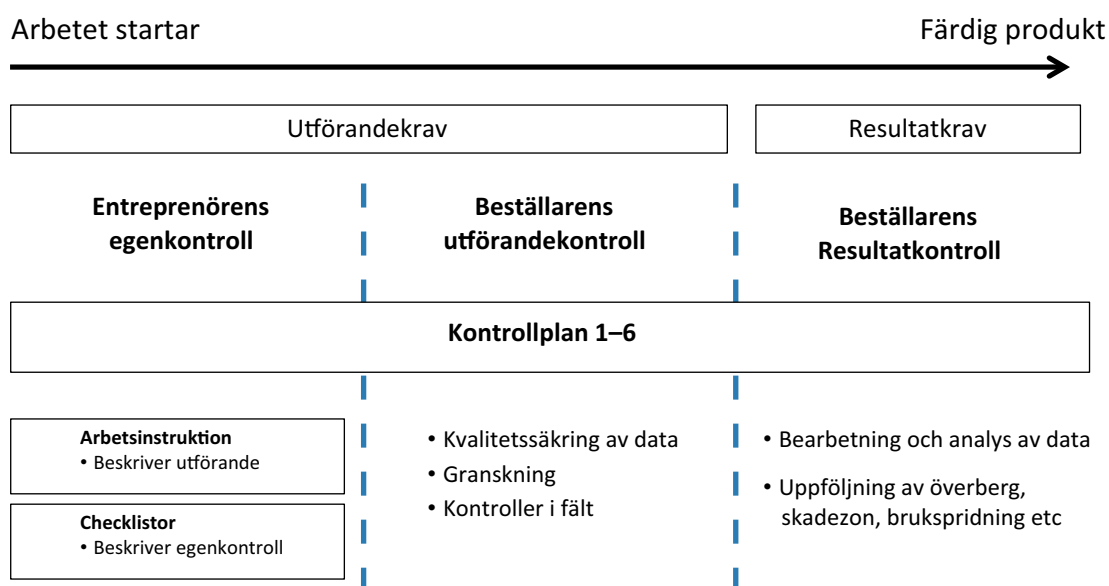
I kontrollplanerna samlades samtliga kontrollmoment som genomfördes under entreprenaden, både entreprenörens egenkontroll och beställarorganisationens utförandekontroll. Delar av beställarorganisationens resultatkontroll fanns också med i kontrollplanerna för att samtliga skulle få en bra bild av kontrollernas omfattning och syfte. Figur 3-12 visar hur krav, olika produktionsrelaterade dokument och aktiviteter samverkar med kontrollplanerna. Revideringar har genomförts av kontroller och utförande, löpande under tunnelproduktion.

För att förtydliga de olika kvalitetsrelaterade kontrollmomenten valde entreprenören att upprätta arbetsinstruktioner och produktionschecklistor för att stödja yrkesarbetarna. Yrkesarbetare läste igenom arbetsinstruktionerna och signerade produktionschecklistor efter hand som de olika momenten utfördes. Signering genomfördes av flera punkter för varje aktivitet.

Projektet upprättade tillsammans med entreprenören ett underrättelsesystem för att formellt kunna meddela förändringar till varandra. I mallen kunde olika inriktningar väljas som

- avvikelse,
- störning,
- underrättelse,
- förbättringsförslag,
- fråga-svar.

Ett underrättelsesystem ger bra möjligheter för att tydligt och formellt informera inblandade parter vad som gäller eller vilka frågeställningar som behöver besvaras. För att få snabbare acceptans hos entreprenören lade projektet också till en kort bakgrund med motivering varför en ändring av utförandet genomfördes.



**Figur 3-12.** Schema som illustrerar kontrollprogram för tunnelentreprenaden.

## 4 Genomförande och resultat

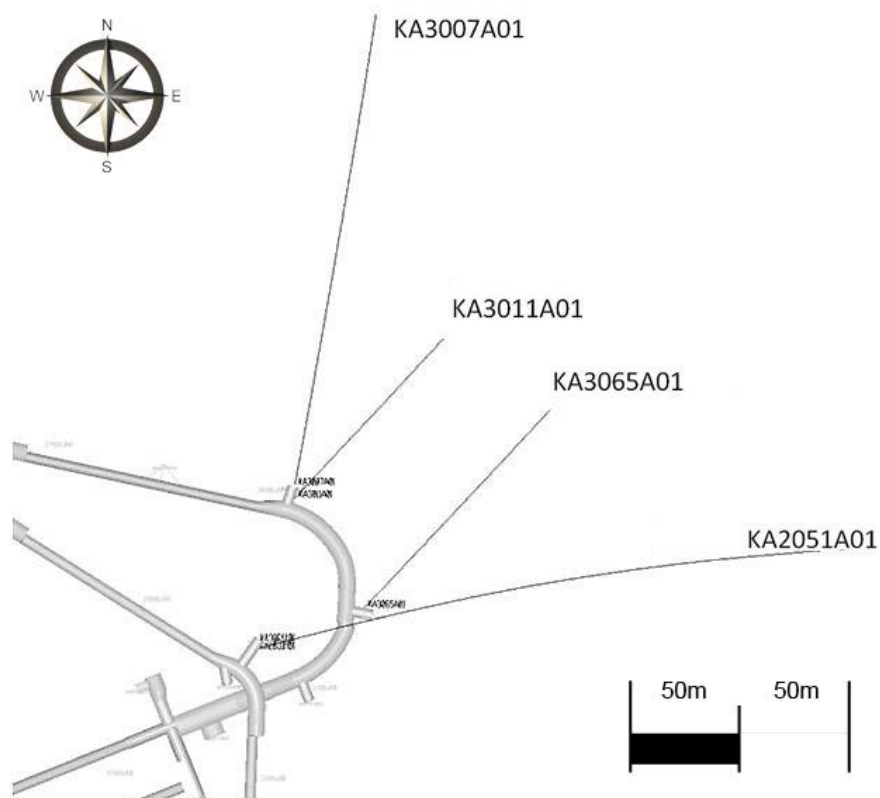
### 4.1 Karakterisering

Förundersökningarna omfattade borrhning av två stycken undersökningshål KA2051A01 och KA3007A01 vilka borrades avgränsande till utbyggnadsvolymen. Två stycken pilotborrhål KA3011A01 samt KA3065A01 borrades inom tunnelkonturen för transporttunnlarna TASU och TASP, se figur 4-1 och tabell 4-1.

För utbyggnaden av TASJ och TAS01 utfördes undersökningar i befintligt borrhål KJ0050F01 (se figur 4-12). I tabell 4-2 ses vilka detaljundersökningar som genomförts i respektive borrhål.

Tabell 4-1. Bäring, inklinations och längd för projektets undersökningshål och pilothål.

	KA2051A01	KA3007A01	KA3011A01	KA3065A01
Bäring	86,62°	22,16°	54,97°	55,35°
Inklimination	-35,01°	-14,35°	-1,18°	-0,56°
Längd	319,84 m	227,76 m	100,15 m	125,25 m



Figur 4-1. Lägen för projektets undersökningshål och pilothål.



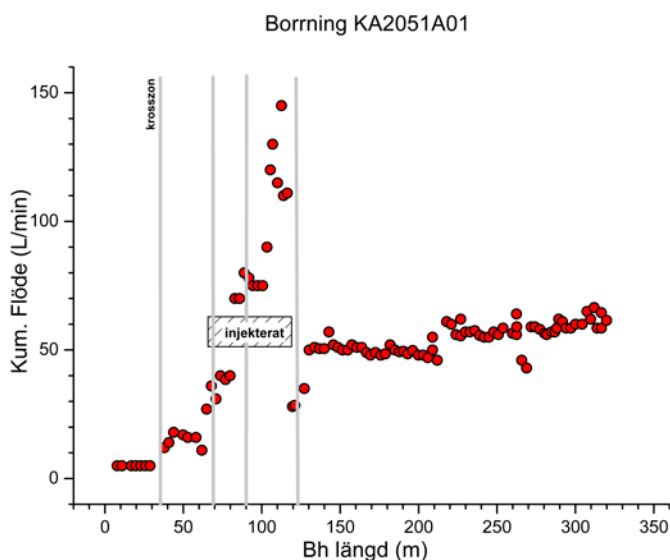
**Tabell 4-2. Genomförda detaljundersökningar i respektive borrhål (x: utfört, -: ej utfört). Med responstester avses hydrauliska responser vilka genereras av annan aktivitet än riktade interferenstester. Exempel på sådan respons är en hydraulisk störning som borring genererar i monitoringsystemet HMS (Hydro Monitoring System).**

Undersökningar	Förundersöknings- borrhål KA3007A01 (320 m)	Förundersöknings- borrhål KA2051A01 (227 m)	Pilotborrhål KA3011A01 (100 m)	Pilotborrhål KA3065A01 (125 m)	Befintligt kärnborrhål KJ0050F01 (47 m)
Borring, inflöden och tryck	x	x	x	x	x
Responstester	x	x	x	x	-
Krökningsmätning Maxibor och Flexit	x	x	x	x	-
Interferenstester	x	x	x	x	-
BIPS – borrhåls TV	x	x	x	x	x
Geofysisk loggning	x	x	x	x	x
Radarloggning	x	x	x	x	x
Översiktskartering	x	x	x	x	x
Boremapkartering	x	x	x	x	-
Geologisk enhålstolkning	x	x	x	x	-
Förenklad geologisk enhålstolkning	-	-	x	x	-
Flödesloggning PFL	x	x	x	x	-
Injektionstester	x	x	-	-	x
Hydrogeokemisk provtagning	x	x	x	x	x

#### 4.1.1 Förundersökningshål KA2051A01 och KA3007A01

##### KA2051A01

Kärnborrhålet KA2051A01 borrades först till ca 119 m där ett totalflöde på ca 157 l/min och ett vattentryck på 2 500 kPa konstaterades och fortsatt borring stoppades. Borrhålet injekterades då mellan hållängd 67 till 119 m med ett cementbaserat injekteringsbruk (vct 0,8) och ett övertryck på 1 000 kPa under 50 min. Ackumulerade vatteninflöden registrerade i DMS under borring av KA2051A01 redovisas i figur 4-2. Även läge av mindre krosszoner från översiktskarteringen samt injekterad sektion redovisas. Borrhålet instrumenterades efter att undersökningarna var avklarade i tio sektioner, se tabell 4-3.



**Figur 4-2.** Vatteninflöden registrerade i DMS under successiv borring i. Läge av mindre krosszoner från översiktskarteringen visas som gråa streck och injekterad sektion visas som streckad ruta.

**Tabell 4-3. Manschetterade sektioner i borrhål KA2051A01.**

Nummer för instrumenterad sektion	Startsektion (m)	Slutsektion (m)
1	277	319,84
2	235	277
3	204	234
4	136	203
5	120	135
6	96	119
7	76	95
8	68	75
9	51	67
10	7	50

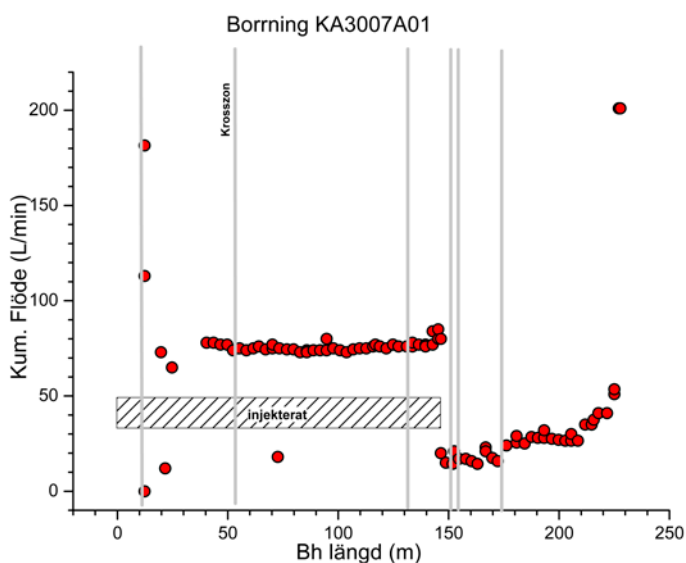
### KA3007A01

Kärnborrhålet KA3007A01 borrades till ca 12,36 m då ett totalflöde på ca 200 l/min påträffades. Borrhålet injekterades då med ett cementbaserat injekteringsbruk (vct 0,7) mellan 3,90 och 12,36 m. Stopstrycket var satt till 3 000 kPa över aktuellt grundvattentryck, dock uppstod problem med injekteringsutrustningen och trycket sjönk efter 10 minuter ner till aktuellt grundvattentryck 3 200 kPa. Injekteringen var ändå lyckad och åstadkom att täta vatteninflödet i borrhålet.

Borrhålet borrades därefter till 146,5 m varefter beslut togs att en selektiv hålfyllnad (cement, vct 0,6), genomfördes mellan 12 och 17 m för att täta ett flöde på 47 liter. Vid hålfyllnaden släppte Van Ruth bottenpacker från 17 m och åkte ner till hålbotten. Detta uppdagades senare när cementen i borrhålet borrades ur. Hålet var då cementfyllt från 12 m till 146,5 m och inte från 12 till 17 m.

Kärnborrhålet KA3007A01 avslutades vid 227,76 m där ett vatteninflöde på 150 l/min påträffades. En sista injektering genomfördes då mellan 216,62 m och borrhålets botten 227,76 m (cement, vct 0,8). Injekteringen misslyckades då rörsträngen gick sönder och rödfärgat bruk pumpades utanför rörsträngen och bruk trycktes därmed nerifrån hålbotten och upp i borrhålet.

Vid kärnbörning av KA3007A01 blev det korta kärnupptag trots att berget inte var nämnvärt sprickigt. Ackumulerade vatteninflöden registrerade i DMS under borring av KA3007A01 visas i figur 4-3. Även läge av mindre krosszoner från översiktskarteringen samt injekterad sektion visas. Det injekteringsbruk som trycktes nerifrån 216,62 m och upp i borrhålet visas ej i figuren. Detta då sträckan hur långt bruket trycktes upp i borrhålet inte har kunnat identifieras. Borrhålet hålfylldes sedan innan tunneldrivningen startade.



**Figur 4-3.** Vatteninflöden registrerade i DMS under successiv borring i KA3007A01. Läge av mindre krosszoner från översiktskarteringen visas som gråa streck och injekterad sektion visas som streckad ruta.

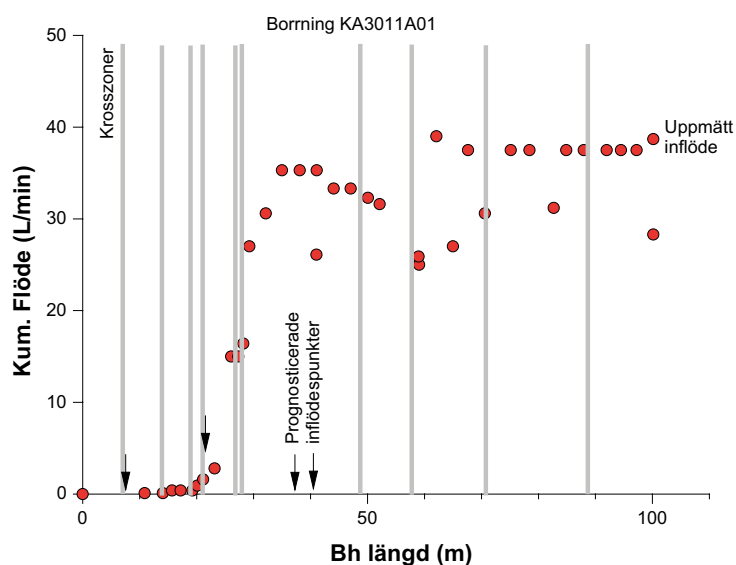
## 4.1.2 Pilotborrhål KA3011A01 och KA3065A01

### KA3011A01

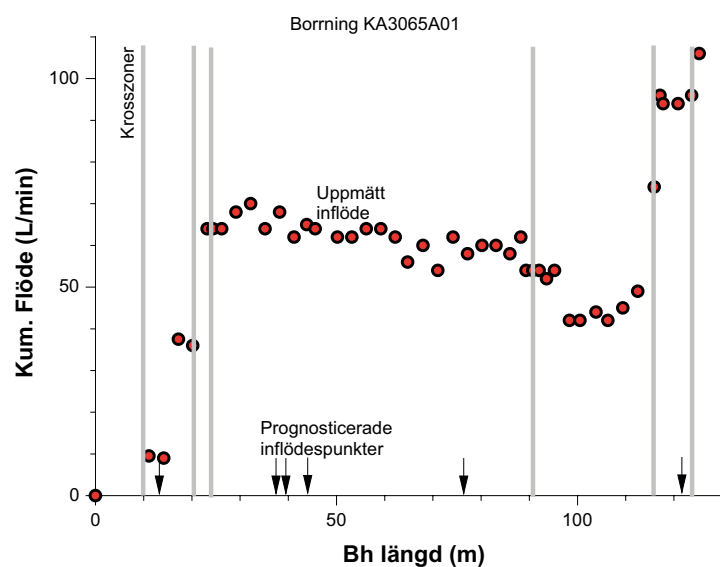
Pilotborrhålet KA30011A01 borrades till 100,15 m. Ackumulerade vatteninflöden registrerade i DMS under borrning av KA3011A01 visas i figur 4-4. Även prognostiserat inflöde från modell M1 samt läge av mindre krosszoner från översiktsskarteringen visas. Borrhålet hålfylldes med cement innan tunneldrivningen startade.

### KA3065A01

Pilotborrhålet KA30065A01 borrades till 125,25 m. Ackumulerade vatteninflöden registrerade i DMS under borrning av KA3065A01 visas i figur 4-5. Att vatteninflödet minskar med borrhålslängden har tolkats som att systemet dräneras. Även prognostiserat inflöde från modell M1 samt läge av mindre krosszoner från översiktsskarteringen visas. Borrhålet hålfylldes med cement innan tunneldrivningen startade.



**Figur 4-4.** Prognos och Vatteninflöden registrerade i DMS under successiv borrning i KA3011A01. Läge av mindre krosszoner från översiktsskarteringen visas som gråa streck och läge för prognostiserade inflödespunkter visas som svarta pilar.



**Figur 4-5.** Prognos och vatteninflöden registrerade i DMS under successiv borrning i KA3065A01. Läge av mindre krosszoner från översiktsskarteringen visas som gråa streck och läge för prognostiserade inflödespunkter visas som svarta pilar.

### Respons och interferenstester i pilotborrhål

Interferenstesterna i pilothålen utfördes genom att sektioner i pilotborrhålet KA3065A01 flödades enskilt och observationer genomfördes i det andra pilotborrhålet KA3011A01, se tabell 4-4.

**Tabell 4-4. Genomförda interferenstester i pilothålen där sektioner i KA3065A01 flödades enskilt och tryckresponser observerades i KA3011A01.**

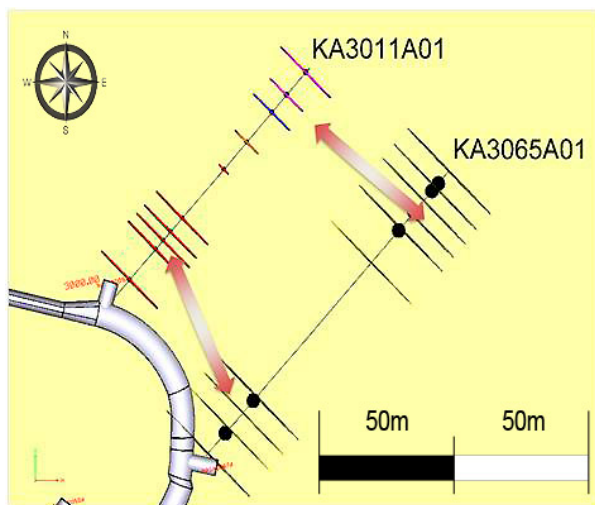
KA3065A01	Flödande sektion 1–12 m	Flödande sektion 19–26 m	Flödande sektion 85–100 m	Flödande sektion 106–112 m	Flödande sektion 112–118 m	Flödande sektion 118–125 m
Observerad sektion i KA3011A01 (m)	Påverkan i grundvattentryck (responser) i KA3011A01 (m)					
93–105,15	0,00	0,00	0,00	0,00	1,50	7,50
85–2	0,00	0,40	1,60	0,00	1,80	2,50
76–84	0,00	0,60	3,20	0,00	2,40	1,60
63–75	0,00	0,60	1,10	0,00	1,30	0,75
42–62	0,00	0,35	0,00	0,00	0,30	0,00
30,5–41	3,40	8,40	0,00	0,00	0,00	0,00
28–29,5	3,40	8,50	0,00	0,00	0,00	0,00
22–27	4,20	9,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17–21	5,40	10,20	0,00	0,00	0,00	0,00
4–16	6,20	10,60	0,00	0,00	0,00	0,00

Generellt visade respons- och interferenstesterna en betydande hydraulisk kontakt mellan de yttre delarna (cirka 0–40 m) av KA3011A01 och KA3065A01 samt mellan de inre delarna (cirka 80 m – botten av borrhålen). Området i partiet mellan 40 m–80 m är lågpermeabelt med en mindre hydraulisk konnektivitet, se figur 4-6.

### 4.1.3 Tunnelkartering med RoCS

#### TASJ med tunnel TAS01

Ambitionen när det gällde karteringen av TASJ och TAS01, som var den inledande tunneldrivningen, var att karteringen skulle utföras både med det gamla analoga/digitala karteringssystemet TMS och med det nya digitala systemet RoCS.



**Figur 4-6.** Respons- och interferenstest där sektioner i KA3065A01 flödades enskilt (cirklar) och tryckresponser observerades i KA3011A01 (linjer). Respons- och interferenstesterna visar på hydraulisk kontakt i de övre respektive nedre delarna och med ett tätt parti däremellan.

Det visade sig snabbt att ambitionen att kartera med båda systemen blev väldigt tidskrävande. I det här skedet stod det klart att karteringen med RoCS, då det var ett nytt system, tog lång tid (3–4 timmar). Förlängningen av TASJ och den nya tunneln TAS01 karterades då med TMS för att minska stillestånd för tunneldrivningen, då drivningen endast genomfördes på en front. Väggar, tak och fronter fotograferades dock med den för fotogrammetrin anpassade kameran. Data och grafiska objekt överfördes sedan från TMS till RoCS på kontoret. Det gällde såväl frontkartering som geologisk kartering av väggar och tak.

### **TASP och TASU samt experimenttunnlar**

För transporttunnlarna TASP och TASU samt experimenttunnlarna användes RoCS uteslutande vilket innebar ett första test av systemet i tunnelproduktion.

För huvudtunnlarna TASU och TASP karterades varje front med RoCS då den geovetenskapliga modellen behövdes byggas upp för fastläggning av experimentplatserna och all geologisk och hydrogeologisk information var av stor vikt. Förberedelserna för, samt karteringen med RoCS skapade stillestånd i tunnelentreprenaden. Då tidsplanen behövde optimeras diskuterades åtgärder med referensgruppen. En åtgärd som vidtogs var att frontkartering i experimenttunnlarna endast utfördes i första och sista front samt vid de fronter som sammanföll med en injekteringsskärm. Det bedömdes att karteringen av väggar och tak gav tillräckligt med information för att sammanställa modell M3 som stöd för de framtida experimenten. Detta medförde att i experimenttunnlarna genomfördes inte en fullständig frontkartering. Tunnelfronten fotograferades endast för fotogrammetrins skull och den ”analog” översiktskartering av tak och väggar genomfördes.

Geologisk kartering av väggar och tak utfördes när entreprenadarbetet var förlagd till någon annan tunnel eller var av sådan karaktär att det gick att samsas i samma tunnel. Karteringsarbetet fick under en period i första hand koncentrera sig till de delar som behövde förstärkas med sprutbetong (tak och anfang), vilket innebar att ej sprutade ytor fick karteras i efterhand. Flera av experimenttunnlarna blev karterade först efter det att själva tunnelentreprenaden var avslutad.

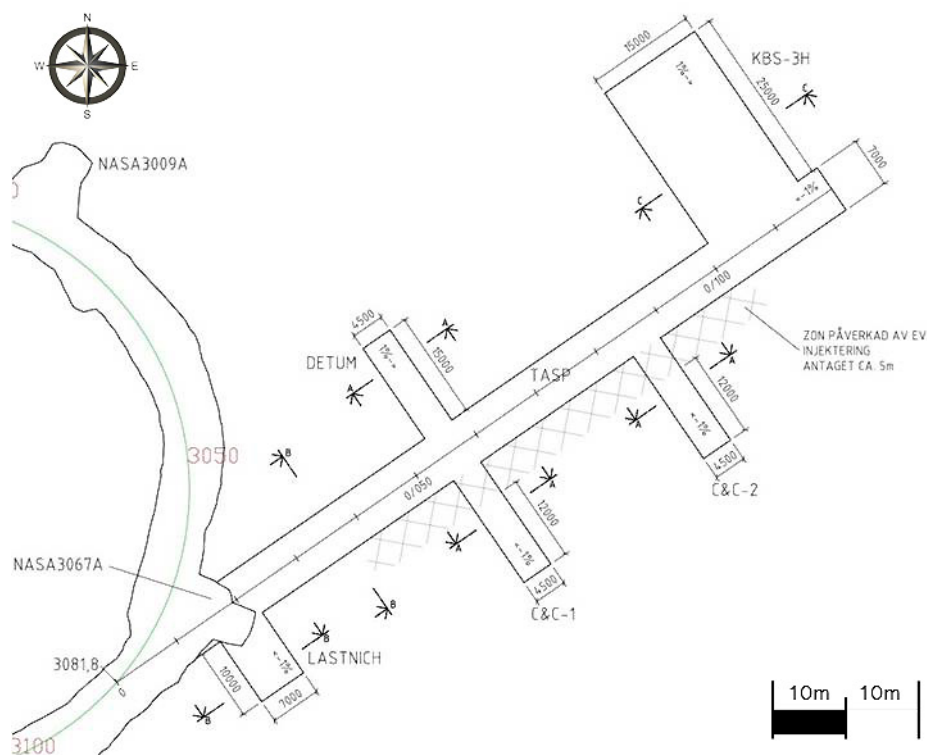
## **4.2 Projektering**

### **4.2.1 Förberedande arbete inför upphandling**

Utifrån intresseanmälan fanns beställning på experimentplatser från Valvpluggsprojektet, KBS-3H, Concrete and Clay och DETUM-1. Projektet behövde utifrån förutsättningarna i befintlig anläggning och kraven från intressenterna projektera utrymmen och bedöma antal meter transporttunnel som behövdes för att tillfredställa identifierade behov inom ramen för utbyggnaden. Första layouten som togs fram utgick från en transporttunnel från nischen NASA3067A och alla experimenttunnlar utgående från denna tunnel, se figur 4-7. Tunneldrivningen planerades då innefatta 130 m transporttunnel med tillhörande 75 m experimenttunnlar. Projektet projekterade för minimalt med injektering och bergförstärkning och fokus låg på att försöka effektivisera tunnelproduktionen för att effektivt undersöka, täta och driva tunneln.

Många frågor som angränsade till befintlig anläggning behövde hanteras under projekteringsarbetet där inga rutiner fanns, såsom förstärkning och vilket material som behövde användas. Dessutom bedömdes utbyggnaden påverka ett antal befintliga borrhål i anläggningen som var mätobjekt inom Hydro Monitoring System (HMS), vilket resulterade i att en utredning fick genomföras för att bedöma vilka borrhål som behövde hålfyllas och vilka borrhål som kunde behållas.

I nischen NASA3067A hade ett experiment med radionuklider (LTDE-SD) utförts i ett antal borrhål (Widestrand et al. 2010). Nischen har sedan experimentet avslutats friklassats radiologiskt, så inga särskilda restriktioner gäller för arbeten i detta utrymme. Dock innefattar inte den radiologiska friklassningen borrhålet KA3065A03 som delvis behövde sprängas bort vid drivningen av tunnlar. En arbetsbeskrivning togs fram som beskrev hantering av borrhålet i samband med utbyggnaden. Strålskyddare behövde finnas på plats efter det att spränggaserna vädrats ut för att kontrollera och ta prover på bergmassorna. Efter bortsprängning av experimenthålet KA3065A03 fick inte bergmassor flyttas innan strålskyddare utfört analys av proverna och friklassat dessa.



**Figur 4-7.** Första layouten där experimenttunnlarna erhållit arbetsnamn efter intressenternas projektnamn.

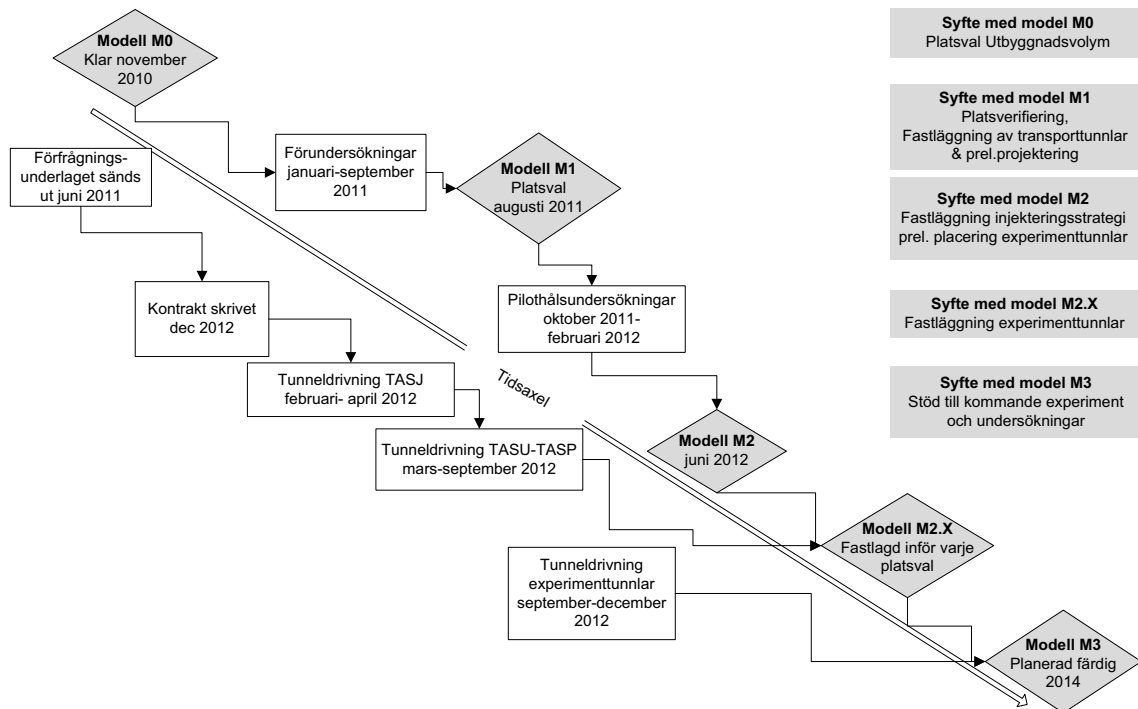
Framtagande av principutförande för borr-, ladd- och tändplaner gjordes i samråd med projektledaren för projekt RESKONTR för att omhänderta krav på kontur och skadezon från teknikutveckling berg. I handlingen fanns principutförande för borr-, ladd- och tändplan för respektive tunnelsektion. Dessa låg som grund för prissättning i förfrågningsunderlaget avseende hur sprängningsarbetet skulle utföras. Entreprenören ansvarade sedan för att upprätta borr-, ladd- och tändplaner anpassade till entreprenörens maskiner och utrustningar utifrån principutförandet.

#### 4.2.2 Upphandling

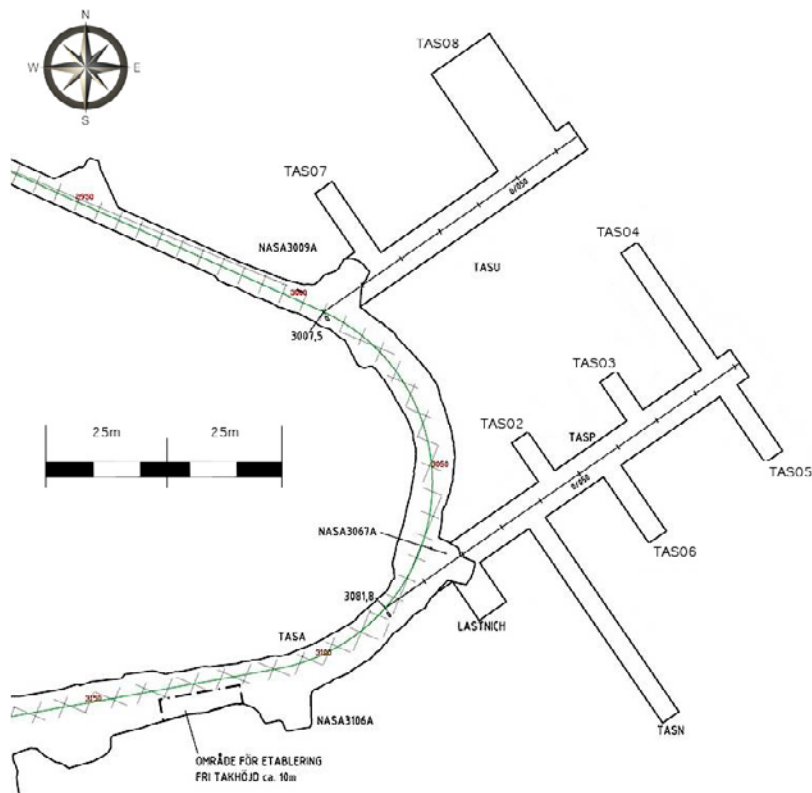
Under tiden som förfrågningsunderlaget togs fram tillkom det en del ändringar i projektet, se avsnitt 3.2.1, som tog mycket tid i anspråk. Tidsplanen för framtagning av handlingarna var ganska pressad och förundersökningar samt utvärderingar låg efter i tidsplan för framtagning av underlag för beslut av platsval baserat på Modell M1, se figur 4-8. Då projektet inte tilläts förskjuta tidsplanen för upphandlingen och start tunneldrivning, baserades förfrågningsunderlaget främst på modell M0 (se avsnitt 2.3) samt tidigare genomförd tunnelkartering i huvudtunneln TASA. Beslut om platsval baserades på Modell M1 och genomfördes efter att förfrågningsunderlaget hade skickats ut.

Under tiden som förfrågningsunderlaget arbetades fram, togs ett sent beslut att också driva 100 m tunnlar åt SKB International och Nova FoU. Detta medförde mycket merarbete eftersom teknisk beskrivning och mängdförteckning fick skrivas om. För omfattning av handlingar i förfrågningsunderlaget, se bilaga F. Layouten utvidgades nu till två stycken transporttunnlar TASP vid NASA3067A och TASU vid NASA3009A, se figur 4-9. Tunneldrivningen omfattade 170 m transporttunnlar och 175 m experimenttunnlar. Tunneldrivningen planerades nu för att utföras först i transporttunnlarna för att ge underlag till den geovetenskapliga modellen för att därefter fastlägga experimenttunnlarna.

Pilotborrhålen borrades och undersöktes i ett sent skede, efter att kontraktshandlingarna med entreprenören hade tagits fram. Detta medförde att injekteringsstrategin fick baseras på modell M1, då modell M2 inte fanns fastlagd enligt plan.



**Figur 4-8.** Utfall tidsplan fastlagda modeller M1-M2 i relation till utsänt förfrågningsunderlag, skrivet kontrakt och start tunneldrivning.



**Figur 4-9.** Layout till förfrågningsunderlaget.



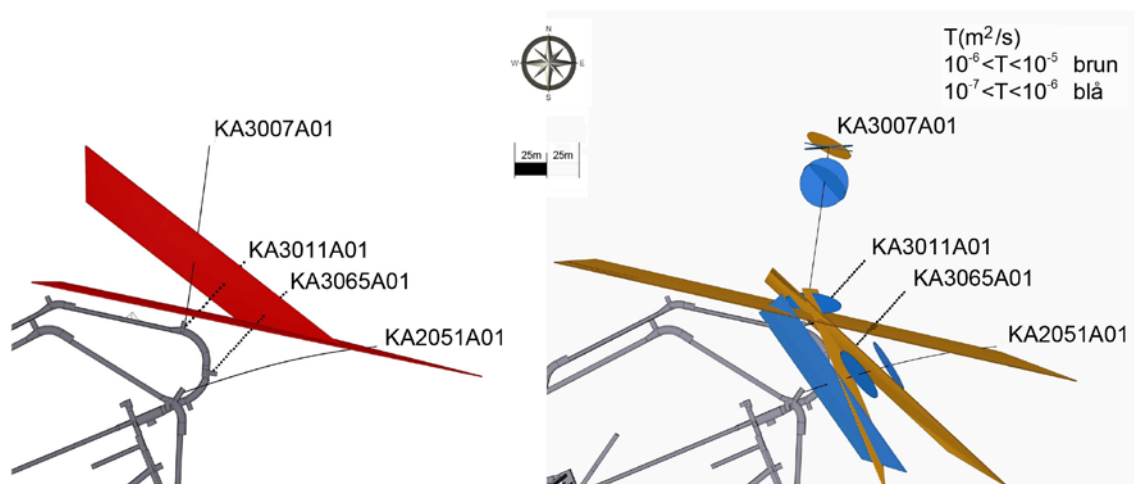
### 4.3 Geovetenskaplig modellering

Enligt plan behövde projektets modeller ligga framme som underlag för geovetenskapliga prognoser för platsval, underlag för förfrågningsunderlag, fastläggning av strategi för injektering och fastläggning av läge för experimenttunnlar, se figur 3-8. I början av projektet låg inte förundersökningar, undersökningar i pilotborrhålen och fastläggning av de geovetenskapliga modellerna M1 och M2 i fas, se figur 4-8. Det var först vid fastläggning av experimentplatser som modellerna M2.1-M2.4 fanns fastlagda som underlag inför varje plastval.

#### 4.3.1 Geovetenskaplig modell M1

En geovetenskaplig modell M1 togs fram baserat på Modell M0 (se avsnitt 2.3) samt data från de två förundersökningsborrhålen, KA2051A01 och KA3007A01, för att bekräfta lämpligheten av experimentvolymen och för att göra prognoser som underlag för en preliminär tunnellost. Den geologiska enhålstolkningen av KA2051A01 (se bilaga B, Carlsten et al. 2013a) och KA3007A01 (se bilaga C, Carlsten et al. 2013) visade att berggrunden i den för utbyggnad tilltänkta bergvolymen uppvisar en för Äspö typisk bergartsvariation, dvs volymmässig dominans av Äspödiorit med mer eller mindre stora inslag av Ävrögranodiorit, samt underordnade inslag av granit, finkornig granit, gabbroid-dioritoid och diorit-gabbro. Ingen observation av plastisk deformation, dvs förekomst och intensitet av foliation, plastiska skjuvzoner etc gjordes inom ramen för den översiktliga karteringen av borrhålen. Tolkning av responstester vid borrhålen av förundersökningsborrhålen, KA2051A01 och KA3007A01, tillsammans med övriga undersökningsresultat utgjorde underlag för en tolkning av läge av vattenförande strukturer. De genomförda injekteringarna i KA2051A01 och KA3007A01 påverkade ej responstesterna då responstester vid borrhålen genomfördes innan injektering utfördes.

Figur 4-10 visar den geologiska och hydrogeologiska modellen M1. Observera att geologiska deformationszoner och hydrauliska konduktiva strukturer (HCF) avbildas från ovan vilket innebär att vissa ser skenbart bredare ut beroende på vilken stupning (lutning) deformationszonen eller den hydrauliska strukturen har. För M1 modellerades två deformationszoner (Possible Deformation Zone, PDZ) och sex hydrauliska konduktiva strukturer (Hydraulic Conductive Feature, HCF). I den hydrogeologiska modellen visas också anomalier i vatteninflöde under kärnboringen (High Flow Anomaly, HFA).



**Figur 4-10.** Toppyvy av modell M1 över utbyggnadsområdet vid -410 nivå. Vänster: Geologisk modell M1, röda skivor deformationszoner. Höger: Hydrogeologisk modell M1, blåa skivor hydrauliska konduktiva strukturer (HCF) och blåa diskar anomalier i vatteninflöde under kärnboringen (High Flow Anomaly, HFA)  $10^{-7} < T < 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, bruna skivor HCF  $10^{-6} < T < 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s.



För den hydrogeologiska modellen kunde konstateras:

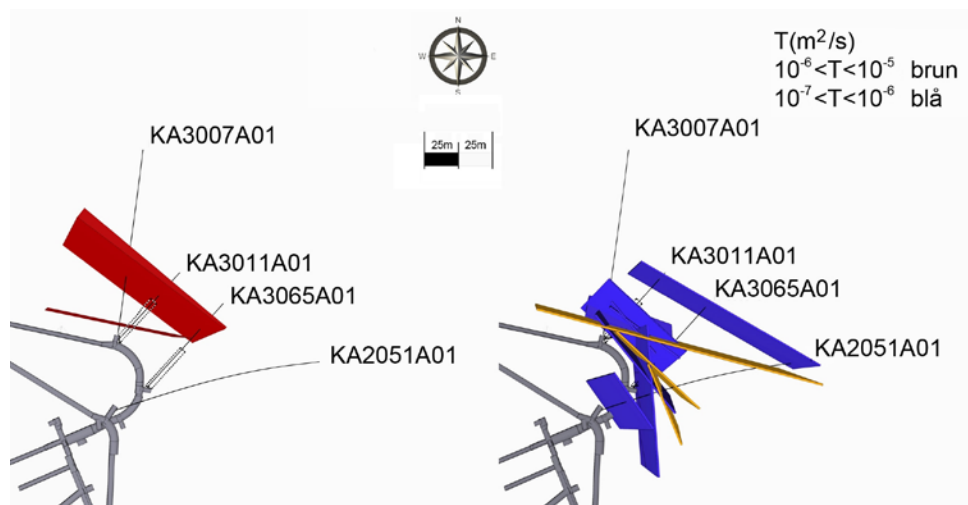
- Bakgrundskonduktiviteten var omkring  $1,4 \cdot 10^{-8}$  m/s baserat på injektionstester i 3 m och 5 m sektioner.
- Ett fåtal inflöden med mycket hög transmissivitet förekom främst orsakade av möjliga mindre lokala deformationszoner (LMDZ).
- Grundvattentrycket i KA3007A01 var högre än i KA2051A01, uppemot 3 900 kPa vattenpelare i KA3007A01 jämfört med 2 600 kPa vattenpelare i KA2051A01.

#### 4.3.2 Geovetenskaplig modell M2

En geovetenskaplig modell M2 togs fram baserat på Modell M1 (se avsnitt 4.3.1) samt data från de två pilotborrhålen, KA3011A01 och KA3065A01. De grundläggande byggstenarna av den geologiska modellen var möjliga deformationszoner (PDZ) och bergarter identifierade och karakteriserade med hjälp av den geologiska enhålstolkningen (SHI). Den geologiska enhålstolkningen användes därefter för att bestämma lägen och geometrier av deformationszoner och bergartsenheter i experimentvolymen beskriven i den geovetenskapliga modellen M2, figur 4-11. Observera att geologiska deformationszoner och hydrauliska konduktiva strukturer (HCF) avbildas från ovan vilket innebär att vissa ser skenbart bredare ut beroende på vilken stupning (lutning) deformationszonen eller den hydrauliska strukturen har. För den geovetenskapliga modellen M2 modellerades två deformationszoner (Possible Deformation Zone, PDZ) och tolv hydrauliska konduktiva strukturer (HCF).

Ingen deformationszon identifierades i KA3065A01 i den geologiska enhålstolkningen (Carlsten et al. 2013), se bilaga E. En SO-lig längdutsträckning av deformationszon (DZ1) i KA3011A01 borde ha identifierats i KA3065A01 i intervallet 35–45 m, detta finns det dock inga indikationer på. En möjlig deformationszon har identifierats i sektionen 14–35 m i den geologiska enhålstolkningen av KA3011A01 (Carlsten et al. 2013), se bilaga D. Deformationszonen är uppdelad i en zonkärna, mellan 18,75 och 20,10 m, omgiven av en övergångszon ("damage zone") på bägge sidor. Baserat på den samstämmiga orienteringen av öppna sprickor, gångar av finkornig granit och foliation tolkades deformationszonen ha en NV-SO- till VNV-OSO-lig orientering och utgöra en förlängning av deformationszon DZ1 i KA3007A01. Hydraulisk information stödjer att DZ1 i KA3007A01 respektive DZ1 i KA3011A01 utgör delar av samma deformationszon.

Den hydrogeologiska modelleringen visar att bergvolymen konceptuellt består av odifferentierade bergarter med en hydraulisk bakgrundskonduktivitet på  $1,4 \cdot 10^{-8}$  m/s. Berggrunden ansattes att genomkorsas av hydrauliska konduktiva strukturer (HCF) med högre hydraulisk transmissivitet.



**Figur 4-11.** Toppvy av modell M2 över utbyggnadsområdet vid -410 nivån. Vänster: Geologisk modell M2 röda skivor deformationszoner. Höger: Hydrogeologisk modell M2, blåa skivor hydrauliska konduktiva strukturer (HCF)  $10^{-7} < T < 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, bruna skivor HCF  $10^{-6} < T < 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s.

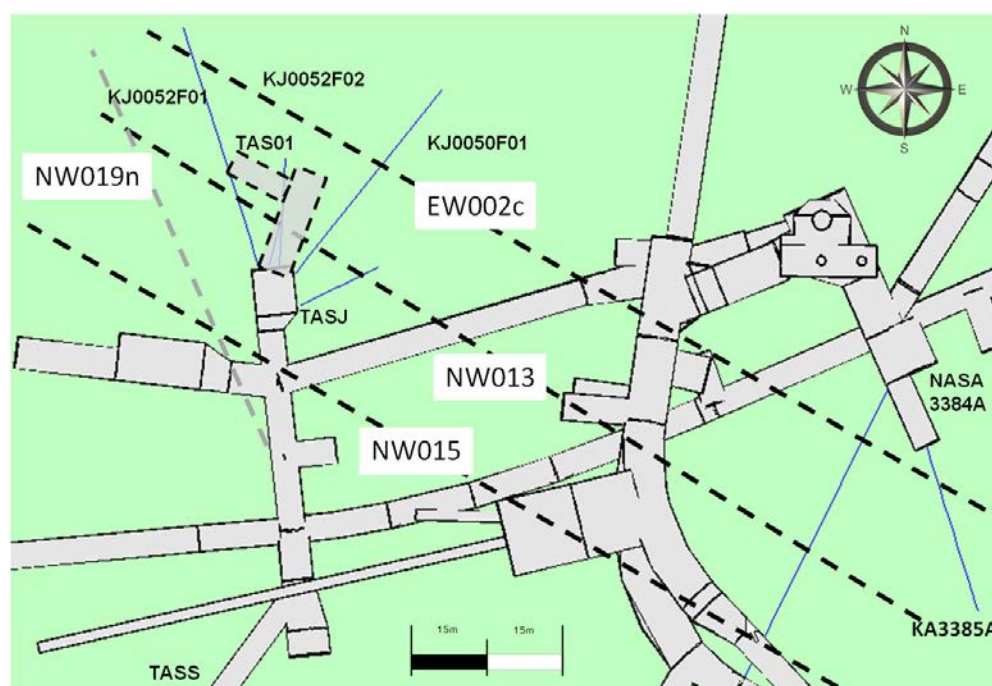
Den inledande identifieringen och parameteriseringen av hydrauliska konduktiva strukturer (HCF) baserades på anomalier i vatteninflöde under kärnboringen (High Flow Anomaly, HFA), tryckresponser från respons- och interferenstester samt korrelation mellan vatteninflöde och enskilda sprickors strykning/stupning erhållna från kärnkarteringen.

## 4.4 Platsanpassning av layouten mot verkliga bergförhållanden

### 4.4.1 Prognos och platsval för TASJ och TAS01

Eftersom leveransen av ny tunnel för test av aktuell referensutförning av valvplugg var prioriterad och brådskande utreddes tidigt under projektet möjligheter att förlägga denna experimenttunnel på annat ställe i anläggningen. Leverans av nisch till Valvpluggsprojektet behövde ske senast i februari 2012, vilket blev en styrande faktor för projektet för att kunna komma igång med arbetena. Detta medförde att TAS01 förlades på -450 m nivån och att befintlig tunnel TASJ förlängdes för att lokalisera en lämplig plats för Valvpluggsprojektet, för att inte pågående drivning vid -410 m nivån skulle störa Valvpluggsprojektets aktiviteter i experimenttunnel.

Befintlig förståelse över utbyggnadsvolymen baserades på geovetenskaplig modell för -450 m nivån (Markström et al. 2010) samt front- och översiktlig kartering av förlängning av tunnel TASJ. Placering av ny experimenttunnel TAS01 genomfördes med underlag av nämnda karteringar och observerade sprickor som kan följas runt hela tunnelperiferin (Full Perimeter Intersections (FPI)). Baserat på det underlag som fanns i närområdet till den tilltänkta utbyggnadsvolymen förväntades att Äspödiorit helt kommer dominera bergvolymen. Underordnade bergarter förmodades utgöras av finkornig granit, pegmatit och gabbroid-dioritoid. Geologiska strukturer som tolkats var enbart geometriskt betingade av vattenobservationer i borrhål och tunnel. En omedelbar hydraulisk konnektivitet från borrhålet KJ0052F01 till området omkring NASA3384A och tunnel TASS hade observerats tidigare (Markström et al. 2010), se figur 4-12. Konnektivitet till NASA3384A bedömdes vara kopplad till de hydrogeologiska strukturerna NW013 och EW002c. Dock verkar inte EW002c, vars definition baseras på vattenförande sprickor i tunneln vara direkt kopplad till vattenförande sprickor i borrhålen KJ0050F01 och KJ0052F01. Mätningar och tester i borrhålen i befintlig tunnel TASJ visade dock att berget var tätt till mycket tätt och att grundvattentrycket i bergvolymen låg huvudsakligen i intervallet 2 000–3 000 kPa.



**Figur 4-12.** Hydrogeologiska strukturer (streckade linjer) som potentiellt bedöms påverka utbyggnadsvolymen vid TASJ.

Geologisk kartering i förlängningen av tunnel TASJ utfördes i sammanlagt fyra fronter och visade på överlag bra berg. De två förväntade strukturerna (EW002c och NW013) i området kring tunnel TASJ enligt den geovetenskapliga modellen för -450 m nivå (Markström et al. 2010) (figur 4-12) har bekräftats och identifierats vid förväntade lägen. Sonderingshål i de två injekteringskärmarna visade små flöden förutom vid enstaka tillfällen. Som högst har ett inflöde på 1,5 l/min registrerats vid ett injekteringshål (längst ner till vänster) i andra injekteringskärmen. Detta inflöde kan möjligen kopplas till en spricka som kan följas runt hela tunnelperiferin (Full Perimeter Intersections (FPI)) vid 63 m längdmätning i tunnel TASJ. Grundvattentrycket bedömdes att vara ca 3 MPa i undersökningsområdet vid TAS01.

#### 4.4.2 Prognos och platsval för TASP och TASU

Projektets projektör tillsammans med geolog och hydrogeolog i undersökningsgruppen fastlade läge för transporttunnlarna TASU och TASP baserat på befintlig förståelse av utbyggnadsvolymen utifrån modell M1. Utifrån modell M1 var en placering av KBS-3H-nischen utgående från nisch NASA3009A (se figur 4-9) att föredra på grund av förväntat högre grundvattentryck. För KBS-3H:s del förväntades då krav på bergkvalitet och högre grundvattentryck vara tillräckligt. Dessutom fanns möjlighet att etablera experimenttunneln för DETUM-1 vid tunnelpåslaget på det rekommenderade avståndet. Resultatet från de preliminära undersökningarna av borrhålen KA2051A01 och KA3007A01 visade att berggrunden var gynnsam och rekommendationen gavs att gå vidare med förläggning av utbyggnadsområdet utgående från läge av nischer NASA3067A och NASA3009A samt att där förlägga pilotborrhål för transporttunnlarna TASP och TASU. Den geologiska prognosen för TASP och TASU baserades sedan på informationen från modell M2.

Prognosen var att tunnel TASP skulle komma att domineras av Ävrögranodiorit i de första ca 33 metrarna, men mellan ca 14 och 21 m dominerar finkornig diorit-gabbro. Från ca 33 m och till slutet av tunneln dominerar Äspödiorit men intervallet 85 till 94 m domineras av finkornig granit. Dessutom förväntades underordnade bergarter i form av finkornig granit och finkornig diorit-gabbro. Öppna såväl som läkta sprickor förväntades, brantstående med NV-SO-lig strykning. Även i sektion 14–21 m i KA3065A01 som domineras av finkornig diorit-gabbro förväntades sprickorna att ha en markant NV-SO-lig strykning och brant stupning. Den förhöjda sprickfrekvensen i sektionen 83–99 m och 105–117 m i KA3065A01 var främst kopplad till förekomsten av finkorniga graniter.

Tunneln TASU förväntades domineras av Ävrögranodiorit. Mellan ca 14 och 28 m och mellan ca 88 och 100 m i KA3011A01 förekommer stora inslag av finkornig granit samt intervallet mellan ca 58 och 63 m domineras av Äspödiorit. Öppna sprickor förväntades uppvisa en dominerande brant till vertikal stupning och VNV-OSO- och NNV-SSO-lig strykning. En population av de läkta sprickorna förväntades visa samma orientering, men läkta sprickor med medelbrant till brant stupning och O-V-lig strykning kan också förekomma. Förhöjd sprickfrekvens i sektionerna 83–85 m och 94–98 m är kopplat till förekomsten av finkornig granit. NV-SO-liga strykningar och branta stupningar dominerar i samtliga sektioner med förhöjd sprickfrekvens.

Grundvattentrycken i undersökningsområdet för tunnlar TASP och TASU hade monitorerats under en längre tid. Längs tunnlar pilotborrhål KA3011A01 och KA3065A01 fanns en gradient mot huvudtunneln TASA, från cirka 3 900 kPa inne i berget till cirka 3 600 kPa vid borrhålsmyningen (för manschetterade sektioner för borrhålen, se tabell 4-4).

Enligt den geovetenskapliga prognosen utifrån Modell M2 förväntades partier med distinkta högre vatteninflöden innan förinjektering.

I TASP:

- 28–31 m tunnellängd med förväntade vatteninflöden på cirka 20–60 l/min med förhöjd frekvens öppna sprickor samt krossade partier.
- 39–46 m tunnellängd med förväntade vatteninflöden cirka 50–300 l/min med förhöjd frekvens öppna sprickor samt krossade partier.

I TASU:

- 30–45 m tunnellängd med förväntade inflöden på cirka 40–400 l/min med hög frekvens öppna sprickor och tillika mer transmissiva sprickor. Detta parti tolkades vara hydrauliskt kopplat till högtransmissiva partier i KA3007A01 och KA2050A.

Hydrauliska kontaktvägar mellan TASU och TASP bedömdes sannolikt att vara betydande mellan de transmissiva partierna med förväntade högre inflöden ovan dvs mellan 20–55 m i TASP och 30–45 m i TASU.

#### **4.4.3 Prognos och platsval för experimenttunnlar**

Befintlig förståelse över utbyggnadsvolymen baserad på gällande modell M2.X, låg till grund för platsvalet av experimenttunnlarna. Modell M2.X (modell M2.1-M2.4) baserades på underlag från Modell M2, underlag från frontkarteringarna i transporttunnlarna TASU och TASP och underlag från den översiktliga karteringen som hade genomförts i samband med frontkarteringarna. Modell M2.X baserades även på underlag från den geologiska karteringen av väggar och tak som har genomförts vid varje gällande tidpunkt för platsanpassning av experimenttunnlarna. Experimenttunnlarna platsanpassades i fyra omgångar i takt med drivningen av tunnlar TASU och TASP (se bilaga G). Först genomfördes en platsanpassning av tunnel TAS08 baserat på modell M2.1, då transporttunnel TASU behövde breddas i samband med tunneldrivningen av TASU, för att underlätta påslaget för TAS08. Därefter platsanpassades tunnel TASN baserat på modell M2.2, efter önskemål från delprojekt tunneldrivning att åtminstone en experimenttunnel i TASP behövde fastläggas. Detta för att optimera drivningen och därmed tidsplanen, samt för att underlätta logistiken vid drivning i TASP. Därefter fastlades tunnlar TAS02 och TAS03 baserat på modell M2.3. Slutligen genomfördes en platsanpassning baserat på modell M2.4, av de tre experimenttunnlarna TAS04, TAS05 och TAS06 som inte planerades injekteras efter att tunneldrivningen av TASU och TASP var avslutad.

De första ca 30 m av transporttunneln TASU visade sig vara ett komplext område med vattenförande deformationszoner och en del vattenförande strukturer (features). Från längdmått 45 m i TASU visade karteringen att området består av relativt bra berg och inga större inflöden av vatten observerades. Från längdmått 50 m till 68 m i TASP visade karteringen att området består av relativt bra berg och inga större inflöden har observerats. Detta område reserverades för andra experimenttunnlar med krav på relativt torrt berg och ingen injektering se avsnitt 2.2.1.

##### ***Prognos och platsval för TAS08***

Läget för tunnel TAS08 projekterades tidigt ca 50 m in i tunnel TASU eftersom den geovetenskapliga prognosen visade att grundvattentrycket var högre vid tunnel TASU än TASP, och ett läge längre in i tunneln minskade eventuella störningar för KBS-3H. Baserat på modell M2.1 bedömdes sprickor med NV-SO-lig strykning och vertikal till brant NO-lig eller SV-lig stupning vara dominerande i den bergvolum inom vilken tunnel TASU och tunnel TAS08 planerades drivas. Tolkningarna, som är tagna ifrån vid platsval gällande modell M2.1 (figur G-1 i bilaga G), inkluderar endast mindre deformationszoner (Minor Deformation Zone (MDZ)) och HCF som bedöms eventuellt kunna uppvisa skärning (intercept) med det pilotborrhål (100 m) som KBS-3H planerar att borra från sin nisch (TAS08).

##### ***Prognos och platsval för TASN***

Tunnel TASN placerades baserat på gällande modell M2.2 (figur G-2 i bilaga G) i relativt bra berg mellan två tolkade vattenförande strukturer. Kravet på projektet var att inte orsaka för stor sänkning av grundvattentrycket i utbyggnadsområdet och eftersom tunnel TASN planerades att injekteras kunde den förläggas mellan två vattenförande strukturer. Tunneln anpassades efter strukturerna och projekterades med 85° vinkel mot tunnel TASP för att ge gynnsam geometri för injekteringsskärmarna.

##### ***Prognos och platsval för TAS02 och TAS03***

Tunnellayouten optimerades och tunnel TAS02 placerades i en befintlig lastnisch som hade drivits i angränsning till tunnel TASP. Ingen av de fem sonderingshål i skärmen över tunnel TAS02 gav något vatten. Tunnelkarteringen visade dock en högre frekvens av våta sprickor i tunnelns vänstra sida, som kan sammanfalla med den måttligt konduktiv HCF\_KA3065A01\_1 som modell M2 visade på föreligger i TAS02 på dess vänstra sida. Tunnel TAS03 placerades i en befintlig lastnisch som hade påbörjat drivas i angränsning till tunnel TASU. Modellen M2.3 (figur G-3 i bilaga G) visade att två tolkade deformationszonerna DZ3 och DZ4, samt en måttligt konduktiv HFA\_KA3007A01\_1 kunde skära TAS03. Området förväntades bestå av uppsprucket berg.

### Prognos och platsval för TAS04

Tunnel TAS04 som bedömdes kunna undvika att injekteras placerades i höger vägg vid längdmått 52,10 m i tunnel TASP. Vid längdmått 49 m hade en deformationszon DZ4 karterats som matchar HCF: KA2051A01\_3 och denna antogs ha orsakat inflöden vid borrning av skärm 2 i TASP. Vid längdmått 63 m har en spricka som kan följas runt hela tunnelperiferin (Full Perimeter Intersection (FPI)) karterats vilken visades vara vattenförande. Mellan längdmått 50 m och 54 m i tunnel TASP, har ingen större deformationszon karterats. Gällande modell M2.4 vid fastläggning av tunnel TAS04 ses i figur G-4 i bilaga G.

### Prognos och platsval för TAS05 och TAS06

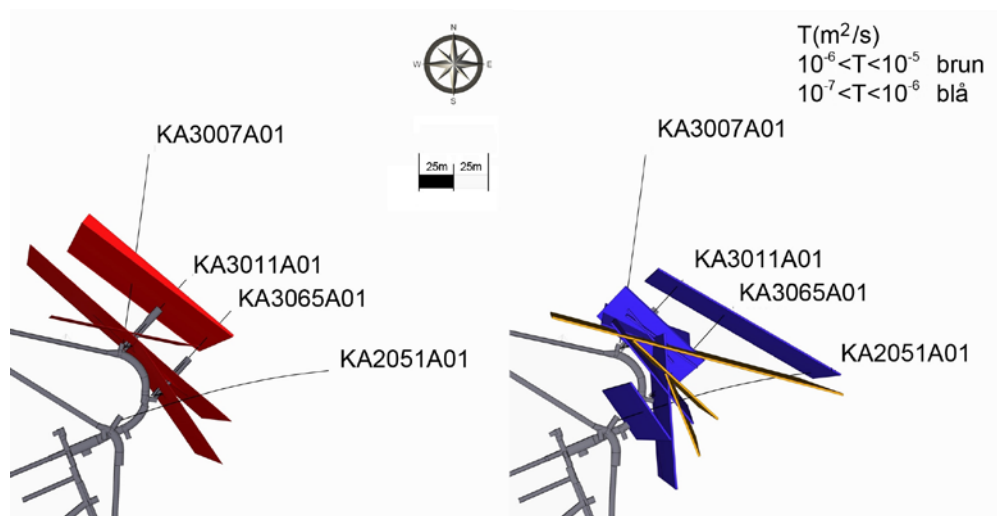
Tunnel TAS05 som hade krav på relativt torrt berg och ingen injektering, placerades i höger vägg vid längdmått 68,25 m i tunnel TASP. En mindre deformationszon förväntades att påträffas vid drivning av TAS05, se figur G-5 i bilaga G. Dock bedöms inte denna struktur vara vattenförande och påverka tunneln TAS05. Tunnel TAS06 som hade krav på relativt torrt berg och ingen injektering, placerades vid längdmått 60,25 m i TASU. En mindre deformationszon som bedömdes ej vara vattenförande kunde förväntas korsa TAS06, se figur G-5 i bilaga G.

## 4.5 Geovetenskaplig modell M2.5

Modellerna M2.1-M2.4 fastlades inte fullt ut utan endast en visuell bild som beskrev placeringen för experimenttunneln i förhållande till geologiska och hydrogeologiska strukturer skapades. Den slutgiltiga modellen som skapades i projektet var modell M2.5 (figur 4-13). Modell M2.5 baserades på underlag från Modell M2, underlag från frontkarteringarna i TASU och TASP samt underlag från den geologiska karteringen av väggar och tak som har genomförts.

För M2.5 modellerades fyra deformationszoner (Possible Deformation Zone, PDZ) och tolv hydrauliska konduktiva strukturer (HCF). Observera att geologiska deformationszoner och hydrauliska konduktiva strukturer (HCF) avbildas från ovan vilket innebär att vissa ser skenbart bredare ut beroende på vilken stupning (lutning) deformationszonen eller den hydrauliska strukturen har. Två nya deformationszoner identifierades från den geologiska karteringen men inga nya hydrauliska konduktiva strukturer (HCF) har identifierats relativt modell M2.

Den slutgiltiga geovetenskapliga modellen, M3, bygger på all produktionsdata från tunneldrivning och all geologisk kartering av transporttunnlarna samt experimenttunnlarna. Modell M3 kommer att färdigställas inom gruppen Undersöknings- och bergbyggnadsteknik inom enheten Slutförvarsteknik.



**Figur 4-13.** Toppvy av Modell M2.5 över utbyggnadsområdet vid -410 nivå. Vänster: Geologisk modell M2.5 röda skivor deformationszoner. Höger: Hydrogeologisk modell M2.5. Hydrauliska konduktiva strukturer (HCF), blå skivor  $10^{-7} < T < 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , bruna skivor  $10^{-6} < T < 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Notera att modellerna M.2.1-M2.5 samt levererade leveransmallar till projektören var tillräckliga för projektören för att kunna fastställa läget av experimenttunnlarna. Modellen M3, vilken baseras på samtliga geologiska och hydrogeologiska data från samtliga tunnlar utgör ett stöd för framtida förståelse av berget och när det är framtaget kommer det till nytta för de intressenter som bokat in sig i respektive tunnel.

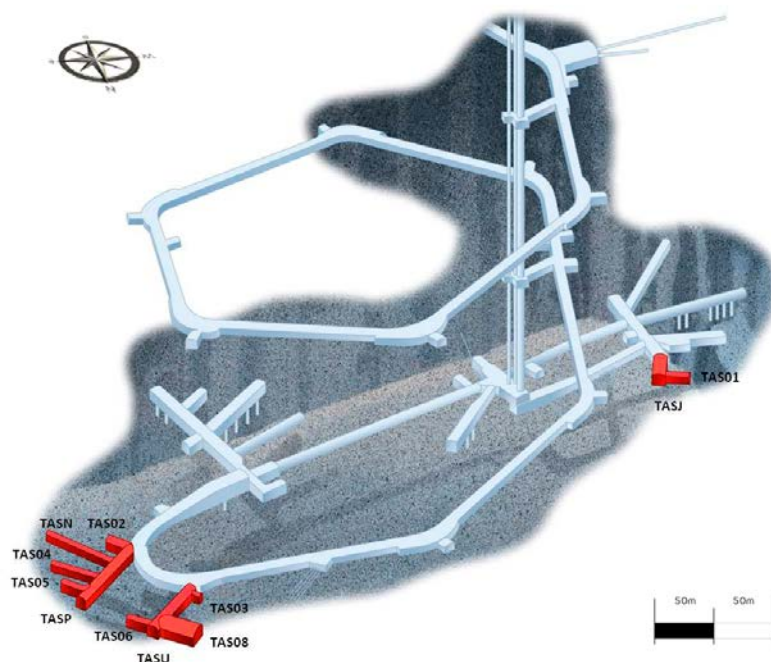
## 4.6 Utbyggnadens slutliga layout

Utbyggnaden av Äspölaboratoriet utfördes på -410 m nivån samt -450 m nivån, se figur 4-14.

Ursprungligen planerades det för bergschaktarbete omfattande 347 m tunnel och 12 043 m<sup>3</sup> berg. Tunnellayouten optimerades under projektets gång och experimenttunnlar kunde förläggas i befintliga lastnischer samt två experiment kunde förläggas i samma tunnel. Detta medförde att tre transporttunnlar och åtta experimenttunnlar drevs. För tunneltvärsnitt samt tunnellängd se figur 2-6 och tabell 4-5.

**Tabell 4-5. Tunnelnamn och tunnellängd.**

Transporttunnel	Experimenttunnel	Tunneltvärsnitt enligt figur 2-6	Längd (m)
TASP		B-B	60
	TASN	D-D	52
	TAS04	D-D	29
	TAS05	A-A	16
	TAS02	B-B	13
TASU		B-B	55
	TAS08	C-C	25
	TAS06	A-A	17
	TAS03	D-D	7
TASJ		B-B	19
	TAS01	D-D	15
<b>Totalt</b>			<b>308</b>



**Figur 4-14.** Slutlig layout för utbyggnaden av Äspölaboratoriet 2011–2012.



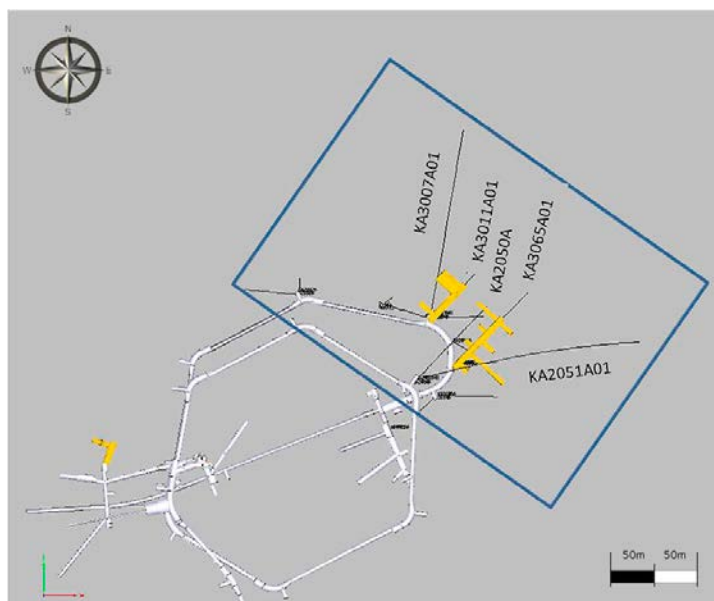
Totalt drevs 308 m tunnel och teoretiskt bergschakt omfattade 11 902 m<sup>3</sup>. Jämfört med ursprunglig planerat bergschaktarbete drevs 39 m mindre tunnel än planerat och 141m<sup>3</sup> mindre teoretiskt bergschakt togs ut, se tabell 4-6.

**Tabell 4-6. Utfört teoretiskt bergschakt samt jämförelse mot ursprungligt planerat.**

Tunnel	Teoretisk bergschakt [m]	Teoretisk area [m <sup>2</sup> ]	Teoretiskt bergschakt [m <sup>3</sup> ]
TASP	60	39,2	2 353
TASN	52	18,9	987
TAS04	29	18,9	556
TAS05	16	24,4	391
TAS02	13	39,2	506
TASU	55	39,2	2 153
TAS08	25	95,8	2 395
TAS06	17	24,4	410
TAS03	7	18,9	132
TASJ	19	39,2	745
TAS01	15	18,9	274
Avfasning/Takhöjning/instrument nisch etc			1 000
<b>Summa: ca</b>	<b>308</b>		<b>11 902</b>
<b>Ursprungligt från TB</b>	<b>347</b>		<b>12 043</b>

## 4.7 Kontrollprogram för grundvattentryck

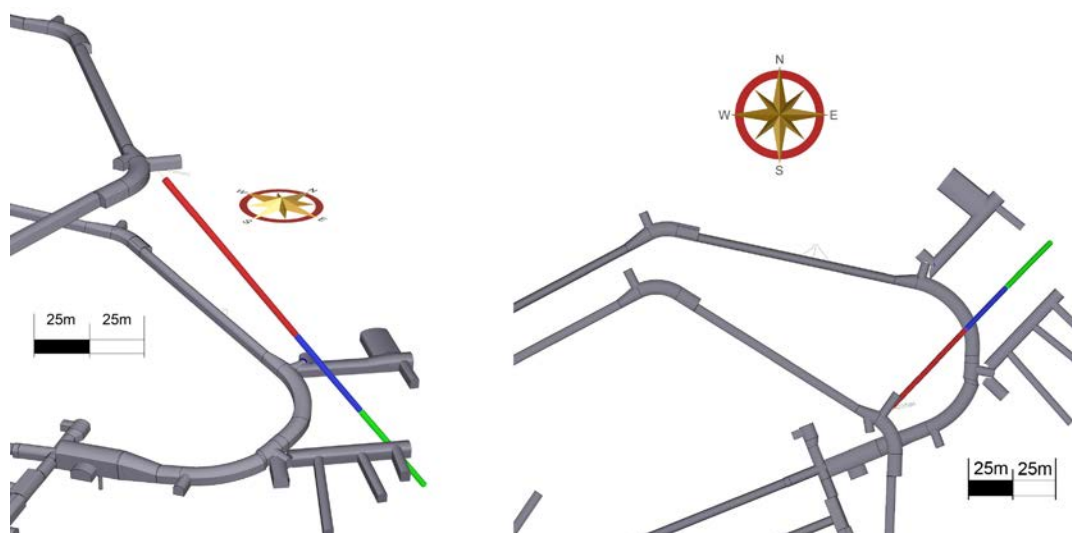
Kontrollprogrammet togs fram för att registrera samt att korrelera tryckförändringar som förorsakats av borrningen av pilotborrhålen KA3011A01 och KA3065A01 och aktiviteter under tunneldrivningen av transporttunnlarna TASP och TASU samt experimenttunnlarna. Hydrauliska responser registrerades dels med Hydro Monitoring System (HMS) i borrhålektioner och dels inom ramen för de enskilda experimentens borrhål som pågår i anläggningen. Urvalet av kontrollobjekt baserades på observerade störningar i samband med borrning och tester i förundersökningsborrhålen KA3007A01 och KA2051A01. Området inom vilka borrhålen påverkats av tryckstörningar ses i figur 4-15.



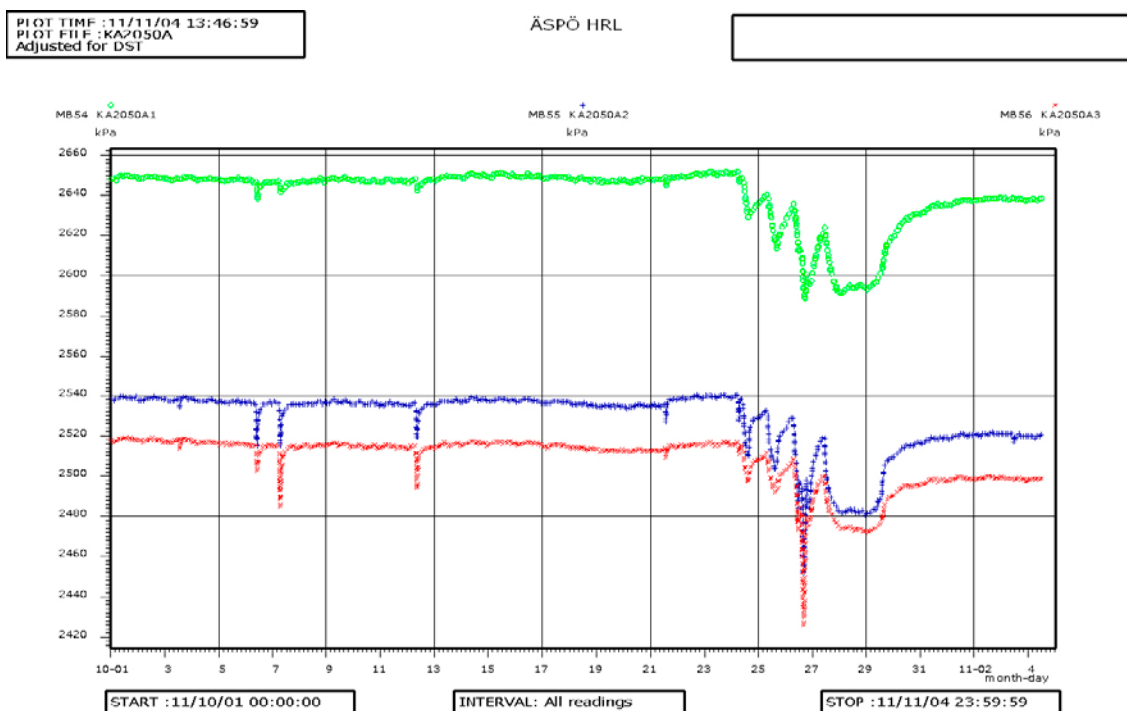
**Figur 4-15.** Den blå rektangeln visar området inom vilka borrhål (svarta streck) påverkats av tryckstörningar från borrningen av förundersökningshålen KA2051A01 och KA3007A01. Figuren visar även pilothål KA3011A01 och KA3065A014 samt i gult de tilltänkta nya transporttunnlarna TASU och TASP.

Det tidigare borrarde kärnborrhålet KA2050A mitt mellan transporttunnlarna TASU och TASP, valdes som referensborrhål. I figur 4-16 ses referensborrhålet KA2050A i förhållande till transporttunnlarna TASU och TASP. Figuren visar de tre manschetterade sektionerna i borrhålet, sektion 6–101 m (röd), sektion 101–154 m (blå) respektive sektion 154–211 m (grön).

Observationer av tryck i tre sektioner i KA2050A från 2011-10-01 till 2011-11-04 visas i figur 4-17. Bakgrundsnivå för trycket i respektive sektion är sektion 6–101 m (röd) 2 520 kPa, sektion 101–154 m (blå) 2 540 kPa respektive sektion 154–211 m (grön) 2 650 kPa. Kontroller inom ramen för kontrollprogrammet avser både nivå och trend relativt denna referensnivå.



**Figur 4-16.** Referensborrhålet KA2050A i förhållande till transporttunnlarna TASU och TASP. De olika färgerna längs borrhålet representerar de tre manschetterade sektionerna: sektion 6–101 m (röd), sektion 101–154 m (blå) respektive sektion 154–211 m (grön).



**Figur 4-17.** Observationer av tryck i tre sektioner i KA2050A från 2011-10-01 till 2011-11-04. Bakgrundsnivå för trycket i respektive sektion är 2 520, 2 540 respektive 2 650 kPa. Kontroller avser den nivå och den trend relativt denna referensnivå.



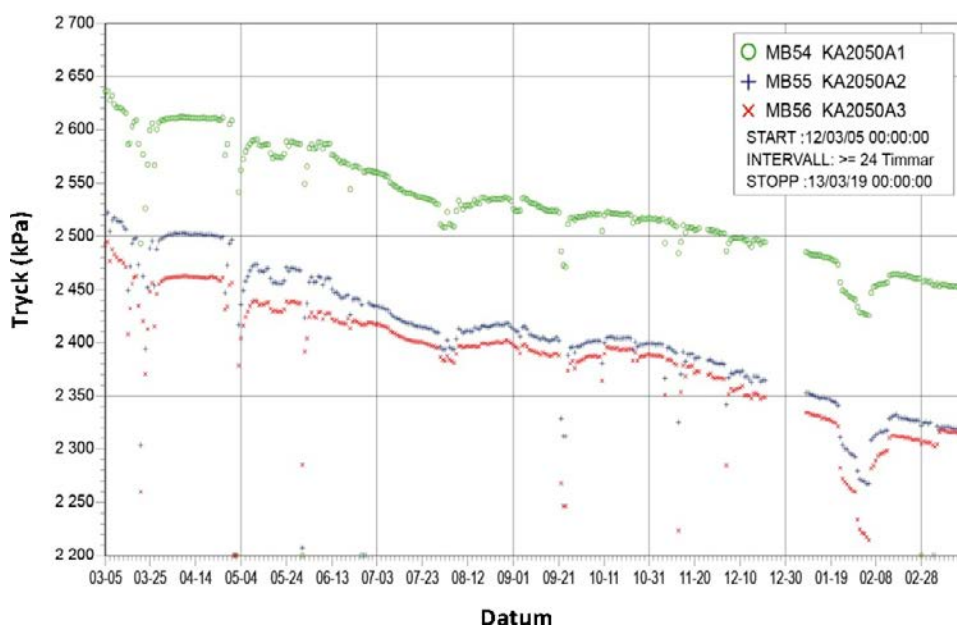
#### 4.7.1 Utfall av kontrollprogrammet

Projektet uppnådde kravet på maximal grundvattenavsänkning 500 kPa. I figur 4-18 kan grundvattenavsänkningen för de tre sektionerna i referensborrhålet KA2050A ses, från start av tunneldrivning av transporttunnlarna TASU och TASP i mars 2012, till efter bergförstärkningen var genomförd mars 2013. Den inre sektionen (grönt) har haft en grundvattenavsänkning på 150 kPa, mitten sektionen (blått) har haft en grundvattenavsänkning på 220 kPa, och den yttre sektionen (rött) har haft en grundvattenavsänkning på 210 kPa.

#### 4.8 Observationsmetodens tillämpning

Tillämpning av observationsmetoden var ett önskemål från teknikutveckling berg och tillämpades på injektering. För projektet var beteendet, enligt observationsmetoden, grundvattentryck. Det styrande kravet för projektet var att under drivningen av tunnlar TASP och TASU samt tillhörande nischer, bibehålla nuvarande grundvattentryck eller sänka det så lite som möjligt. Detta på grund av KBS-3H:s behov av vattentryck högre än 3,5 MPa för sitt experiment. Detta medför att den tillåtna grundvattenavsänkningen för hela utbyggnaden vid området TASP/TASU var 500kPa baserat på information från undersökningarna. Projektet hade ett upprättat kontrollprogram som omfattade mätobjekt inom Hydro Monitoring System (HMS), se avsnitt 4.7. Ett referensborrhål KA2050A, som var placerat mitt i den planerade utbyggnadsvolymen, valdes för att mäta påverkan på grundvattentrycket från aktiviteterna i tunneldrivningen, se figur 4-16.

Den acceptabla gränsen för beteendet var att avsänkningen av grundvattentrycket inte fick överstiga 500kPa på hela utbyggnaden, utifrån referensnivån i referenshålet KA2050A som gällde innan start av pilothålsborrningen. Beräkningarna gjordes för att bedöma största vatteninflödena som kunde tillåtas i de utbyggda utrymmena utan att överskrida den acceptabla gränsen för beteendet. Det totala inflödet efter injektering hade konservativt beräknats till 19 l/min för TASU och till 18 l/min för TASP. Därefter räknades fram vilken avsänkning som var acceptabel för varje uttag beroende på om berguttaget pågick parallellt i två tunnlar eller ej. Om skillnaden mellan referenstryck och grundvattentrycket efter återhämtning i referensborrhålet KA2050A visade sig vara större än 30 eller 60 kPa (uttag i 2 parallella tunnlar) behövde delprojektledare projektering kontaktas för beslut om eventuell åtgärd. Dock förväntades stora avsänkningar vid borrning av sonderings- eller injekteringshål.



**Figur 4-18.** Grundvattentryck i manschetterade sektioner i borrhål KA2050A. Tryckavsänkningen från start tunneldrivning av transporttunnlarna TASU och TASP i mars 2012, till efter bergförstärkningen var klar i mars 2013.

Borrningen av förundersöknings- samt pilotborrhål visade tydligt att avsänkningen kunde momentant vara mycket större än 500 kPa. Uppföljningen visade att systemet återhämtade sig tillräckligt fort (från några timmar till nästa dag), för att möjliggöra att införa korrigerande åtgärder. En plan för korrigerande åtgärder upprättades som tog upp ett antal indikatorer och kopplade åtgärder som planerade tillämpas i de fall krav på acceptabel avsänkning inte kunde följas, se tabell 4-7. Den åtgärd som vidtogs under projektet var komplettering av utförd injektering med ytterligare injekteringshål då utfört injekteringsarbete efterlämnat osäkerhet om kvalitetskrav uppfyllts, se vidare avsnitt 4.9.

**Tabell 4-7. Redovisning av indikatorer, observationssystem för respektive indikator, orsakssamband samt därtill kopplad åtgärd för att reducera vatteninflödet om krav på acceptabel avsänkning inte innehålls.**

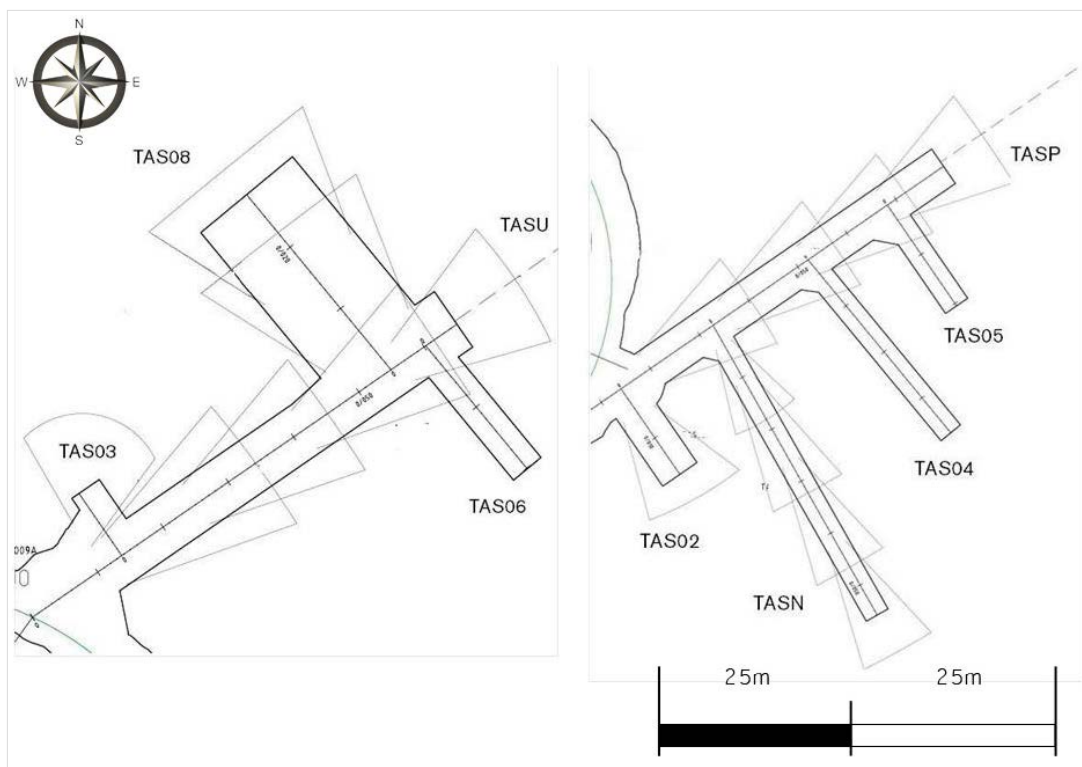
Indikator	Observationssystem	Orsak	Åtgärd
Otillräcklig tätningseffekt	HMS påvisar oacceptabelt stor avsänkning. Kartering pekar på allmän förekomst av läckage, fukt eller dropp.	Vattenförande sprickor påträffas inte vid borrning i tillräcklig omfattning, bidragande kan också vara få konnekterade sprickor.	Dubbla injekteringsomgångar vid förinjektering.
Otillräcklig tätningseffekt	HMS påvisar oacceptabelt stor avsänkning. Kartering pekar på allmän förekomst av läckage, fukt eller dropp.	Injekterad zon inte tillräckligt omfattande, alternativt är brukspridning inte tillräcklig.	Vid förinjektering öka injekteringstryck. Byte till mer lättflytande cementbruk genom sänkt viskositet.
Otillräcklig tätningseffekt, läckage, fukt eller dropp förekommer i fina sprickor	HMS påvisar oacceptabelt stor avsänkning. Kartering pekar på förekomst av läckage, fukt eller dropp i fina sprickor.	Vattenförande sprickor har sprickapertur mindre än kritisk för injekteringsbruk.	Avbryt injektering med cementbruk, använd t ex silica sol vid förinjektering.
Utfört injekteringsarbete efterlämnar osäkerhet om kvalitetskrav uppfylls, exempelvis injekteringsbruk trycks ut	Entreprenörens dokumentation eller andra observationer.	Variabel.	Komplettera utförd injektering med ytterligare hål eller utför ny injekteringsskärm.

## 4.9 Injektering

Genomförda injekteringsskärmar för respektive tunnel samt när injektering av avlutande tunnelfront har skett (stuffinjektering) kan ses i tabell 4-8. I figur 4-19 ses läge för genomförda skärmar vid -410 m nivå. De injekteringsskärmar som utfördes i tunnel TASJ på -450 m nivå visas ej i figuren. I tunnel TASJ genomfördes två injekteringsskärmar. Bergvolymen var torr och i stort sett endast hålfyllnad genomfördes.

**Tabell 4-8. Genomförda injekteringsskärmar.**

Tunnel	Antal injekteringsskärmar	Kommentar	Stuffinjektering (injektering av avlutande tunnelfront)
TASJ	2		
TAS02	1		
TASU	4		Ja
TAS03	1	Anpassad skärm som byggdes samman med skärm 1 TASU	
TASP	4		Ja
TASN	4		Ja
TAS08	2	Sista skärmen kompletterades med injekteringshål enbart 5m förbi fronten	Ja



**Figur 4-19.** Genomförda injekterings-skärmar på -410 m nivå. Figuren visar inte de två injekterings-skärmar som utfördes i tunnel TASJ på -450 m nivå.

En osäkerhet fanns om läget för det parti som förväntades ha potential till högre vatteninflöden i TASU se avsnitt 4.4.2. Inget vatten påträffades förrän ca 30 m i KA3011A01, dock vid borrhningen av KA3007A01, som borrades från samma nisch, mättes ett inflöde på ca 200 l/min vid ca 11,2 m vilket injekterades. Detta orsakade viss osäkerhet kring avsaknad av inflödet i KA3011A01 och en identifierad risk att vattenförande strukturer kunde påträffas tidigare än 30 m i TASU.

De första injekterings-skärmarna som genomfördes för TASU och TASP borrades och injekterades ca en månad innan de första salvorna sprängdes ut. Vatteninflödet i sonderingshålen var över kriteriet (inflöde > 20 l) för grovinjektering se tabell 4-9 och grovinjektering genomfördes i både TASU och TASP. Två kontrollhål borrades och injekteras sedan i TASU, då ett borrhål överskridit stoppkriteriet för maxvolym (> 200 l bruk). Vid salva 3 i tunnel TASU påträffades ett salvhål med ett inläckage på mer än 5 l/min och beslut togs att borra ett antal salvhål jämnt fördelade, för att kontrollera om inläckage påträffades i flera salvhål. 10 salvhål borrades, dock visades sig inläckaget i dessa borrhål vara litet. Sex salvhål injekterades, som hade ett inflöde mellan 1–5 l/min. När manschetten sedan togs ut ur salvhålen trycktes bruket ut i form av ”korvar”. Beslut togs sedan att spränga ut denna salva och att därefter slå en ny injekterings-skärm. Detta i kombination med att skärmen även behövde anpassas till det parti med potential för högre vatteninflöden som förväntades i den geovetenskapliga prognosen vid sektion 30–45 m.

**Tabell 4-9.** Inflöde till fem sonderingshål skärm 1 och 2 i TASU respektive TASP.( Kriteriet för grovinjektering inflöde > 20 l/min), se även figur 3-9.

	TASU [l/min]					TASP [l/min]				
Inflöde sonderingshål skärm 1	27,3	74	92	7,8	51	1,05	5	26,4	25,2	6,25
Inflöde sonderingshål skärm 2	10	4	2,5	17,5	0,3	9,8	6,4	1,26	18	16,8

För skärm 2 i tunnel TASU utfördes ingen grovinjektering då inget borrhål hade ett inflöde > 20 l/min. Största inflödet i sonderingshålet var 17,5 l/min, se tabell 4-9. Vid injekteringen observerades samband mellan nästan alla injekteringshålen. Borrhål nr 12 höger vägg, hade ett ytligt slag som gjorde att bruket kom ut utanför manschetten. Injekteringen avslutades och manschetten flyttades ut varefter borrhålet injekterades igen. Två borrhål tog maxvolym (> 200 l bruk) och fyra kontrollhål borrades och injekterades. Samband noterades i samtliga fyra kontrollhålen. Vid injektering av dessa kontrollhål trycktes manschetten och injekteringskorvar ut från borrhål nummer 12 i tidigare injekteringsomgång. Det visade sig att bruket inte hade härdat tillräckligt trots att injekteringsbruket i skärmen härdat i ca 4 dygn, figur 4-20 visar uttryckt bruk. Beslut togs att en kompletterande skärm behövde genomföras som en åtgärd enligt tabell 4-7, för att säkerställa tätheten för skärmen och sex kontrollhål borrades jämt fördelade i skärmen. Några av kontrollhålen hade ett inläckage, dock observerades inga inflöden större än 6 l/min. Dessa kontrollhål injekterades med vanligt cement (Injektering 30) med vct 0.5 med avseende på förekommande arbetsmiljörisker.

För skärm 2 i tunnel TASP utfördes ingen grovinjektering eftersom inget av sonderingshålen visade ett flöde > 20 l/min. Dock hade 2 av 5 sonderingshålen ett inflöde på 16,8 respektive 18 l/min, se tabell 4-9. Vid injekteringen påvisades stora samband mellan injekteringshålen. Två borrhål bredvid varandra tog max volym vilket medförde att tre stycken kontrollhål borrades och injekterades. I samband med injektering av dessa hål förekom liknande fenomen med bruk som trycks ut ur tidigare injekterade hål. Vid borring för salva 5 tunnel TASP (dvs första salvan efter skärm 2) läckte två salvhål, varav ett läckte mer än 10 l/min med påverkan noterad i HMS i KA2050A, trots att en skärm precis har slagits och ca 5m överlapp fanns mot föregående skärm. Dessa två borrhål injekterades med vanligt cementbruk med avseende på förekommande arbetsmiljörisker. Därefter genomfördes en analys av skärmen och två borrhål identifierades som hade tagit väldigt lite bruk och beslut togs att två kontrollhål behövde borraras på vardera sidan om dessa hål i samband med nästa salva. Detta medförde att i salva 6 tunnel TASP (andra salvan efter skärm 2) borrades och injekterade fyra kontrollhål som en åtgärd enligt tabell 4-7.

Kriteriet för grovinjektering som var satt på att minst ett sonderingshål har ett inflöde på mer än 20 l/min ifrågasattes. En resurs som hade erfarenhet av injektering på stora djup med låg-pH bruk anlätades för att utföra kontroll av blandning och fortlöpande provning av bruket. I och med detta gjordes flera anpassningar av injekteringsstrategin.

Dessa var:

- Utökad program för fortlöpande provning, med införande av systematiskt provning av brukets flytgränsspänning (Yield stick) se tabell 3-5.
- Användning av flergångsmanschetter för läckande hål.
- Ökad maxvolym till 420 liter inklusive hålfyllnadsvolym.
- Systematisk grovinjektering.



**Figur 4-20.** Uttryckt bruk i samband med kompletterande injektering.

Det beslutades även att aktivitetsledare för injektering skall utföra den fortlöpande provningen från och med skärm 3 i tunnarna TASU och TASP. Provingen genomfördes på 10 min gammalt bruk på första och andra blandningen (1 sats innehåller 2 blandningar) och sedan på 6:e och 7:de blandningen osv.

De mer robusta flergångsmanschetterna som fanns kvar från Fintättningsprojektet (Funehag och Emmelin 2011) användes i den första skärmen efter att anpassningarna hade genomförts. Flergångsmanschetter kunde inte alltid tas ut ur injekteringshålet eftersom bruket bakom fortfarande var plastiskt och manschetterna var trycksatta. Att ta ut en trycksatt manschett innebar för denna typ av manschett att förankringen måste kapas och det är därför en arbetsmiljörisk. Detta medförde att projektet i stället använde sig av flergångsmanschetter (modell GU HD) från leverantören Gurlita GMA AB där förankringen kunde bibehållas.

Injekteringen genomfördes med varierande dimension på manschetter beroende på grad av slitage på 64 mm kronan som använts för att borra injekteringshålen. Med en för liten dimension kunde inte manschett spännas tillfredställande och bergarbetare som inte varit med och borrar injekteringshålen fick ibland testa olika dimensioner. Nedåtriktade och horisontella hål utan större inflöden fylldes först med cement genom att injekteringsslangen placerades längst in i hålet och därefter drogs ut, innan manschettering för att minimera problem med luftblåsor och vatten i hålen vid injektering. Varje manschett förankrades med kätting på båda sidor i expandrar försedda med öglor. Detta var en mycket viktigt åtgärd eftersom rörelser i manschett var vanligt förekommande, speciellt i borrhål som fyllts med cement innan manschettering. Injekteringsbruket ledde där till låg friktion mellan manschett och borrhålet.

## 4.10 Tunneldrivning

För genomförda salvor i utbyggnaden av Äspölaboratoriet, se tabell 4-10. Tunneldrivningen kvalitetsstyrdes enligt de kontrollplaner som tagits fram inom projektet se avsnitt 3.8.2. Dessa kontrollplaner samlade samtliga kontrollmoment som genomfördes under entreprenaden, både entreprenörens egenkontroll och beställarorganisationens utförandekontroll. Borr- och laddplaner har upprättats efter principutförandet, men mindre justeringar genomfördes relativt snart med avseende på t ex att hålavstånd definierats utifrån avståndet mellan slutpunkterna i respektive borrhål och behov av justeringar i borrhållens hålgeometri.

**Tabell 4-10. Genomförda salvor.**

Tunnel	Antal salvor	Stickning	Kommentar
TASJ	6	25 cm	Salva 1–5 sprängdes i tre delar och salva 6 i två delar.
TAS01	4	25 cm	Slätsprängning av konturhålen efter sprängning och utlastning av inre del av salvan.
TASU	13	25 cm, fr.o.m. salva 11 ansättning 10 cm utanför kontur och 30 cm stickning	Salva 1 breddad för last nisch TAS02. För salva 11–13 specialanpassad borrhållsplan för takhöjning inför påslag av TAS08.
TASP	15	25 cm, fr.o.m. salva 12 ansättning 10 cm utanför kontur och 30 cm stickning	
TAS02	3	25 cm	
TAS03	1	Ansättning 5 cm utanför kontur och 30 cm stickning	Första delen av TAS03 sprängdes som breddad salva 1 TASU.
TAS04	8	Ansättning 5 cm utanför kontur och 30 cm stickning	
TAS05	4	Ansättning 5 cm utanför kontur och 30 cm stickning	
TAS06	4	Ansättning 5 cm utanför kontur och 30 cm stickning	
TASN	13	Ansättning 5 cm utanför kontur och 30 cm stickning	
TAS08	6	Ansättning 10 cm utanför kontur och 30 cm stickning	Salvan sprängdes ut i två delar.



#### 4.10.1 Borring

Leveransen av den fabriksnya borrhigen försenades och en äldre modell av borrhigg som inte fungerade tillfredställande fick användas vid den inledande tunneldrivningen i TASJ. Borrplaner har vid behov korrigerats med hänsyn till rådande tekniska förutsättningar t ex har kilens placering flyttats vid behov för att minska risken för stenkast vid sprängning i känsliga områden. Enligt förslag från entreprenören tillämpades en annan kil än vad som var föreskrivet i principutförandena för borr-, ladd- och tändplanerna i förfrågningsunderlaget. En fördel med den tillämpade kilen är att den täcker upp arean ca 1,7 m<sup>2</sup> i stället för ca 1,0 m<sup>2</sup> med lika antal borrhål, se figur 4-21. Detta ger förutsättningar för att generera mindre specifik borring och mindre specifik laddning i salvan. Den nya utformningen av kilen fungerade bra. Det har inte observerats några problem med utbrytning av borrhål i eller i närheten av kilen. Kilen har tillämpats på samtliga salvor utan några större förändringar. Mindre justeringar av hålavstånd i kilen har genomförts vid upprättande av nya borrplaner och kilen har i några borrplaner roterats 45 grader för bättre anpassning till tvärsnittsarean för experimenttunnlar.

Stickningen utökades till 30 cm och påhuggen fick flyttas ut 10 cm för transporttunnlarna då berget inte bröt ut som önskat. Detta medförde också att experimenttunnlar utfördes med 30 cm stickning och påhugg ansattes 5 cm utanför teoretisk kontur för respektive salva, se tabell 4-10.

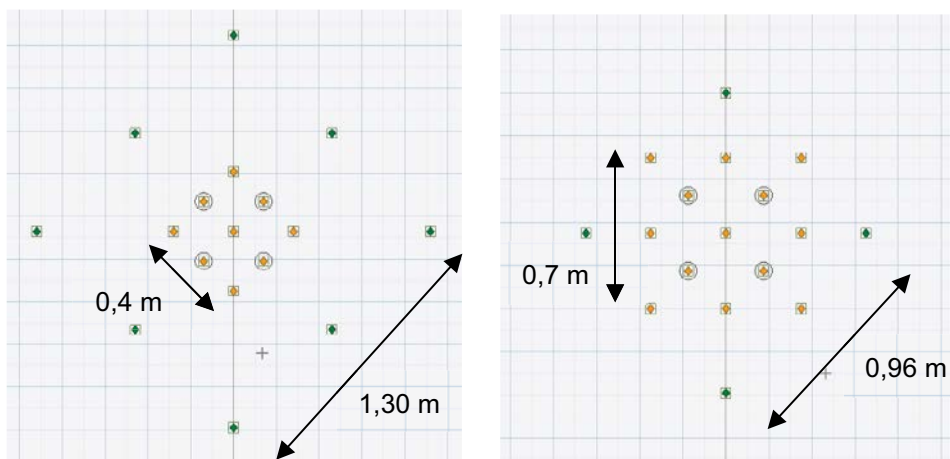
Hålnumrering för strosshålen och kilen har varit svårt att systematiskt tillämpa, då många ändringar av borrplanerna har gjorts. Ingen förutbestämd hålnumrering har tillämpats för den inre delen av salvan, dvs runt kilen. Detta har utformats olika för respektive sektion och borrplan.

Borrloggarna har innehållit loggningar av samtliga hål som varit längre än 20 cm. Detta inkluderar t ex misslyckade påhugg, felriktade borrhål som avbrutits etc vilket har medfört att ett kompletterande hål har borrats i anslutning till dessa. Borrhålet som först loggas inom en specifik radie från planerat läge är det hål som ges numrering enligt borrplan. Eventuella kompletterande borrhål ges nomenklatur t ex E1 (extrahål numreras löpande och är ej kopplade till ordinare borrhållsnummer). Borrloggen sparade ibland ordinarie borrhållsnumrering med tillägget b-e utan någon förklaring från maskinleverantören. Dessa nomenklaturproblem medförde svårigheter och extra arbete vid utvärdering av borrhållsdata.

#### 4.10.2 Laddning

Kalibrering av laddutrustningen (figur 4-22) genomfördes både innan och löpande under pågående produktion med goda resultat.

Bottenladdningsvikt med emulsionssprängämne ansattes initialt till 0,3 kg i konturhålen och 0,4 kg i hjälparhålen. Vid första salvan observerades problem med utbrytning i konturhålen botten. Ett test genomfördes, där halva taket laddades med 0,4 kg och andra halvan 0,5 kg i bottenladdning.



**Figur 4-21.** Till vänster: Tillämpad kil för experimenttunnel sektion D-D (se figur 2-6). Till höger: Kil enligt förfrågningsunderlag.



**Figur 4-22.** Kalibrering av laddutrustningen genom laddning av plexiglasrör. Till vänster: bottenladdning. Till höger: pippladdning konturhål 0,35 kg/m.

Utbyggnaden jämfört med 0,3 kg bottenladdning blev bättre och ingen större skillnad kunde ses mellan de olika laddningsvikterna 0,4 och 0,5 kg. Enligt försiktighetsprincipen tillämpades därefter 0,4 kg bottenladdning i konturhålen. Bottenladdningsvikten i hjälparhålen ökades till 0,5 kg vid inledande drivning av tunnarna TASU och TASP som en konsekvens av problem med omskjutningar, se tabell 4-11.

**Tabell 4-11. Pip- och bottenladdning.**

Håltyp enligt laddplan	Pipladdning [kg/m]	Bottenladdning [kg]
Kontur	0,35	0,4
Hjälpare/Sulhål	0,5	0,5
Kil/stross	1,8*	–

\* Fulladdat hål utan slangdragning.

Oladdad längd för respektive håltyp föreskrevs i principutförandet enligt tabell 3-8. Byggledningen och entreprenören testade inledningsvis längden för jäsning av emulsionssprängämne i borrhålen för kil och stross som har en laddning som fyller borrhålen. Längden för jäsning av emulsionssprängämnet var 1,2 m och fick motsvara oladdad längd för att inte få onödigt spill. Oladdade längder har aldrig tillämpats i konturhål, hjälparhål eller bottenhålen, då entreprenören och sprängämnesleverantörens representant påkallade riskerna för dålig utbyggnad i salvan och ökad risk för s.k. glasögon i konturen om inte konturen laddas ut till hålmynning. Nackdelen med att inte tillämpa oladdade längder är normalt en ökad luftstövåtgång och större sprängämnesförbrukning i salvorna.

Vid inledande tunneldrivning användes en styrd laddsekvens för hela salvan för att kunna utvärdera utförande utifrån laddloggen. Detta medförde merarbete som tog tid av produktionen. Efter några inledande salvor beslutades det i samråd mellan projektet och entreprenör att laddföljden endast dokumenteras för kontur-, botten- och hjälparhål. Då detta underlättade uppföljningen av de mest kritiskt laddade borrhålen. För att minska spill från emulsionssprängämnet togs ett speciellt förfarande fram. Förfarandet var att vatten kördes genom laddslangen innan laddning för att smörja den. Sedan fylldes laddslangen med emulsion och laddning av salvhålen påbörjades. Fyllnad av laddslangen registreras som salvhål i loggen. Laddningen utfördes enligt överenskommen laddsekvens av kontur-, hjälpar- och strosshål. Vid avslutande laddning sparades ett antal strosshål för att motsvara volymen för kvarvarande emulsionsmängd i laddslangen, vilket motsvarade två stycken strosshål. Vid tömningen av slangen fylldes emulsion motsvarande slangfyllnaden i dessa två strosshål (spillhål). Laddning av de två spillhålen registrerades inte för att mängden skulle bli rätt dokumenterad.

### 4.10.3 Sprängning

Vid inledande drivning av tunnarna TASP och TASU resulterade samtliga salvor i omfattande omskjutningar. Omskjutningarna var av systematisk natur och de var till största del lokaliserade i kontur- och hjälparhålen i tak. Den bakomliggande orsaken till omskjutningarna var svår att bestämma. Den mest troliga förklaringen är att ryckare har uppstått i kontur- och hjälparhålen där i-Kon tändare har använts. Till skillnad från Nonel slangarna är tändtråden till i-Kon tändarna mycket styv och svår att bryta av. Tändarna av i-Kon-typ i hjälparhålen byttes ut mot Nonel i ett försök till att identifiera problemet. Detta resulterade i att omskjutningarna förflyttades till att bara omfatta konturhålen vilket underbyggde tesen att det var ryckare som var problemet. Spärrfjäder se figur 4-23 användes från och med salva 4 i respektive tunnel TASU och TASP för att låsa i-Kon tändaren och minimera ryckare. Bedömningen är att förändringarna som genomfördes, resulterade i minskat antal omskjutningar och minskad omfattning på omskjutningarna. Experimenttunnarna med nya tunneltvärsnitt i annan geologi (ex. sprickighet, förekomst av finkornig granit) gav nya förutsättningar. Detta medförde att förändringsarbetet till stor del var kontinuerligt.

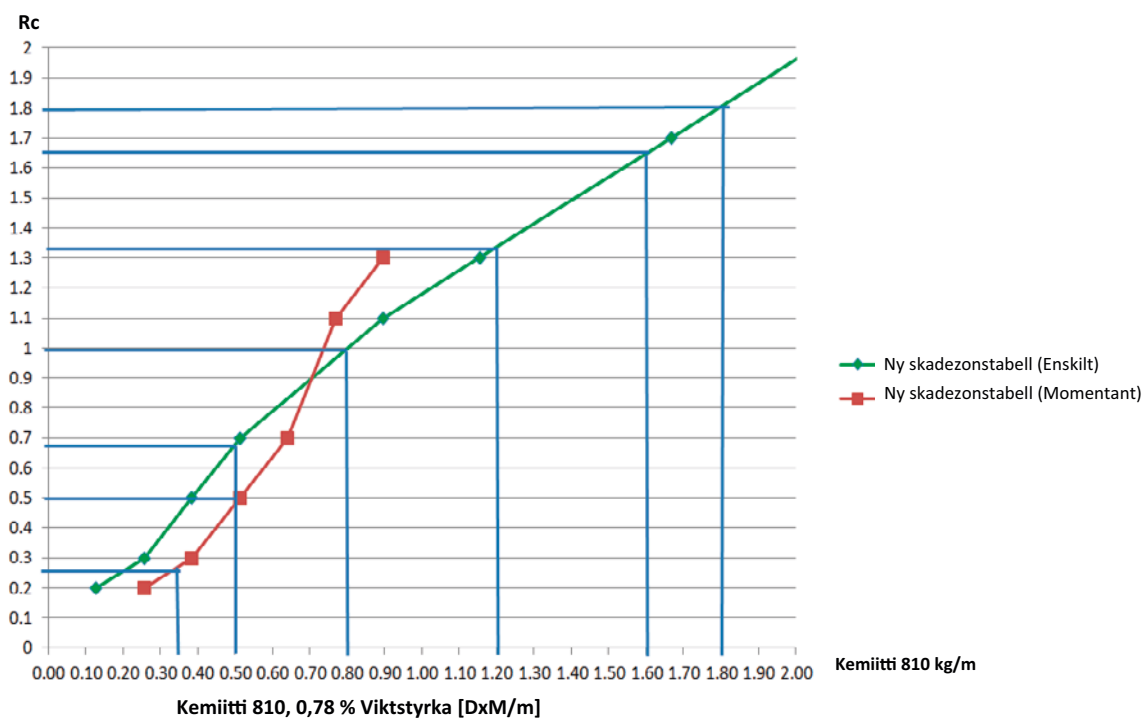
Kravet som styr dimensionering av borr- och laddplan är att skadezonutbredning i hjälpar- och strosshålen inte får överstiga skadezonen i konturhålen. Projektet hade ett principutförande som föreskrev laddningsmängder för respektive håltyp samt försättning och hålavstånd, men inte någon beskrivning av teoretisk skadezonutbredning. För att genomföra förändringar i borr-, ladd- och tändplaner är det viktigt att ha tydliggjort krav på skadezon samt att respektive laddningskoncentrations teoretiska skadezonutbredning är fastlagd för respektive laddningsmängd i olika håltyper. Vid tillämpning av skadezonstabeller eller olika skadezonsteorier beräknas vilka laddningar som kan användas för respektive håltyp och det blir enklare att designa och eventuellt införa förändringar i borr-, ladd- och tändplaner utan att riskera efterlevnad av kraven på skadezonutbredning.

Projektet såg under genomförandets gång över olika skadezonstabeller och identifierade olikheter som fått konsekvenser för upprättande av borr-, ladd- och tändplaner. Med stöd av en skadezonsteori baserad på tester med SSE bulkemulsion Titan 7000 från Ouchterlony et al. (2010) räknade projektet om så att den kan tillämpas för Kemiitti 810 sprängemulsion (Kemiitti 810 har viktstyrkan 0,78 % motsvarande sprängämnet Dynamex M per meter [DxM/m]). Teoretisk skadezonutbredning för respektive laddningskoncentration för Kemiitti 810 sprängemulsion enligt tillämpad skadezonsteori redovisas i figur 4-24. De teoretiska skadezonerna är ansatta från hålbotten. Kortast spricklängd fås om hålen initieras momentant (lika tändarenummer initieras samtidigt). Detta är enklast att åstadkomma med elektroniska sprängkapslar. Det har visat sig att skillnaden i intervalltid måste vara < 1 ms mellan hålen, för att få kortast möjliga sprickbildning.



*Figur 4-23. Spärrfjäder med borrar hål i vilken tändaren kan dras igenom och fästas i primern.*





**Figur 4-24.** Teoretisk skadezonutbredning med sprängemulsion Kemiitti 810 (framtagen efter underlag från Ouchterlony et al. 2010)

Förenklat har teoretiska skadezonutbredningar ansatts för pippladdningarna vid design av borr-, ladd- och tändplaner enligt tabell 4-12. Simultan upptändning avser borrhål som har skillnad i intervalltid < 1 ms mellan hålen vilket resulterar i en mindre teoretisk skadezon för de lägre laddningsvikterna enligt tillämpad skadezonstabelle.

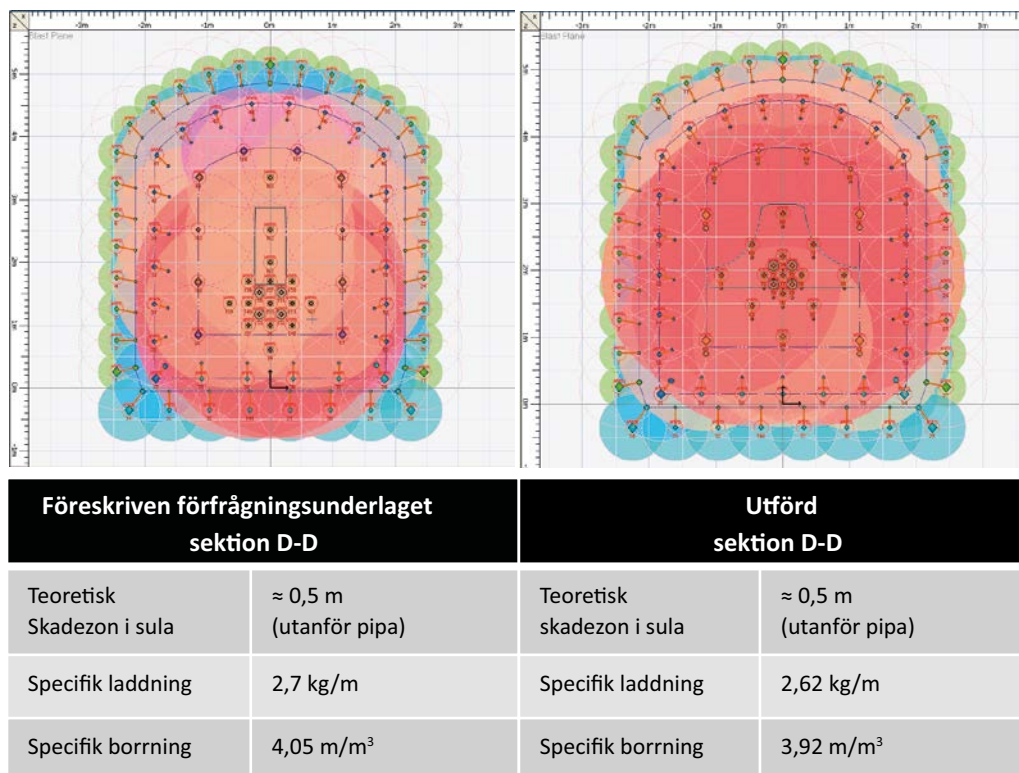
**Tabell 4-12. Teoretisk skadezonutbredning med sprängemulsion Kemiitti 810 (framtagen efter underlag från Ouchterlony et al. 2010).**

Sprängämne	Laddningsvikt [kg/m]	[DxM/m]	Pipladdning Teoretisk skadezonutbredning [m]
KEMITTI 810, 350 g/m	0,35	0,27	≈ 0,25 (Simultan)
KEMITTI 810, 500 g/m	0,5	0,39	≈ 0,5/0,7 (Simultan/enskilt)
KEMITTI 810, 800 g/m	0,8	0,62	≈ 1,0 (enskilt)
KEMITTI 810, 1 200 g/m	1,2	0,94	≈ 1,35 (enskilt)
KEMITTI 810, 1 800 g/m	1,8	1,4	≈ 1,8 (enskilt)

Denna skadezonsteori tillämpades som ett designkriterium vid utformningen av borr-, ladd- och tändplaner i sektion D-D och sektion A-A, dvs tunnarna TASN, TAS04 och TAS03 samt för tunnarna TAS05 och TAS06. I förhållande till utsänd borr-, ladd- och tändplan i förfrågningsunderlaget flyttades kilen upp för att minska risken för ökad skadezonutbredning från strosshål. Figur 4-25 redovisar skillnaderna i teoretisk skadezonutbredning mellan utsänt borr-, ladd- och tändplan i förfrågningsunderlaget och tillämpat utförande enligt underlag i tabell 4-12.

Den uppflyttade kilen i utförd sektion ger god marginal i sulan för överlappningen av teoretisk skadezonutbredning. De fulladdade hålen genererar en stor teoretisk skadezonutbredning enligt tillämpad ny skadezonsteori. På grund av de relativt små tunneltvärsnitt i experimenttunnarna enligt sektion D-D (figur 2-6) överskrider nästan de fulladdade kil- och strosshålens skadezonen i konturen.

## Blast plane



**Figur 4-25.** Teoretisk skadezonsutbredning sektion D-D (figur 2-6), enligt Olsson och Ouchterlony (2003) till vänster, enligt Ouchterlony et al. (2010) till höger. Respektive laddningskoncentration enligt tabell 4-11 har olika färglagda radier (grönt konturhål, blått sul-/hjälpåreål, rött kil-/strosshål) som redovisar teoretisk skadezonsutbredning.

### 4.10.4 Geometri och kontur

Geometrikontroller har gjorts baserad på fotogrammetrin där verklig tvärsnittsarea har jämförts mot teoretisk. Då sulan ej har rensats inom projektet är den inte inkluderad. Tvärsnittsarean har sammanställts och jämförts mot kravet < 30 % överberg samt inget underberg. Stickningen fick utökas till 30 cm och påhuggen fick flyttas ut och ansättas 10 cm utanför teoretisk kontur för transporttunnlarna då berget inte bröt ut som önskat. Detta medförde också att experimenttunnlarna utfördes med 30 cm stickning och påhugg ansattes 5 cm utanför teoretisk kontur. I tabell 4-13 nedan presenteras en sammanställning från TASN och TAS04, där designkriteriet för en deponeringstunnel tillämpats. Inget underberg har påträffats i tunnlar. Variationer för tvärsnittsarea för transporttunneln TASP, samt för experimenttunnel TASN och TAS04 presenterad i bilaga I.

**Tabell 4-13. Geometrikontroll TASN och TAS04, exklusive sulan.**

Tunnel	Sektion	Överberg
TASN	8,5–54,5 m	22,5%
TAS04	5,5–36,5 m	25,2%

## 4.11 Bergförstärkning

Vid den inledande tunneldrivningen genomfördes salvskrotning från arbetsplattform. Salvskrotningen genomfördes med två man med skrotspett efter utlastning, dvs ingen mekaniserad skrotning. Eftersom skrotningsarbetet dessutom krävde en man att manövrera arbetsplattformen, så innebar det

att entreprenörens personella resurser var upptagna och det var inte möjligt att bedriva andra aktiviteter samtidigt. I syfte att förbättra arbetsmiljön och minska cykeltiden för skrotning avropades det en hjulgrävare försedd med knack och rivkrok.

Sprutbetong har applicerats inom anläggningen. Innan applicering av heltäckande förstärkning eller innan överlämning av entreprenaden har bergrumsansvarig från Äspölaboratoriets driftorganisation synat förstärkningen för behov av eventuell komplettering. Generellt har enhetlig syn funnits mellan byggläddning och bergrumsansvarig rörande erforderlig bergförstärkning. Bergrumsansvarig har även varit behjälplig som stöd till byggläddningsorganisationen vid hantering av frågor gällande t ex kontroller och provningar på bergförstärkning.

Byggläddningen har utfört löpande kontroll av bergförstärkningen. Bergrumsansvarig har utfört förbesiktningar och kompletterande kontroller inom ramen för Äspölaboratoriets driftorganisation. Slutbesiktning genomfördes av extern besiktningsman.

#### **4.11.1 Bultning**

Utmärkning av lägen för selektiv bult har till största del genomförts av byggläddningen efter samråd med entreprenör. Eftersom arbetsmiljöansvaret under utförandet är entreprenörens har antal bult, bultlängder och instruktioner avropats som rekommenderade lägen för driftförstärkning. Vid behov och om möjlighet funnits har även bergrumsansvarig varit behjälplig som stöd vid markering av bultlägen. Borrripgens matarbalk var för lång för att medge borrning av bulthål vinkelrätt mot konturen i transporttunnlarna. Detta innebar att ett längre bulthål vinklat mer längs med tunnelriktningen, behövde borras. Denna förändring accepterades av byggläddningen efter samråd med bergrumsansvarig.

Bultlängden ökades till 4,0 m i tunnelmyningarna till transporttunnlarna och i tunnel TAS08 med hänsyn till den stora spännvidden i enlighet med dimensionering enligt Q-systemet (NGI 2013, s 34). Bultlängden 2,4 m har använts i experimenttunnlarna och bultlängden 3,0 m i transporttunnlarna.

De första bultarna installerades i tunnlar TASJ och TAS01. Bultarna förbereddes för Cavimetertest genom montering av en slang som var försedd med hål. Samtliga bultar som provades i tunnlar TASJ och TAS01 godkändes. Resultaten från den fortlöpande provningen med Cavimetertest i tunnlar TASU och TASP påvisade relativt hög andel anmärkningar på dålig ingjutning. Dålig ingjutning i bulthålets mynning kan resultera i en underkänd bult enligt Cavimetertestet. Bultar testade med Cavimeter kompletterades med Boltometertest i Äspölaboratoriets driftorganisations regi. Boltometertestet mäter inte ingjutningen i de första ca 1,5 m av bulten vilket medför att dessa kontrollmetoder till viss del kompletterar varandra. Bultar med anmärkningar från Cavimetertest stämde inte överens med resultaten från Boltometertestet. Underkända bultar enligt Boltometertestet och bultar med anmärkningar på dålig ingjutning som visuellt kunde urskönjas, kompletterades med ny bult.

För att få till bättre vinkel vid montering av bult anlätades en underentreprenör med mindre borrhög för bultborrning i experimenttunnlarna. I samband med detta så användes Pc-bult då den har fördelen att den kan användas som driftförstärkning eftersom den tar last innan ingjutning. Ingjutning kan utföras senare i kampanjer, vilket medför att den inte påverkar produktionen. Det finns även arbetsmiljöfördelar med montering av Pc-bult eftersom den monteras innan bruk har förts in i bulthålet vilket underlättar arbetet speciellt vid långa bultlängder.

Paltning av bultbricka har inte genomförts. Innan tunneldrivningsstart diskuterades det om paltning behövde genomföras vid bultmontering av SN-bult. Bedömningen var att detta inte gör någon skillnad med avseende på korrosion eftersom bultbricka, halvkula och mutter är luftexponerad. Vid montering av Pc-bult fungerar metoden med ingjutning av Pc-bult ungefär på samma sätt som konventionell paltning.

#### **4.11.2 Sprutbetong**

Sprutbetongarbeten genomfördes i två kampanjer. Den första kampanjen innefattade applicering av sprutbetong i mynningarna till transporttunnlarna TASU och TASP samt ett avrop på sprutning i tunnel TASJ på uppdrag av Äspölaboratoriets driftorganisation. Vid den första sprutbetongkampanjen täcktes alla installerade bultar i mynningen till tunnlar TASU och TASP med fiberarmerad

sprutbetong. Mängden använd sprutbetong var högre än förväntat trots den jämna konturen med relativt lite överberg. En anledning är att det vid tjockleksmätningar påvisades att det lagts på tjockare lager än vad som beställts.

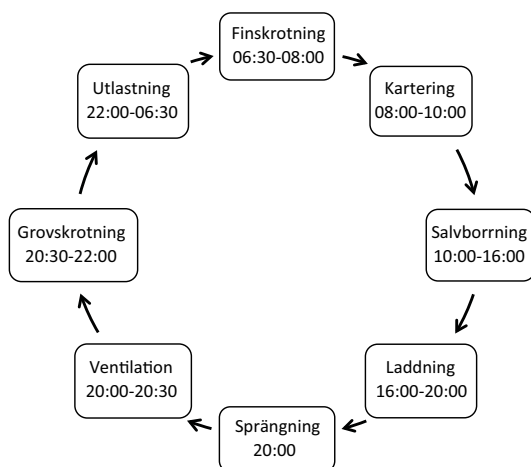
Den andra kampanjen omfattade sprutning av tunnarna TASU, TASP, TAS08 och TASN samt ett tillkommande avrop på sprutbetongarbeten på uppdrag av Äspölaboratoriets driftorganisation. Innan den andra kampanjen skruvades alla bultbrickor ned på installerade bultar. Plaströr som skydd för betongsprutning monterades över bultens utstickande del. Efter applicering av sprutbetong och härdning monterades brickorna tillbaka. Den huvudsakliga anledningen till detta utförande var att Cavimetertest på installerad bult inte var genomförd innan betongsprutningskampanjen. Vid leverans av sprutbetong i den andra sprutbetongskampanjen levererades fel kvalitet på sprutbetongen med bl a fiberklumpar och för grovt material etc. Detta föranleder att det är viktigt att verifiera att leverantörens kvalitetskontroll av sin leverans har genomförts innan leveransen av sprutbetong levereras till beställaren.

## 4.12 Organisation respektive tidsplan

I förfrågan så föreskrevs att det skulle finnas en platsansvarig eller arbetsledare, en geodetiker samt tre yrkesarbetare vid varje skift för att kunna utföra och dokumentera tunneldrivningsarbetet, samt rapportera till delprojekt tunneldrivning. Arbetet var planerat att köras i 10 timmarsskift och 4 dagar i veckan. Den 5:e dagen var planerad för att användas för sammanställningar och utvärdering.

När anbud inkom så fanns det förslag på hur tunneldrivningen kunde optimeras med skift på 14,4 timmar och 5 dagar i veckan. Den teoretiska salvcykeln förväntades i princip generera en salva per dag se figur 4-26. På så sätt bedömde entreprenören att fasta kostnader kunde reduceras såsom hyra av t ex borrhög, skylift och hjullastare. Bedömningen från entreprenören var att samma resurs kunde fungera som platsansvarig, arbetsledare och utsättare. Detta förslag presenterades för projektets beställare och chef för Äspölaboratoriets driftorganisation för att se om anläggningen kunde vara behjälplig trots att arbete behövde utföras utanför ordinarie arbetstid. Då detta förslag bedömdes ge ekonomiska fördelar och att tidsplanen förväntades kortas, så antogs förslaget. Arbetet organiserades i två skift som växlade med varandra och principen var att skiftlagen jobbade onsdag lunch till onsdag lunch med ledighet för lördag och söndag.

Bergförhållandena i tunnarna TASU och TASP visade sig inte stämma fullt ut med den geotekniska prognosen. Berget krävde mer injektering, skrotning och förstärkningsinsatser än förväntat. Trots bra arbetsinsatser i fält från entreprenören, så räckte inte entreprenörens resurser till för att utföra tunneldrivning, injektering, skrotning och den bergförstärkning som behövdes inom önskad framdrift. En grundlig genomgång av utförandet genomfördes för att se hur arbetet kunde effektiviseras. Enhetstider för olika aktiviteter för den inledande tunneldrivningen genomlystes och bedömdes, se tabell 4-14.



Figur 4-26. Teoretisk salvcykel.

**Tabell 4-14. Medelvärde tidsåtgång och enhetstider för tidsplanering.**

Aktivitet	Medelvärde tidsåtgång [tim]	Enhetstider för tidsplanering [tim]
Skrotning	6,8	6
Skrotning omskjutning	4,5	
Borrning	7,5	6,5
Borrning omskjutning	2	
Laddning	6,6	6,5
Laddning omskjutning	2,2	
Skyddstäckning	0,6	
Ventilation	3	2
Utlastning	8,5	8,5
Kartering	5,3	5,5

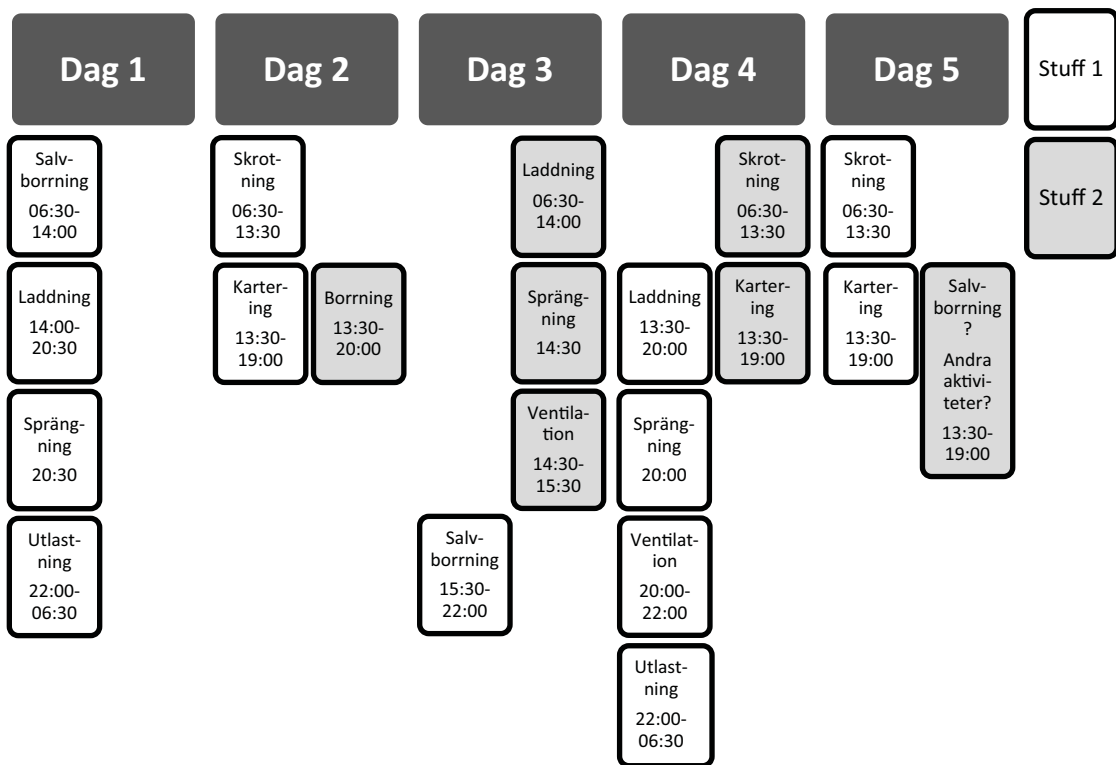
Med identifierade enhetstider drogs slutsatsen att det inte var möjligt att utföra en salva/dag om drivningen bara kunde utföras på endast en tunnelfront. Det krävdes en arbetsmetodik kallad löpande salvcykel på två tunnelfronten för att utföra en salva per dag. En löpande salvcykel innebär att salvcykelns olika aktiviteter efterföljer varandra vilket medför att tiden för salvcykeln förläggs över flera dagar. Entreprenörens aktiviteter växlas mellan tunnelfronterna för att inte vara beroende av karteringstiden. Detta innebär att entreprenörens arbetstid optimeras utan planerade stillestånd. Bedömningen var att detta var det mest optimerade arbetssättet givet de resurser som då fanns tillgängliga. Bedömningen var att den teoretisk indriftshastigheten förväntades kunna bli tre salvor i veckan. Nackdelen med metoden var att det fanns svårigheter att i detalj tidsplanera för längre perioder.

Strategin för den löpande salvcykeln illustreras i figur 4-27. Aktivitetstider baseras på de identifierade enhetstiderna från utfört bergschakt i tunnlarna TASP och TASU. Den löpande salvcykeln resulterar i en teoretisk indriftshastighet på tre salvor i veckan, men med t ex extra skrotningsinsatser och omskjutningar så förväntades endast 2–2,5 salvor per vecka uppnås med två tunnelfronten tillgängliga.

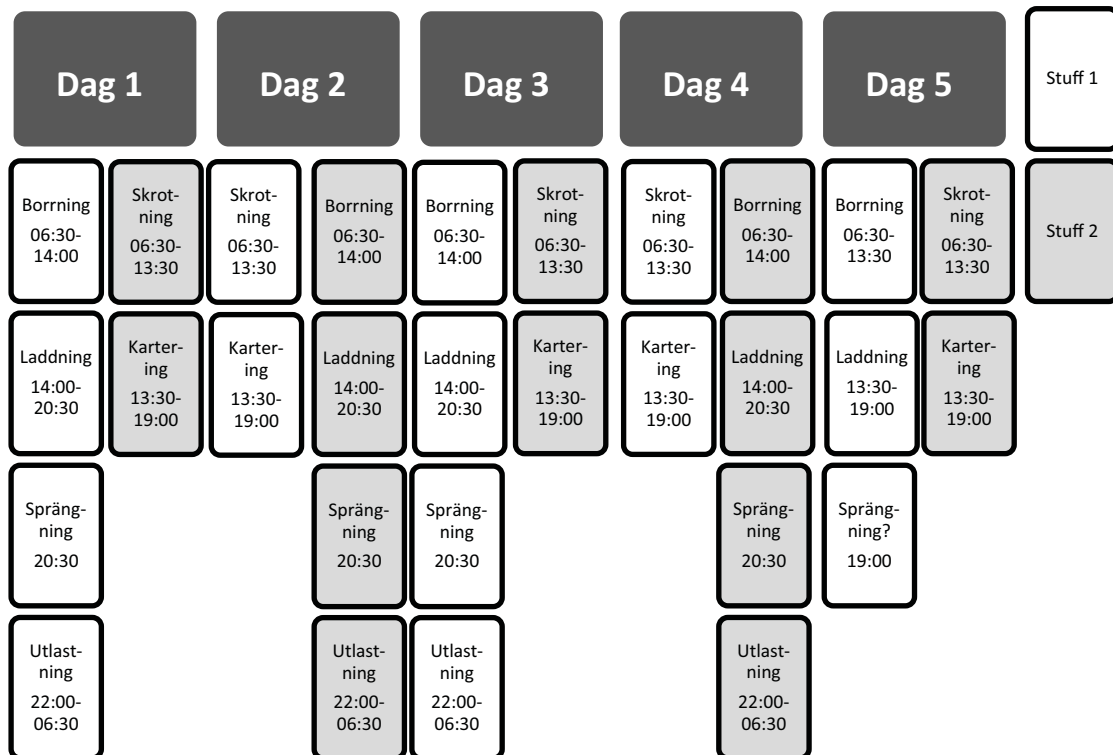
En analys av vad som behövdes i form av maskiner och personal för att kunna optimera tunneldrivningen genomfördes. Resultatet visade att det som tog mycket tid var manuell skrotning samt att arbetet genomfördes från en borrhigg. Detta medförde att borrhiggen inte kunde användas för borrning vilket den var avsedd för. Införande av utrustning för maskinell skrotning, kompletterande arbetsplattform för att frigöra borrhiggen samt införande av en extra yrkesarbetare medförde att tiden för skrotning blev avsevärt förkortad. Dessutom tillfördes organisationen en extra bergarbetare som arbetade fyra dagar i veckan (måndag till torsdag). Denne arbetade med skrotning, allmän service och underhåll, t ex slipning av borrhjull, samt såg till att manschetter fanns tillgängliga och fungerande för de olika aktiviteterna. Vidare förstärktes organisationen med en skylift som medförde att det fanns en arbetsplattform för ensamarbete.

Optimeringsförslaget gav en teoretisk indriftshastighet på 4–5 salvor i veckan (planerad salvlängd 4,5 m), se figur 4-28. Bedömningen var att den praktiska indriftshastigheten med optimeringssalvcykeln är ca tre salvor med geometri av en transporttunnel (39,2 m<sup>2</sup>) i veckan på grund av extra skrotningsinsatser och omskjutningar.

Ingen hänsyn kunde tas till faktorer som t ex oplanerade bergförstärkningsinsatser, eventuella injekteringskompletteringar. Om detta inträffade bedömdes optimeringen som robust, och det förväntades gå att utnyttja den löpande salvcykeln under dessa omständigheter och återkomma till vald optimering inom två dagar. Bedömningen var också att det förväntades gå att fastlägga experimenttunnlar efter hand som arbetet fortskred, vilket kunde ge ännu fler tunnelfronten att arbeta på, öka flexibiliteten och i bästa fall medföra drivning av någon extra salva i veckan. Bedömningen var att detta kunde korta ned entreprenaden med tio dagar.



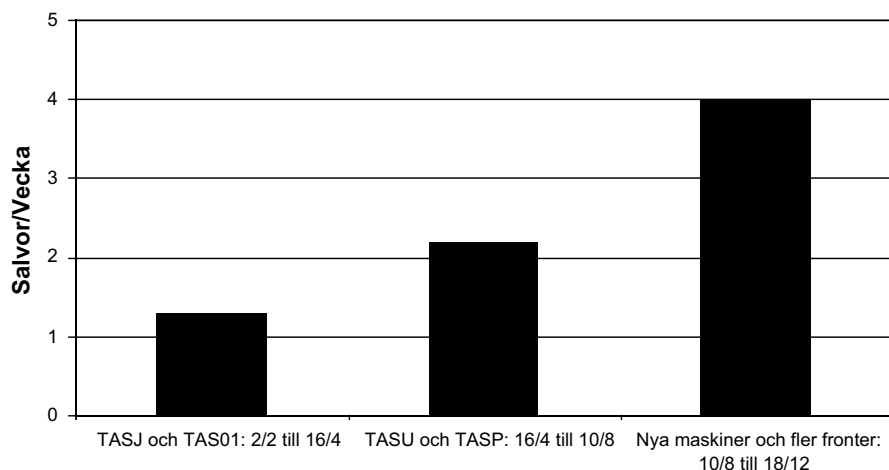
Figur 4-27. Illustration för löpande salvcykel.



Figur 4-28. Föreslagen optimering av salvcykeln med kompletterande arbetsplattform.

#### 4.12.1 Utfall tunneldrivning

I projektet har förutsättningarna för optimering av salvcykeln förändrats med tiden, se tabell 4-15 och figur 4-29.



**Figur 4-29.** Framdriften för tunneldrivningen i projektet under 2012. I beräkningen ingår tid för driftförstärkning och nödvändig sprutbetongförstärkning av påslag i TASP och TASU samt avfasningar och strossning. Tid för injekteringsskärmar ingår inte i sammanställningen.

**Tabell 4-15. Förutsättningarna för optimering av salvcykeln för de olika delarna av utbyggnaden.**

Tillgängliga områden	Tidsperiod	Förutsättningar
TASJ och TAS01	2/2 till 16/4, 2012	TASJ: Salvor togs ut i tre delar (strossades) för att minska risken för påverkan av känslig instrumentering. Omfattande strossning för instrumentnisch i TASJ samt konturen sprängdes separat för TAS01.
TASU, TASP och TAS02	16/4 till 10/8, 2012	Parallell drivning på två fronter. Cykeln är känslig för störningar, t ex lång tid för kartering, handskrotning eller omskjutning.
TASU, TASP + experimenttunnlar med nya maskiner och personal	10/8 till 18/12, 2012	Parallell drivning på fler fronter, vilket ger flexibilitet. Tillgång till skylift, maskinskrotning och en extra bergarbetare på dagskift måndag till torsdag

Tabell 4-15 visar tydligt hur olika förutsättningar påverkar möjligheten till optimering av salvcykeln och i förlängningen kopplar till framdrift i tunneldrivningen. Framdriften ökar med ca 80 % då arbete kan ske på ett flertal fronter i experimenttunnlar i den ena transporttunneln och exempelvis kartering kan ske i experimenttunnlar i den andra transporttunneln. Detta visar vikten av att alltid ha tunnelnfronter tillgängliga för borning, laddning och sprängning. Det var viktigt att kritiska aktiviteter som påverkar tillgängligheten t ex kartering, skrotning, förstärkning och i viss mån utlastning görs där det inte påverkar framdriften. Som figur 4-29 visar, så ökade framdriften med de extra resurser som satts in i form av skylift, maskinskrotning och en extra bergarbetare på dagskift måndag till torsdag.

## 4.13 Uppfyllelse av uppställda krav från intressenter

### 4.13.1 Återkoppling till intressenter med behov av experimentplatser

#### **KBP1004:s systemutveckling av valvplugg**

Experimenttunneln TAS01 för Valvpluggsprojektet förlades i ett torrt område vilket motsvarat det högst prioriterade kravet för experimentplatsen som var att inget vatteninläckage fick förekomma i pluggområdet och utrymmet fram till tunnelnfronten. Valvpluggsprojektet genomförde karakterisering av borrhäls och vatteninjektionstester genomfördes i pilothålet vid högt tryck (10 MPa). Bra geologiska och hydrauliska (täta) förutsättningar kunde konstateras varvid pluggläget och den slutliga tunnallengden (15 m) fastställdes. Salvorna anpassades i längd till fastställt läge för valvpluggen. Tunneldrivningen genomfördes med en drivningsteknik framtagen för att minimera skadezonen

utöver vad som krävs för en deponeringstunnel. Alla borrhål i salvan borrades upp varefter stross och hjälpare sprängdes ut. Sedan togs konturen ut och konturhålen laddades med momentan upptändning för respektive vägg, sula och tak för att minimera skadezonen och generera bästa konturen.

### **KBS-3H**

KBS-3H:s krav på högt grundvattentryck resulterade i projektets kontrollprogram och krav på maximal grundvattenavsänkning av 500kPa. Grundvattentrycket för TASU i höjd med tunnel TAS08 var innan tunneldrivning ca 3 720 kPa med en gradient längs tunnel TASU tänkta mittlinje mot huvudtunneln TASA till cirka 3 600 kPa. Referensborrhålet KA2050A påvisar en grundvattenavsänkning efter tunneldrivningens slut på ca 200 kPa.

Tunneln TAS08 har enligt KBS-3H:s önskemål orienterats parallellt med den största huvudspänningen och därmed parallellt med det största konduktiva spricksetet på Äspö. Detta ger bra förutsättningar för att minimera risk för inläckage i det planerade fullskaleförsöket, eftersom borrhålet lätt kan drivas i samma riktning som tunnel TAS08, dvs parallellt med bedömda vattenförande strukturer och största huvudspänningen. Dessutom kan läget för borrhålets påhugg anpassas i tunelfronten. Tunnel TAS08 har förstärkts med sprutbetong och injekteringskärmarna har anpassats så att minimal spridning av injekteringsbruk har skett i bergvolymen.

### **DETUM-1**

Projekt DETUM-1 fick ingen egen experimentplats, utan genom optimering av layouten samt tidsplanen bedömdes det att DETUM-1 kan utföra sina experiment i tunnel TAS03 före det att tunneln överlämnas till SKB International och Nova FoU. Tunnel TAS03 är placerad c/c 41 m (centrumlinje till centrumlinje) ifrån TAS08.

### **Concrete and Clay**

Tunnlarna för projekt Concrete and Clay, TAS05 och TAS06, kunde förläggas i torra områden och därmed drivas utan förinjektering och närhet till cementprodukter kunde därmed minimeras. Vid drivningen projekterades det även för ett säkerhetsavstånd på 5 m till befintliga injekteringskärmarna i transporttunnlarna TASU respektive TASP vilket medförde att tunnlar drevs till 16 m (TAS05) respektive 17 m (TAS06).

### **SKB International och Nova FoU**

SKB international och Nova FoU hade inga specifika krav för området. Sammanlagt behövde det byggas 100 m tunnel med en tunnelgeometri som överensstämmer med den gällande utformningen för en deponeringstunnel. Tunnellängderna var föreslagna till 50 m, 30 m samt två tunnlar på 10 m som behövde placeras i så olika geologiska förhållande som gick att åstadkomma inom tunnelvolymen.

Sammanlagt drevs 101 m tunnel för SKB International och Nova FoU:s räkning. Tre tunnlar placerades utgående från tunnel TASP och en tunnel placerades utgående från tunnel TASU. Tunnel TASN drevs till 52 m och injekterades. Tunnel TAS04 drevs till 29 m och placerades i ett torrt område där ingen injektering krävdes. Tunnel TAS02 placerades i en befintlig lastnisch som var förinjekterad och har därmed en större tunnelgeometri. Tunnel TAS03 placerades i en påbörjad lastnisch i TASU som var förinjekterad, där flera geologiska strukturer korsar varandra.

## **4.13.2 Återkoppling till intressenter av teknikutveckling**

### **DETUM-1**

Ett önskemål som var ställt på utbyggnadsprojektet från projekt DETUM-1 var att det skulle organiseras så att det i möjligaste mån efterliknar den organisation som kan tänkas vara lämplig för uppförandet av Kärnbränsleförvaret (SKB 2010a). Utbyggnadsprojektet organiserade sig därför så att delprojekt karakterisering representerade den undersökningsgrupp inom projektet som ansvarade för alla undersökningar, geovetenskapliga modelleringar och upprättande av prognoser.



Undersökningarna genomfördes integrerade med projektering (som var kravställande) samt med tunneldrivningen.

Tunnelkarteringen i projektet genomfördes med hjälp av det nya karteringssystemet RoCS (Rock Characterisation System) i 3D.

Projektet genomförde undersökningar i pilotborrhål som underlag för geovetenskapliga modeller och prognoser gällande förinjektering som baserades på geovetenskapliga prognoser för bergets egenskaper och vatteninflöden. Projektet genomförde både förenklad geologisk enhålstolkning (SHI light) baserat på underlag utan BIPS, geofysik och hydrotester samt fullständig geologisk enhålstolkning baserat på BIPS, geofysik och hydrotester.

Från projekt DETUM-1 kom önskemål att vidareutveckla arbetsprocesserna som hade tagits fram inom ramen för detaljundersökningsprogrammet (SKB 2010a). Utbyggnadsprojektet lade ner stort arbete för att anpassa dessa dokument till sina behov. På grund av att mycket tid fick läggas ner på uppdatering av dokument innan upphandling av entreprenaden samt att tid krävdes för framtagning av aktivitetsplaner slutfördes dock aldrig denna uppgift och beskrivning av arbetsprocesserna blev därmed inte helt färdigställda. Det process-schema som färdigställdes täcker hela projektet från förundersökningarna fram till uttag av tunnlar. Processerna hade som avsikt att fungera som ett stöd i arbetet där arbetsflödet under tunneldrivningen tydligt framkom, samt gav underlag för beslutspunkter, och pekade på vem som hade mandat att ta beslutet. Process-schema utgjorde ett viktigt underlag för att identifiera beroenden och kopplingar mellan delprojekten. I bilaga H visas de arbetsprocesser som projektet identifierade för drivning av en experimenttunnel.

### ***Utveckling av Bergprojekteringsmetodik baserad på observationsmetodens principer och RESKONTR***

Utifrån projektets utveckling av Bergprojekteringsmetodik baserad på observationsmetodens principers önskemål, gjordes tillämpning av observationsmetoden på injektering eftersom projektets största osäkerhet var hur kravet på att minimera avsänkning av grundvatten tryck uppfylls.

Projekt RESKONTR:s mål var att effektiviseringar för att skapa en industrialiserad tunneldrivningsprocess behövde inarbetas i utbyggnadsprojektets planering. De effektiviseringar som föreskrevs och som också inarbetades var användande av emulsionssprängämne samt rationella beslut avseende injekteringsstrategi som baseras på enkla beslutsmodeller och koncept enligt Real Time Grout Control för att få så korta injekteringstider som möjligt men med erforderlig täthet. Under injekteringsarbetet uppstod dock problem med härdning av låg-pH bruket som inte förutsågs vilket medförde att projektet fått gå utanför beslutsmodellen och kompletterat strategin.

Projekt RESKONTR:s mål var också att utbyggnadsprojektet behövde tydliggöra hur krav omsätts i specifikationer för arbetet och kontrollplaner, samt hur utförande- och resultatkontroller används i en process för ständiga förbättringar. Projektet skapade ett kontrollprogram som bestod av sex stycken kontrollplaner vilka uppdaterades under projektets gång.

Projekt RESKONTR fick möjligheten att i ett tidigt stadium i drivningen av tunnel TASJ gå in och genomföra resultatkontroll av skadezonens omfattning (EDZ), samt testa och verifiera undersökningsmetoder och strategier för detta. Efter att utbyggnaden var färdig har detta även genomförts i tunnlar TAS04 och TASN.

## **5 Summering av viktiga erfarenheter och rekommendationer**

### **5.1 Anpassning till befintlig anläggning Äspölaboratoriet**

Äspölaboratoriet är en anläggning som är öppen för allmänheten och tar emot tusentals besökare per år samtidigt som ett flertal experiment utför verksamhet i anläggningen. Detta medförde att tunneldrivningen behövde samordnas löpande med övrig verksamhet och anpassas till krav som är satta efter den dagliga verksamheten. Kraven har endas inneburit mindre påverkan på projektet i form av några korta stillestånd i produktion som resultat av att telefonin inte har fungerat eller att hissen stått stilla för service och underhåll och därmed en utrymningsväg varit blockerad. För att minimera stillestånd vid tunnelproduktion är det viktigt att krav och rutiner kopplat till exempelvis tillträde och säkerhet utarbetas efter vilken verksamhet som bedrivs i anläggningen.

Äspölaboratoriet har en befintlig infrastruktur för el, vatten, belysning, ventilation och ett system för bergdränage. Äspölaboratoriets driftorganisation fanns på plats och stöttade projektet i stor omfattning under tunnelproduktionen, med styrning av brandlarm, ventilation etc. Inför start av tunnelproduktion är det viktigt att en driftorganisation byggs upp. Redan under projektering är det viktigt att representant från kommande driftorganisation medverkar för att interimslösningar för infrastruktur samt installationer följer med i projektering och byggande.

### **5.2 Karakterisering och geovetenskaplig modellering**

#### **5.2.1 Kärnbörning**

Kärnbörningen i projektet fungerade bra. Fyra kärnborrhål borrades och undersöktes. Injektering av kärnborrhål behövde tillämpas vid vatteninflöden över 100 l/min. Det som avsågs med en begränsning på 100 l/min gällde främst för införsel av undersökningsutrustning, speciellt för radarutrustning men även stänger till hydrotestutrustning. Den injekteringsutrustning som användes i projektet för injektering av kärnborrhål fungerade inte tillfredställande då den inte klarade av en selektiv injektering av en borrhålssektion.

För injektering av kärnborrhål kan inte utrustningen vara primärt kravställande. Krav på vilket inflöde samt hur mycket injektering som kan tillåtas behöver fastläggas utifrån långsiktig säkerhet. När kraven är satta för vilka inflöden som behöver mätas i hydrogeologiska undersökningar, vilket bruk som ska användas samt hur mycket påverkan injekteringsmedel tillåts göra, kan sedan rätt injekteringsstrategi, utrustning för införsel och injektering utvecklas.

#### **5.2.2 Karakterisering**

Undersökningarna har genomförts enligt tidigare förankrade samt tillämpade metoder och verktyg för geologiska, geofysiska, hydrogeologiska och hydrogeokemiska undersökningar enligt fastställda metodbeskrivningar. HWIC hade utvecklats av SKB och testades i samband med detaljundersökningarna i förundersökningsborrhålen och pilotborrhålen. Injektionstester med HWIC har fungerat bra. I samband med injektionstester med HWIC i KA3007A01 genomfördes SAT (Site Acceptance Test) av utrustningen med gott resultat. Problem med införingsutrustningen (den gamla UHT-riggen) innebär att SKB bör ta fram en införingsrigg som klarar av de krafter som krävs för att föra in mätutrustningen i hålet på aktuella djup. Detta arbete är initerat och är en vidareutveckling av den nyligen framtagna införingsriggen för lättare utrustningar.

Sonden Century 8144 som mäter normal resistivitet samt Caliper-1 i det geofysiska loggningspaketet fungerade inte i underjordsmiljön på Äspölaboratoriet. En utvärdering behöver genomföras om dessa sonder tillför nödvändig data för detaljundersökningsprogrammet. Varefter en bedömning kan genomföras om tillförlitligare sonder behöver utvecklas eller om dessa sonder kan plockas bort ur loggningsprogrammet

Den förenklade geologiska enhålstolkningen (SHI-light) fungerade bra och resultatet var tillräckligt för projektet, framförallt som underlag för prognoser för projektering och tunneldrivning. Resultatet av den traditionella geologiska enhålstolkningen (SHI) är framförallt viktigt för avnämning av den övergripande geologiska modellen SDM (Site Description Model).

Rekommendation är att identifiera vilka undersökningar som behövs som underlag för tunneldrivningen och eller förståelse för bergets egenskaper av väsentlig betydelse (långsiktig säkerhet). Metoder och undersökningar behöver kritiskt granskas gällande tidsuppskattningar och kostnader innan de godkänns och läggs in i tidsplan och budget. En utvärdering av data från utbyggnadsprojektet gällande nyttan av utförda undersökningar för tunneldrivning kontra tid och kostnader kan vara en grund som kan ge bra information inför ett sådant arbete.

### 5.2.3 Tunnelkartering

En traditionell översiktsskartering av tak och väggar som presenterades på ett pappersark användes, där den teoretiska tunnelkonturen var utritad och där endast större strukturer ritades in, exempelvis sprickor eller deformationszoner som kan följas runt hela tunnelperiferin (Full Perimeter Intersection (FPI)), observationer av vatteninflöde och sämre bergpartier. Denna traditionella översiktsskartering var tillgänglig direkt efter kartering och gav tillräckligt med information för projekteringen. Dock behöver salvan fotograferas om en geometrikontroll ska utföras, då 3D modellen som skapas i Shape Matrix används för ändamålet.

Trots att enbart fronterna karterades med RoCS vid den s.k. frontkarteringen gav det stor påverkan på tunneldrivningen i form av stillestånd vid drivning på en front. Det är viktigt att rätt nivå på karteringen tas fram för minsta påverkan samt att tiden för kartering av front och väggar och tak tas med i planeringen där endast en front finns att tillgå. När karteringen av väggar och tak anpassades till produktionen påverkades inte framdriften.

### 5.2.4 Geovetenskaplig modellering

Strategin för geovetenskaplig modellering och prognoser kom in sent i projektet och borde ha varit med i planeringsstadiet dvs innan all data börjat tolkas och modelleras. Inom undersökningsgruppen växte en metodik fram samtidigt som integrationen mellan geologi och hydrogeologi stärktes. Den geovetenskapliga modelleringen genomfördes till en början genom att ämnesvis tolka data för att skapa ett geovetenskapligt koncept för bergvolymen. Det givna konceptet visade förekomst av subvertikala vattenförande mindre deformationszoner/strukturer med en NV-SO-lig och NNV-SSO-lig strykning.

Data från undersöknings- och pilothålen samtolkades mellan ämnesdisciplinerna. Tillsammans med data och modeller från tidigare undersökningar togs det fram geologiska strukturmodeller och hydrauliskt konduktiva struktur (HCF)-modeller. Båda modellerna baserades på all tillgänglig data. Gemensamma modelleringssessioner pekar på tydlig överensstämmelse mellan vissa HCF och vissa mindre deformationszoner (MDZ). Dessa parallella modeller (till och med modell M2.5) kvarstår tills all data finns framme för tolkning, dvs när all tunnelkartering har genomförts. Därefter kommer en sammanslagning ske till en gemensam modell M3. Notera att modellerna M.2.1-M2.5 samt levererade leveransmallar till projektören var tillräckliga för projektören för att kunna fastställa läget av experimenttunnlarna. Modellen M3, vilken baseras på samtliga geologiska och hydrogeologiska data från samtliga tunnlar utgör ett stöd för framtida förståelse av berget och när det är framtaget kommer det till nytta för de intressenter som bokats in sig i respektive tunnel.

Modelleringsarbetet utfördes i samspel mellan undersökningsgruppen i delprojekt Karakterisering och delprojekt Projektering med särskilda arbetsmöten för att ta fram underlag till beslut för lägen av transport- och experimenttunnlar. Detta arbetssätt var grundläggande för att uppnå kraven:

- Säkerställa ett högt grundvattentryck.
- Undvika injektering i tre experimenttunnlar.
- Undvika förekomst av subhorisontella deformationszoner.
- Tätt till intermediärt permeabelt berg i vissa experimenttunnlar.

Projektet klarade att uppnå kraven, i form av uppgiften att leverera tre experimenttunnlar där ingen injektering fick utföras och en experimenttunnel med önskat högt grundvattentryck.

### 5.3 Projektering

Det behövs ett arbete med att ta fram rutiner för framtagning och granskning av ritningar samt 3D-modell som beskriver anläggningsgeometri. Utvecklingsarbete krävs för att ta fram tydliga krav på vilka ritningar som ska tas fram, samt vilken information de ska innehålla. Dessutom måste granskningsrutiner skapas med avseende på vad som ska granskas, vilket kan skilja sig avsevärt från olika typer av ritningar, och vilken funktion som ska granska.

Systemet för att koda och namnge tunnlar i Äspölaboratoriet var inte anpassat till ett utbyggnadsprojekt där utrymmena som planerades drivas behövde fastläggas allteftersom och layouten uppdateras flera gånger med avseende på rådande geologiska och hydrogeologiska förutsättningar. Ett system för namngivning av tunnlar måste skapas som är förenligt med produktionen i deponeringsområdet i Kärnbränsleförvaret.

Kontroller i teknisk beskrivning låg som grund för att upprätta kontrollplaner. Revideringar har genomförts av kontroller och utförande, löpande under tunnelproduktion. Teknisk beskrivning (TB) i form av bygghandling reviderades aldrig med avseende på ändringarna. Ändringarna översändes i stället i uppdaterade kontrollplaner eller i underrättelser (UR). De stora ändringarna som genomfördes har främst varit gällande bergförstärkning och injektering. Under tiden som projekt pågår kommer det alltid att finnas behov till ändringar och förbättringar. En avvägning måste göras mellan att uppdatera befintliga styrande dokument, med risk att ändringarna inte lyfts upp tillräckligt, eller skapa ytterligare styrande dokument för att kommunicera dessa. Även andra informationsvägar måste kunna tillämpas. Dock behöver rutiner för hur dessa kommunikationsvägar används definieras, till exempel bör det framgå tydligt i vilket syfte informationen skickas (enbart kännedom, styrande information för kommande arbete, krav på svar, remiss, etc.). Underrättelsesystemet som användes i projektet fungerade bra. Rekommendation är att ett system liknande projektets underrättelsesystem börjar användas i projekt då det effektiviserar handläggningen samt att beslut och förändringar blir mer tydliga och spårbara. Dokumentmallen för en underrättelse ger också möjlighet att beskriva avvikelser av mindre dignitet som sker i det löpande arbetet.

#### 5.3.1 Upphandlingsprocessen

Teknisk beskrivning (TB) har varit omfattande och beskrivit utförandet samt kontrollerna som ska utföras. En stor utmaning kan ses i hur handlingar och förfrågningsunderlag ska utformas när branschpraxis integreras med metod- och teknikutveckling. En översyn av hur SKB:s rutiner och krav kan integreras med etablerade arbetsätt i branschen, dvs att tillämpa byggdokument och rutiner som entreprenören förstår och kan använda, är att rekommendera. Detta för att minska riskerna för felaktigheter samt att ha två parallella system som försvårar möjligheten till spårbarhet.

Vid byggande av Kärnbränsleförvaret kommer SKB att ställa krav på kontroller och utförande som inte är branschpraxis. Rekommendationen är att tidigt vid upprättande av handlingar identifiera metodval med tillhörande metodbeskrivningar. Dessa kan sedan ligga som övrig handling och teknisk beskrivning kan hänvisa till en sådan övrig handling om det inte följer branschpraxis. Att ha hänvisningar från teknisk beskrivning till metodbeskrivningar underlättar också vid revideringar, då revideringen blir direkt i det styrande dokumentet för utförandet utan tillägg från skrivna texter i en underrättelse eller aktivitetsplan. SKB bör även överväga att i ett kapitel i teknisk beskrivning (t ex Y-kapitlet) sammanställa alla krav, kontroller och hur de ska verifieras (metoder, utrustning och dataleveranser av rådata eller resultat) för att tydliggöra att anbudslämnare behöver ta detta på allvar och resurssätta samt prissätta detta. Med fördel kan en resurs för detta även inkluderas i mängdförteckning (MF) för att återigen påminna om att det ska prissättas.

Mängdförteckningen som upprättades i förfrågningsunderlaget, kompletterades även med en kompletterande å-prislista för förbrukningsmaterial, maskiner och resurser samt en kompletterande å-prislista för stilleståndskostnader vid semester. För projektet så har dessa främst underlättat vid

uppföljningar av förbrukat material, hyra av utrustning och nerlagda timmar från entreprenören så ekonomiska regleringar kunnat göras månadsvis.

Rekommendationen är att om olika ersättningsformer och AMA-koder ska användas, så är det viktigt att de specificeras i kontraktet samt att mängdförteckning tydliggör när arbete ingår eller ej. Det är viktigt att de personer som tar fram metodbeskrivningar också gör bedömningar av material och tidsåtgång för det som ska utföras, så att mängdförteckning speglar verkligheten och realistiska tidsplaner samt budgetar kan tas fram.

Utvärdering av anbud behöver göras med hjälp av fastlagda kriterier. Detta ger bra underlag för en objektiv bedömning av anbud.

## 5.4 Observationsmetodens tillämpning

Tillämpningen av observationsmetoden fungerade bra i projektet men förståelsen för observationsmetoden kopplad till övriga projekteringsmetoder har inte funnits från början i projektet utan har utvecklats efter hand. Projekteringsprocessen i sin helhet och hur och när observationsmetoden används måste diskuteras och kommuniceras till organisationen för att öka förståelsen samt möjlighet att tillämpa metoden.

För projektet var beteendet, enligt observationsmetoden, grundvattentryck. Kontrollprogrammet, som omfattade mätobjekt inom det befintliga Hydro Monitoring System (HMS), fungerade bra för uppföljning av grundvattensavsänkning och utgjorde underlag för kontinuerlig uppföljning av tunneldrivningens påverkan.

## 5.5 Injektering

Projektets resultat visar att projektet klarade att täta berget tillräckligt för att bibehålla grundvattentrycket. Projektet fick dock problem med härdning av låg-pH bruk under injekteringskärm 1 och 2 i TASU och TASP. Projektets bedömning är att kriteriet för vatteninflöde som gräns för grovinjekttering bör ha omfattat mer än ett borrhål, särskilt med tanke på de hydrogeologiska förutsättningarna vid borrhningen av skärmarna.

En erfarenhet från injekteringsarbetet är att ansvaret för injekteringsstrategin måste tillhöra projektet, och att injekteringsansvarig måste finnas på plats för att snabbt kunna komma fram till tunnelfronten och kommunicera direkt med entreprenören. Detta för att minska ledtider vid händelser där entreprenören måste kontakta beställaren eller vid införandet av ändringar.

Mycket fokus lades under injektering på att hantera manschetter med bristfällig funktion. Dessa problem störde arbetet och påverkade kvaliteten negativt bland annat eftersom injekteringen fick avbrytas för byte av manschett innan stoppkriterium uppnått. I samband med att engångsmanschetter böjdes krävdes att en ny manschett installerades bakom den gamla. Detta gjorde att injekteringen tog längre tid och att data blev svårare att tolka. De mer robusta flergångsmanschetterna som fanns kvar från Fintättningsprojektet (Funehag och Emmelin 2011) fungerade bättre med avseende på rörelser i manschetten. Ett problem var att dessa flergångsmanschetter inte alltid kunde tas ut ur injekteringshålet eftersom förankringen för denna typ av manschett då behövde kapas. Detta medförde en arbetsmiljörisk eftersom bruket bakom fortfarande var plastiskt och manschetterna var trycksatta. Rekommendationen är att ta fram en manschett som fyller sitt syfte. En specialmanschett, som troligtvis blir dyrare, kan betala sig mångfalt om problem liknande projektets därmed kan undvikas och injekteringsresultat blir bättre.

Vid injektering finns risk för att komprimerad luft stängs in i täta borrhål. Luftbubblor lägger sig nära manschetten i nedåtlutande hål och i hålbotten om hålet är uppåtlutande. Om hålet är horisontellt finns risk att bubblan lägger sig längsmed hålet. Detta kan åtgärdas genom avluftning av borrhål innan injektering. Tomma eller delvis fyllda injekteringshål påträffades frekvent under entreprenaden. Rekommendationen är att det behöver utredas hur avsaknaden av avluftning påverkar resultat av injektering samt om alla injekteringshål ska vara fyllda med bruk. Om det anses nödvändigt bör

sedan metoder för att genomföra avluftning av olika borrhålslutningar utredas, med fördel genom kontakt med tillverkare av manschetter eller injekteringsutrustning. Metoden för avluftning måste vara produktions- och arbetsmiljöanpassad.

Egenskaperna på injekteringsbruket behöver fastläggas och uttryckas som krav och med detta kan sedan utveckling påbörjas för:

- Val av bruk, där låg pH bruk kontra konventionellt bruk utreds för att se hur dessa klarar kraven för långsiktig säkerhet och effektiviseringar, för att skapa en industrialiserad injekteringsmetod.
- Utrustning, där lämplig maskin behöver identifieras med val av t ex antal linjer, pumpar, max tryck samt val av manschetter och metod för avluftning.

Det är endast när bruk, metod, utrustning, kvalitetskontroller och organisation finns klarlagda som realistiska tidsplaner och budget kan tas fram för injektering. En testmetod som ger en bättre uppfattning om kravuppfyllnad behöver även tas fram för pH-värde i lakvattnet.

## 5.6 Tunneldrivning

Projektets resultat visar att funktionskraven för detta projekt gällande tunneldrivningen i form av < 30% överberg och inget tillåtet underberg kunde uppnås med dagens maskiner och resurser. Projektet har dock inte kunnat verifiera sprängskadezonen då detta genomförs inom projekt RESKONTR. Projektet har haft bra laddutrustning och arbetat kontinuerligt med justeringar i borrh-, ladd- och tändplaner för att minska teoretisk skadezon.

Det finns behov av att se över hur funktionskraven ska verifieras inför kommande byggnation av Kärnbränsleförvaret. Funktionskraven behöver fastläggas och beskrivas så att de är: specifika (VAD), mätbara (HUR), accepterade (fastlagda), realistiska (uppnåbara) och tidsatta (när ska kontrollen utföras). En förutsättning för att utvecklingsbehov ska kunna definieras är att alla funktionskrav fastläggs och beskrivs. Om funktionskrav (t ex EDZ, överberg/underberg) på tunneldrivning kan fastläggas så kan metodval utredas och sedan väljas.

Om borra-ladda-spräng väljs som metod ger detta sedan underlag för att börja se över design och principutförande för borrh-, ladd- och tändplan så att principutförande för de olika tunnelsektionerna finns framtagna inför byggandet av Kärnbränsleförvaret. Utifrån fastlagda funktionskrav, metodval samt principutförande för borrh-, ladd- och tändplaner kan sedan utvecklingsbehov identifieras för:

- Spräng- och tändmedel, där olika sorter och märken utreds med fokus på kravuppfyllnad.
- Utrustning, där det ses över hur maskiner måste anpassas för att klara kraven.

Det är endast när metod, sprängmedel, utrustning, kvalitetskontroller och organisation finns klarlagt som sedan realistiska tidsplaner och budget kan tas fram för tunneldrivning.

Tunnelproduktionsdata har i dag inget utvecklat lagrings sätt i SKB:s databas Sicada då det kräver många resurser och stor handpåläggning för att löpande under produktion kvalitetssäkra och lagra in data. Under projektet har det blivit tydligt att för framtida tunnelproduktion krävs att inlagrings sättet är automatiserat, så att inlagring av data och kvalitetssäkring av data kan ske på några timmar. Detta för att data ska vara tillgänglig för utvärdering och beslut av byggledningen, projektörer, geologer, hydrogeologer m.fl, kontrollerat och säkert via databasen. Ett fungerande automatiserat datahanterings system kommer att öka och säkra kvaliteten, bibehålla tidsplanen, medverka till resursoptimering och minska kostnader för framdriften.

### 5.6.1 Borring

En positiv erfarenhet från projektet är kontakten med maskinleverantörer av borrhigen, där Sandvik ställt upp med bra utrustning och kompetent personal. Rekommendationen är etablera bra kontakter med maskinleverantörer och framföra önskemål och behov för att se vad marknaden kan erbjuda för att sedan formulera krav på funktion och data från borrhigg.

## 5.6.2 Laddning

Laddenheten har fungerat bra och leverantören av utrustning och sprängmedel har engagerat sig i frågeställningarna så att kalibreringar och problem hanterats utan några fördröjningar. Förvaring av emulsionssprängämnet i tunneln fungerade bra och gav de önskade effekterna gällande kvalitet, säkerhet, tidsbesparingar och ekonomiska fördelar. Rekommendationen är att inför byggande av Kärnbränsleförvaret planera och projektera för lämpliga förvaringsplatser under jord som också är anpassade för en kärnteknisk anläggning, för att få ovanstående fördelar.

Flera loggningar per borrhål förekommer i laddloggarna vilket medför svårigheter i spårbarheten. Anledningen till att flera loggningar har genomförts kan bero på ett flertal orsaker. Orsaken kan t ex vara att slangdragaren hoppat eller att den gått trögt vid utdragning vilket har gett eller ger misstanke om strängavbrott. Andra orsaker kan vara att operatören av misstag har kommit åt knappen till slangdragaren. Detta har oftast åtgärdats genom att slangens på nytt har förts in i hålet till det djup som strängen bedöms vara intakt. Laddning har sedan påbörjats på detta djup och ut till hålmynningen. Detta förfarande medför att en bottenladdning med emulsion tillkommer i läget för laddstart. Det är viktigt att sådana problem dokumenteras i observationer vid laddning. För att ta fram mängd laddat sprängmedel från laddloggen behövdes en genomgång av data göras innan mängderna kunde införas i sprängjournaler. Erfarenheten är att mycket tid får läggas på att jämföra laddsekvens mot laddlogg, för att kunna spåra vilket borrhål som laddats. För att minimera risken att fel laddningskoncentration används i kritiska borrhål, bör endast de laddningskoncentrationer som ska användas vara programmerade. Trots detta kvarstår osäkerheter, då det inte säkert går att veta vilket borrhål som laddats med vad om det inte finns en kontrollant på plats vid laddningen. En utvecklingsmöjlighet för laddutrustningen är att använda samma hålnumrering i laddloggen som i borrhållens loggning samt att det direkt och enkelt ska kunna gå att dokumentera observationer och problem. För att kunna koppla ett enskilt borrhål till en särskild loggning, så behövs det en laddtruck med bom, där x, y, och z registreras när ett visst borrhål laddas. Rekommendationen är etablera bra kontakter med maskinleverantörer och framföra önskemål och behov för att se vad marknaden kan erbjuda för att sedan kunna formulera krav på funktion och data från laddningsenhet.

Innan tunneldrivningen startade diskuterades det om förladdning behövde tillämpas vid laddning. Förladdning innebär att den oladdade längden fylls med grus, lera, etc för att hålla spränggaserna kvar i borrhålet i syfte att underlätta utbrytning och minska risken för luftsmällor. Bygglidaren tillsammans med entreprenören bedömde att förladdning av den typen inte innebar förbättringar och att reducering av tid kunde genomföras. Nyttan med förladdning bör utredas bättre för att se om det innebär kostnadsbesparingar.

## 5.6.3 Sprängning

Principutförande ger bra förutsättningar för att visa tänkt utförande, men erfarenheterna visar att det finns behov av justeringar för att anpassa till detaljutföranden och geologi. Rekommendationen är att fastlägga krav på teoretisk skadezon, så justeringar av borrhål-, ladd- och tändplaner kan göras vid behov utan att riskera kraven. Inom bergbranschen finns den ingen enhetlig syn på vilken skadezonstabell eller skadezonsteori som ska användas vid beräkning av teoretisk skadezon. Detta kan ge upphov till olika tolkningar och diskussioner i byggskedet.

Eftersom det inte finns någon standard för hantering eller reglering av sprängskadezoner innebär det att problemen och ambitionen för uppföljning varierar i olika tunnelentreprenader. En fördel med en standard eller designkriterier för hantering av sprängskador inom branschen är att alla entreprenörer och beställare har en enhetlig syn. Detta leder sannolikt till att entreprenörer kommer att prissätta kravet på ett liknande sätt. Detta system kommer även att utveckla produktionen för att minimera kostnaderna och tiden med avseende på kraven. Problemet är dock att sprängskadezonsteori inte alltid stämmer överens med verkligheten och att sprickor till stor del kan vara en konsekvens av geologin.

Arbete med att genomföra förändringar kan ta relativt lång tid i förhållande till salvcykeln. Tiden för revideringsprocessen för eventuella förändringar i sprängarbete bör vara kort för att bästa möjliga slutprodukt ska fås. Det är viktigt att metoder säkerställs för upprättande, granskning och lagring av borrhål-, ladd- och tändplaner, så att hanteringen sker effektivt och att det inte påverkar salvcykeln.

Projektet har haft problem med att genomföra sprängningar och samtidigt ligga under gränsvärdet för riskobjekten där gränsvärdet för acceleration var ansatt till  $2,5 \text{ m/s}^2$ . Erfarenheten från projektet är att riskobjekten inte har skadats trots att gränsvärde har överskridits vid ett flertal tillfällen. Rekommendationen är därför att gränsvärden för de i riskanalysen nämnda objekten utvärderas. Baserat på detta kan sedan mer relevanta värden tas fram inför framtida tunneldrivningsprojekt. Det bör också övervägas att vibrationskänsliga objekt som installeras i anläggningen eller i dess närhet dämpas redan vid installation. En bedömning av hur befintliga utrustningar kan vibrationsdämpas ska framgå i riskanalysen.

#### **5.6.4 Bergsförstärkning**

Bedömning är att bergrensningsklass 2 i AMA Anläggning 07 inte är tillämpbar vid konventionell tunneldrivning och att mekaniserad skrotning ska eftersträvas vid tunneldrivning ur arbetsmiljösynpunkt (AFS 2010:1). Av denna anledning bör innebörden av definitionen värderas vid kommande entreprenader, då det är viktigt att vara tydlig i förfrågningsunderlaget i innebörden av vilken skrotning som eftersträvas och hur det påverkar möjligheten att bedriva säker och effektiv tunneldrivning.

Systematisk bultning har utförts efter hävdvunna metoder. Normal branschpraxis är att bergmekaniska verifieringar ligger som underlag vid framtagande av förstärkningsklasser. Framtagande av förstärkningsklasser kopplat till ett bergklassificeringssystem som Q, RMR eller likvärdigt, är en rationell lösning om bergförhållandena förväntas vara tämligen goda.

Erfarenheten är att i förfrågningsunderlaget inte bara ha krav på sprutbetong i form av SS/EN-normer utan tydliggöra t ex hållfasthetskrav. Det är viktigt att bestämma sig för om det ska beskrivas som funktionskrav och om entreprenören ska tillhandahålla förslag på recept. Ett alternativ är att beställaren tillhandahåller recept, vilket är ett effektivt sätt att få med de krav på sprutbetongen som önskas. Vidare bör det klarställas att mottagningskontroller genomförs av entreprenören på sprutbetongen.

Bergutrymmen ska uppfylla övergripande krav som ställs på bärighet, stadga och beständighet. Rekommendationen är att dimensionering av förstärkning ska hanterats med lika noggrannhet som övriga tekniska frågeställningar, t ex konturhållning, skadezon och injektering.

### **5.7 Kvalitetssäkring och kontroll**

Teknisk beskrivning (TB) beskrev utförande- och materialkrav samt de kontroller som behövde utföras och låg sedan som grund för att upprätta kontrollplaner. Eftersom kontrollplanerna var i tabellform för respektive arbetsmoment har det varit ett enkelt och produktionsanpassat sätt att sammanställa samtliga kontrollmoment. Kontrollplanerna i den form som de utformades var ett bra produktionsstöd under genomförandet. Nyttan ligger i att kontrollplanerna tydliggör hur en kontroll ska genomföras, med vilken frekvens och vem som är ansvarig samt på vilket sätt kontrollen ska dokumenteras.

Förutsättningarna för kontrollplaner som styrmedel är att beställareorganisationen redan i förfrågningsunderlaget tydligt beskriver de kontroller som entreprenören ska utföra. Detta så att entreprenören redan från början kan inkludera metod och utrustning samt organisation i anbudet.

En plan för att upprätta och implementera ett system för kvalitetsstyrning och kontroll av tunnelproduktion behöver beskriva vilka data som är relevant och hur dessa ska utvärderas samt åtgärder vid avvikelser och hur data ska hanteras för att uppnå önskad spårbarhet. Kvalitetskontroller behöver beskriva vilken fältdokumentation som ska samlas in, loggning, provning i fält, utvärdering samt hur den ska kvalitetsgranskas i de olika stegen. Det är viktigt att mål och syfte identifieras för varje kontroll och att tydliggöra hur beslut ska tas och av vem. Utifrån detta kan sedan en organisation utformas för att kunna hantera tunnelproduktion där ansvar, befogenhet och roll tydliggörs.



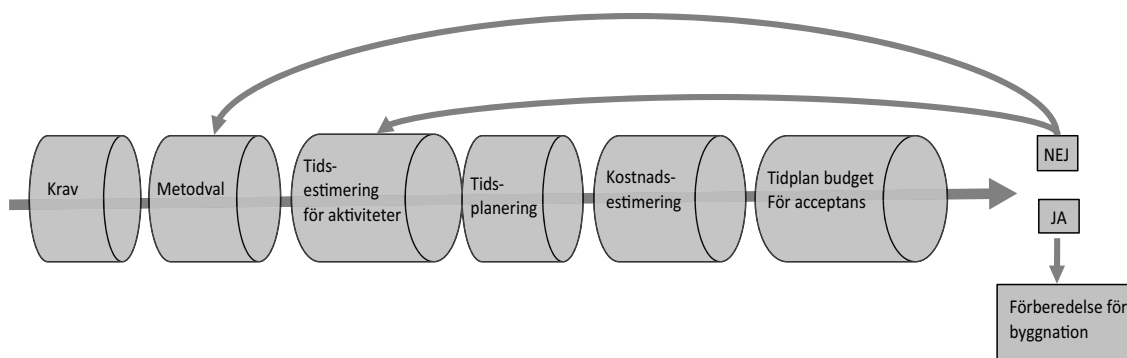
## 5.8 Organisation respektive tidsplan

Framdriften i tunneldrivning är starkt beroende av vilka förutsättningar som finns för att optimera salvcykeln. Viktiga parametrar är:

- **Skiftgång:** Påverkar hur mycket arbetstid som finns tillgänglig för att utföra aktiviteter. Samt hur beställareorganisationen behöver vara tillgänglig för uppföljning, utvärdering och ta eventuella beslut.
- **Antal tillgängliga tunnelfronter:** Med ett flertal tillgängliga tunnelfronter möjliggörs optimering av salvcykeln och arbeten kan utföras parallellt i en större utsträckning. Dessutom blir produktionen inte lika känslig för störningar om arbeten vid behov kan omlokaliseras till en annan front.
- **Behov av delade salvor och omskjutningar:** Delade salvor kan oftast borras som en normal fullsalva, men extra tid för laddning, ventilation skrotning och rensning krävs för var och en av delsalvorna och detta ökar den totala tidsåtgången. Omskjutningar kräver oftast inte ytterligare en borrhningsaktivitet, men laddning, sprängning och ventilation gör att den aktuella tunnelfronten inte är tillgänglig.
- **Effektivitet i övriga aktiviteter i cykeln, exempelvis skrotning, tunnelkartering och utlastning:** Om arbetsmoment som ingår i salvcykeln tar lång tid att utföra innebär detta att hela cykeln förskjuts, såvida arbetet inte kan lokaliseras till en annan tunnelfront. Det innebär stor påverkan på framdriften om flera av salvcyklens aktiviteter samtidigt drar ut på tiden. Om arbete inte samtidigt kan utföras på en annan tunnelfront leder detta till att kostsamma maskiner står stilla. Enhetstider är inte nödvändigtvis överförbara från ett projekt till ett annat utan aktuella förutsättningarna måste beaktas. Nivån på önskad kvalitet gällande exempelvis borrhning och kartering påverkar tidsåtgången och det är därmed viktigt att realistiska tidsuppskattningar används vid planering.
- **Indrift:** Påverkar den övergripande tidsplanen för projektet eftersom fler cykler måste utföras att producera lika många tunnelmeter om indriften är låg.

Det är viktigt att kritiska aktiviteter som påverkar tillgängligheten, t ex kartering, skrotning, förstärkning och utlastning görs där det inte påverkar framdriften. Ambitionen bör vara att ha så många tunnelfronter som möjligt tillgängliga. Enhetstider från projektet kan användas för att underlätta kalkyler för vilka liknande kvalitetskrav och förutsättningar är planerade.

Vid tunnelproduktion är det av betydelse att krav på t ex injektering och tunneldrivning är tydligt fastlagda samt hur de ska verifieras. Detta gäller även de detaljundersökningar och utvärderingar som behöver integreras i bergbyggandet. På detta sätt kan en helhetssyn skapas och utvärderingar genomföras för att erhålla en säker och effektiv bergbyggnadsmethodik. Detta ger underlag för att göra realistiska planer och budget på ett strukturerat sätt, se figur 5-1. Om framtagen tidsplan och budget inte kan accepteras men kraven behöver bibehållas, så innebär det att metodval behöver ses över för att åstadkomma optimering av aktiviteterna. Utifrån detta kan sedan eventuella utvecklings- och samordningsbehov identifieras.



Figur 5-1. Schematisk skiss för planering av bergbyggnation.

I en framtida organisation är det viktigt att både kritiskt granska entreprenörens förslag på organisation och göra bedömningar av kostnader. En liten organisation som jobbar skift ställer stora krav på beställareorganisationen. Beställareorganisationen behöver arbeta samtidigt som entreprenören för att uppföljning, utvärderingar, förändringar och beslut ska kunna göras i den takt som undersökningar, tunneldrivning och injektering utförs. Vidare behöver en liten organisation inte heller betyda att kostnadsbesparingar görs, då den är känslig för att hantera vanligt förekommande förändringar t ex platsanpassad förstärkning som i sin tur genererar stillestånd som ökar de fasta kostnader för hyra av maskiner och utrustning. Erfarenheten är att det går åt mycket resurser för att kunna styra, följa upp, utvärdera, återkoppla beslut samt få underlag till intressenter.

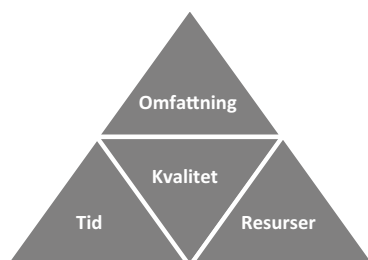
Projekt mål går först att förena när tydliga krav och förutsättningar samt en realistisk tidsplan, budget och organisation fastlagts. Förutsättningen för att organisera sig är att uppdrag, roller, ansvar och befogenheter, är tydligt beskrivna innan resurser anskaffas. Det är viktigt att all personal i ett tunneldrivningsprojekt har kunskapen om vilka aktiviteter som ingår i tunneldrivningsprocessen och hur det påverkar i tid, kostnad och kvalitet. Detta för att kunna förstå och bedöma konsekvenser av olika beslut.

Det är viktigt att ha en tilltagen introduktionstid för resurser att läsa in sig på styrande dokument, krav och förutsättningar, samtliga bygghandlingar, och system som ska användas för t ex dokumentation och underrättelser. Många praktiska frågor kommer att behöva redas ut och besvaras för att öka tydligheten för byggorganisationen. En introduktionstid kommer också att krävas om och när det är aktuellt med förändringar av resurser i organisationen.

## 5.9 Teknikutveckling i ett produktionsprojekt

Från början var projektet beskrivet som ett produktionsprojekt där flera tunnelfronter kunde göras tillgängliga för att inte aktiviteter som följde efter varandra skulle hindra framdriften. Fokus låg på att effektivt undersöka, täta och driva tunneln med utprovade arbets- och beslutsrutiner. Därefter krävdes att projektet skulle ha en samverkan med teknikutveckling berg inom avdelning Kärnbränsle rörande vidareutveckling av strategier för styrning och kontroll av uppförandet, samt för vidareutveckling av metoder, verktyg och detaljerat program för undersökningar och modellering. Projektets plan för genomförande behövde ge utrymme för att testa och vidareutveckla strategier för platsanpassning av anläggningens olika delar, samordning av detaljundersökningar och byggproduktion, samt tillämpning av observationsmetoden vid injektering och styrning/kontroll av sprängresultat för att uppfylla krav på begränsad sprängskadegzon (EDZ). Då kraven från intressenterna i behov av teknikutveckling kom in i projektet, var de allmänt formulerade och gällde för metoderna, teknik och arbetsprocesser. Dessa stod dock ibland i konflikt med varandra eftersom på ena sidan behövde prototyp och arbetsmetoder testas och på andra sidan behövde effektiviseringar, för att skapa en säker och effektiv tunnelproduktion inarbetas i projektet.

För att ge bra förutsättningar för att inkludera teknikutveckling i ett produktionsprojekt behöver det förutom fastlagda tester, strategier och tillämpningar också finnas utrymme för eventuella tillkommande ändringar i tidsplan eller resurser om inte kvaliteten i projektet ska bli lidande. Det går inte att öka ett projekts omfattning utan att minst någon eller båda delarna tid samt resurser och därmed kvaliteten påverkas, se figur 5-2. Krav och mål för projekt behöver även vara specifika, mätbara, accepterade, realistiska och tidsatta.



**Figur 5-2.** Projekttriangeln, det går inte att ändra projektets resurser, tidsplan eller omfattning utan att minst en av de två andra delarna eller kvaliteten påverkas

## Referenser

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

**AFS 2010:1.** Berg- och gruvarbete: Arbetsmiljöverkets föreskrifter om berg- och gruvarbete samt allmänna råd om tillämpningen av föreskrifterna. Solna: Arbetsmiljöverket.

**Alexander W R, Milodowski A E, Pitty A F, Hardie S M L, Kemp S J, Rushton J C, Siathas A, Siathas A, Mackenzie A B, Korkeakoski P, Norris S, Sellin P, Rigas M 2013.** Bentonite reactivity in alkaline solutions: interim results of the Cyprus Natural Analogue Project (CNAP). *Clay Minerals* 48, 235–249.

**Almén K-E, Stenberg L, 2005.** Äspö Hard Rock Laboratory. Characterisation methods and instruments. Experiences from the construction phase. SKB TR-05-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Bodén A, Sievänen U, 2005.** Low-pH injection grout for deep repositories. Summary report form a cooperation project between NUMO (Japan), Posiva (Finland) and SKB (Sweden). SKB R-05-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Berglund J, Curtis P, Eliasson T, Olsson T, Starzec P, Tullborg E-L, 2003.** Äspö Hard Rock Laboratory. Update of the geological model 2002. SKB IPR-03-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Berg Utbildarna, 2005.** Sprängarens lilla röda. Berg Utbildarna AB.

**Carlsten S, Stråhle A, Wahlgren C-H, Hultgren P, Stenberg L, Mattsson, 2013.** Äspö Hard Rock Laboratory. Geological single-hole interpretation of KA2051A01 and KA3007A01. SKB P-13-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Ericsson L O, Brinkhoff P, Gustafson G, Kvartsberg S, 2009.** Hydraulic features of the Excavation Disturbed Zone – Laboratory investigations of samples taken from the Q- and S-tunnels at Äspö HRL. SKB R-09-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Eriksson M, Lindström L, 2008.** KBS-3H post- grouting. Mega-Packer test at –220 m level at Äspö HRL. SKB R-08-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Funehag J, Emmelin A, 2011.** Injektering av TASS-tunneln Design, genomförande och resultat från förinjekteringen. SKB R-10-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Gaucher E C, Blanc P, 2006.** Cement/clay interactions – a review: experiments, natural analogues, and modeling. *Waste Management* 26, 776–788.

**Geodynamik, u å.** Boltometer 011. Users manual. Stockholm: Geodynamik AB. Tillgänglig: <http://www.geodynamik.com/languages/pdf/mbo.pdf> [1 oktober 2013].

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

**Malm R, 2011.** Low-pH concrete plug for sealing the KBS-3V deposition tunnels. SKB R-11-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Malmfälten, u å.** Cavimeter. Malmfälten AB. Tillgänglig: <http://www.malmfalten.se/produkter/cavimeter/> [1 oktober 2013].

**Markström I, Bockgård N, Hardenby C, Hultgren P, 2010.** Äspö Hard Rock Laboratory. Interpretation of conductive features at the –450 m level, Äspö. SKB IPR-10-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Mattsson H, 2011.** 2D and 3D modelling of magnetic and resistivity data from Äspö. SKB P-11-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**NGI, 2013.** Using the Q-system Rock mass classification and support design. Norges Geotekniske Institutt.

**Olsson M, Ouchterlony F, 2003.** Ny skadezonformel för skonsam sprängning. Stockholm: Stiftelsen bergteknisk forskning – Befo. (Rapport 65)

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

**Ouchterlony F, Olsson M, Svärd J, 2010.** Crack length or blast damage from string emulsion and electronic detonators. In Sanchidrián (ed). Rock fragmentation by blasting: proceedings of the 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting – Fragblast, Granada, Spain, 9 September 2009. Boca Raton, FL: CRC Press, 469–480.

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

**SKB, 2010b.** Design, construction and initial state of the underground openings. SKB TR-10-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2010c.** Teknisk beskrivning – mellanlagring, inkapsling och slutförvaring av använt kärnbränsle SKB R-10-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2012.** KBS-3H. Complementary studies, 2008–2010. SKB TR-12-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SS 4604866:2011.** Vibration och stöt – Riktvärden för sprängningsinducerade vibrationer i byggnader. Stockholm: Swedish Standards Institute.

**SS-EN 12390-3:2009.** Provning av hårdnad betong – Del 3: Tryckhållfasthet hos provkroppar. Stockholm: Swedish Standards Institute.

**SS EN 14488-3:2006.** Provning av sprutbetong – Del 3: Böjdraghållfasthet (sprick-, maximal- och residualhållfasthet) hos fiberarmerade provbalkar. Stockholm: Swedish Standards Institute.

**SS-EN 1997-1:2005.** Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner – Del 1: Allmänna regler. Stockholm: Swedish Standards Institute.

**Wahlgren C-H, Curtis P, Hermanson J, Forssberg O, Öhman J, Fox A, La Pointe P, Drake H, Triumf C-A, Mattsson H, Thunehed H, Juhlin C, 2008.** Geology Laxemar. Site descriptive modelling, SDM-Site Laxemar. SKB R-08-54, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Widestrand H, Byegård J, Nilsson K, Höglund S, Gustafsson E, Kronberg M, 2010.** Long Term Sorption Diffusion Experiment (LTDE-SD). Performance of main in situ experiment and results from water phase measurements. SKB R-10-67, Svensk Kärnbränslehantering AB.

## Definitioner och begrepp

### Karakterisering

<b>Geovetenskaplig modellering</b>	Modellering där flera discipliner inkluderas ex. geologi, hydrogeologi, hydrogeokemi etc.
<b>Hydro Monitoring System (HMS)</b>	Långtidsövervakningssystem består av ett hundratal mätpunkter för grundvattentryck samt ett antal för grundvattenflöde i tunneln.
<b>Rock Characterisation System (RoCS)</b>	System för karakterisering och dokumentation av blottade bergytter.
<b>Full perimeter intersection (FPI)</b>	Sprickor eller deformationszon som kan följas runt hela tunnelperiferin
<b>Boremap</b>	System för karakterisering och dokumentation av borrhärlar.
<b>BIPS</b>	System för filmning av borrhål.
<b>HWIC (High pressure Water Injection Control)</b>	Mätssystem för reglering och kontroll av grundvattentryck, grundvattenflöde och längdposition i borrhål på stora djup.
<b>Responstest</b>	Mätning av påverkan i en punkt som orsakats av störning i annan punkt i grundvattensystem där störningen inte är väldefinierad.
<b>Interferenstest</b>	Mätning av påverkan i en punkt som orsakats av störning i annan punkt i grundvattensystem där störningen är väldefinierad.
<b>Deformationzon</b>	Väsentligen 2-dimensionell geologisk struktur inom vilken deformation kan påvisas. Används som samlingsterm. Deformation som skett då berget var trögflytande på grund av hög temperatur eller tryck benämns <b>plastiska deformationszoner</b> , medan deformation som skett i helt steltnad och kall berggrund benämns som <b>spröda deformationszoner</b> . Notera att en deformationszon kan först ha bildats i plastisk miljö och sedan reaktiverats i spröd miljö.
<b>Plastisk deformation</b>	Se deformationzon.
<b>Spröd deformation</b>	Se deformationzon.
<b>Bakgrundskonduktivitet</b>	Den hydrauliska konduktiviteten i bergmassan mellan strukturer (HCF/deformationszoner).
<b>Foliation</b>	Foliation är en allmän term som omfattar primär lagring, klyvbarhet, gnejsighet och förskiffring. Foliationen kännetecknas av att skiktmineral orienterar sig i skikt (folier). Skikten orienterar sig efter minsta motståndet, gravitativt eller vinkelrätt mot högsta tryckriktningen.
<b>Hydraulic Conductive Feature (HCF)</b>	Hydraulisk konduktiv struktur. Väsentligen 2-dimensionell struktur eller samling av sammanhängande strukturer med förhöjd konduktivitet relativt omgivningen.
<b>High Flow Anomaly (HFA)</b>	Anomalier i vatteninflöde från kärnboringen. Enskild observation med förhöjt vatteninflöde relativt omgivningen.

## Injektering

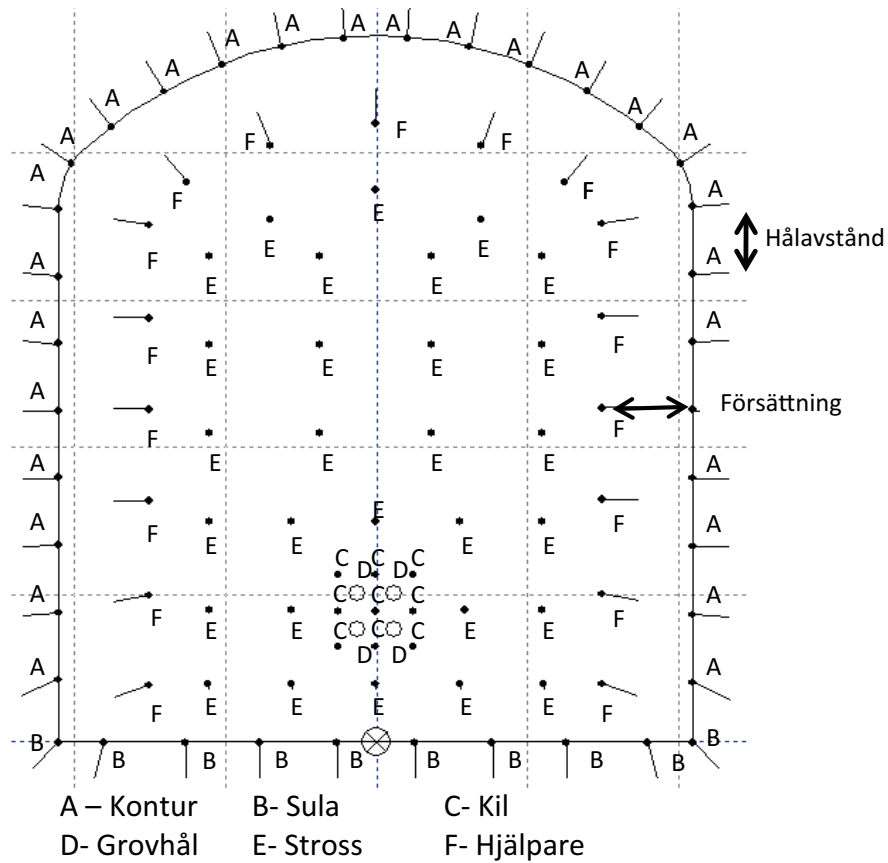
<b>Injekterings-skärm</b>	Består av ett antal borrhål borrade innanför eller utanför tunnelkonturen. Injekterings-skärmen kan byggas upp av en eller flera omgångar och syftar till att tätatunnelsektionen från inläckande vatten.
<b>Sonderingshål</b>	Borras i en första omgång av injekterings-skärm och kan tillhöra injekterings-skärmen eller placeras separat i tunnelfronten. Sonderingshål syftar till att ge möjlighet att tätastörre hydrauliska strukturen i en första omgång. Samt kan även ha syfte att sänka den hydrauliska gradienten för kommande skärminjektering samt minska risken för erosion.
<b>Grovinjektering</b>	Injektering av sonderingshål med ett styvare bruk i syfte att tätastörre hydrauliska strukturen i en första omgång.
<b>Stuffinjektering</b>	Särskild tätning av tunnelfronten vid tunnelavslut.
<b>Kontrollhål</b>	borrhål som borras efter en injekterings-skärm efter satta parametrar för att kontrollera utförd injekterings och/eller medge ökad tätning då vissa hål har tagit förbestämd max volym.
<b>vct</b>	Traditionellt begreppet för blandningsförhållandet mellan vatten och cement, vattencementtal.
<b>W/DM</b>	På grund av den stora mängden tillsatt silica fume i låg-pH cement är det traditionella begreppet för blandningsförhållandet mellan vatten och cement, vattencementtalet vct, mindre relevant. Därför används i stället förhållandet mellan mängden vatten och torrmaterial, W/DM (water to dry material).
<b>b(min)</b>	Minsta hydrauliska sprickvidd som injekteringsmedlet förväntas tränga igenom.
<b>b(crit)</b>	Dimensionerande sprickvidd för injekteringsmedlet.

## Tunneldrivning

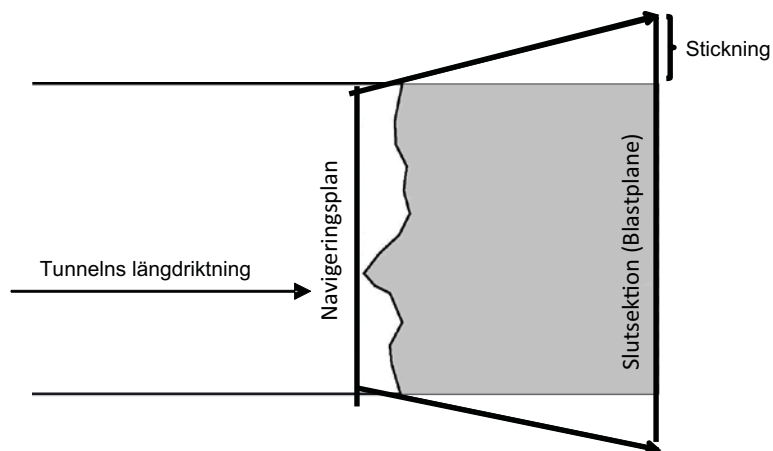
<b>Stickning</b>	Konturhål borras så att slutpunkten på borrhålet kommer utanför teoretisk kontur, så kallad stickning, se figur A-1 och figur A-2. För att det praktiskt ska gå att driva en tunnel utan att minska tunnelarean så behöver borrhålen vinklas vid borringen på tunnelgaveln. Stickningen medför att efter sprängningen erhålls en tunnelfront som har en större area än teoretiskt och på så sätt ges utrymme för att kunna få plats med riggens bommar och komma åt att borra på konturlinjen vid nästa salva. Om inte borrhålen vinklas kommer tunnelarean att minska vid varje sprängning och påhuggen kommer att hamna innanför teoretisk kontur. Stickningen är på så sätt en övervägning mellan att få lite överberg, mot att riskera att få underberg som försvårar nästkommande borring eller orsakar omskjutningar med förseningar som följd.
<b>Hålavstånd</b>	Avstånd mellan hål av samma håltyp, se figur A-1.
<b>Försättning</b>	Avstånd mellan hål av olika håltyper, se figur A-1.
<b>Kil</b>	Öppningen för salvan. Vid tunneldrivning är det viktigt att det finns fria ytor för berget. Detta för att salvan ska kunna loss hållas som planerat. Kilen består av ett antal kilhål samt grovhål, se figur A-1.
<b>Ryckare</b>	Laddningen i salvhålet påverkas med följd att inte hela hålen detoneras.
<b>Glasögon</b>	Resultatet då hela salvhålet ej har detonerat och delar av salvhålet förblir intakt.
<b>Förladdning</b>	Yttre delen i borrhålet oladdad men packad med frigolit och grus som laddlös i syfte att få mer sprängenergi in i berget.

## Bergförstärkning

- Paltning** Betong som läggs mellan bultbricka och berg vid montage.
- Halvkula** Del av ytter montagedetaljer som gör att bultbrickan kan följa bergväggen trots ojämnheter.

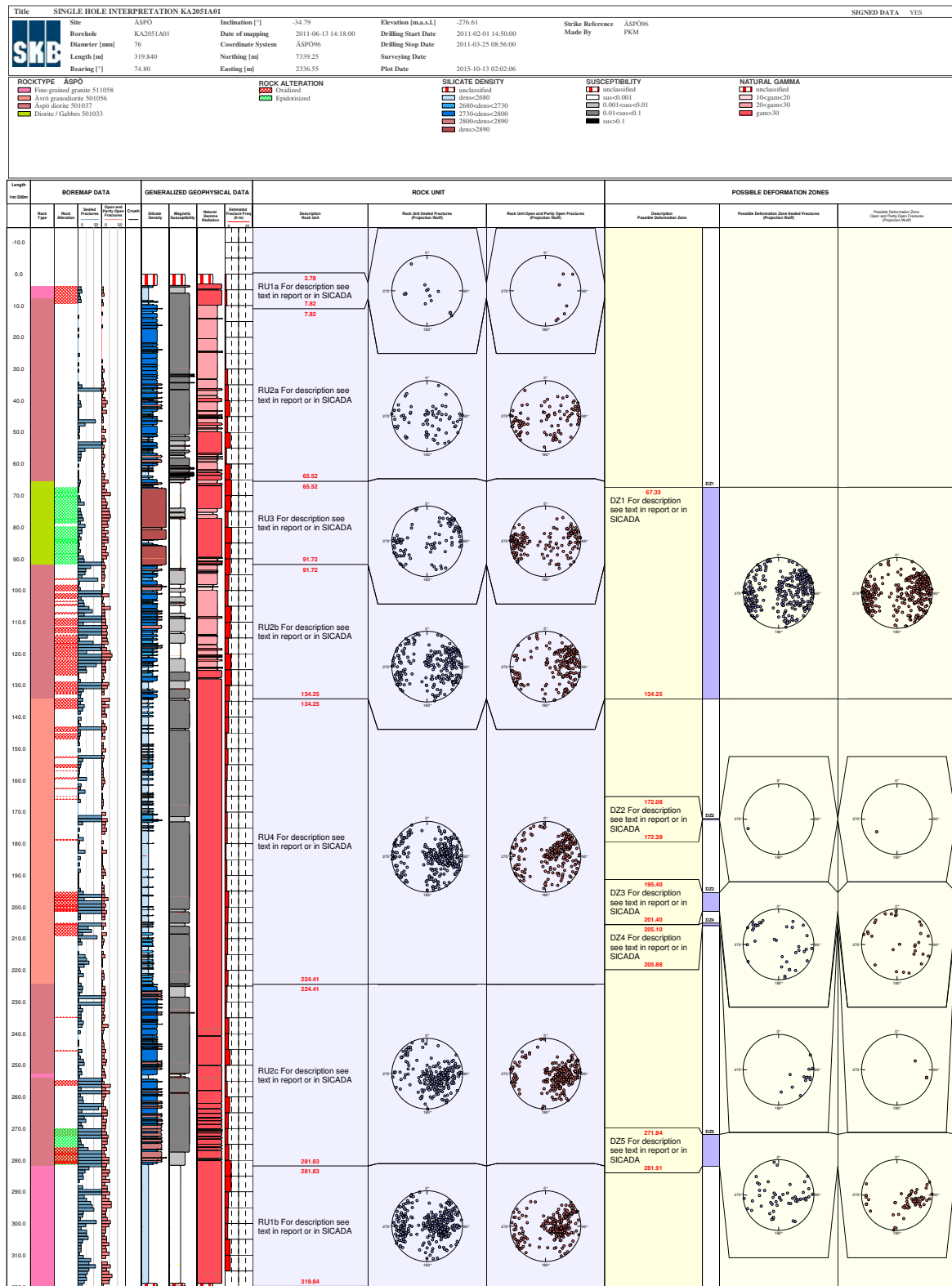


*Figur A-1. Exempel på Borrplan med håltyp, hålavstånd och försättning.*



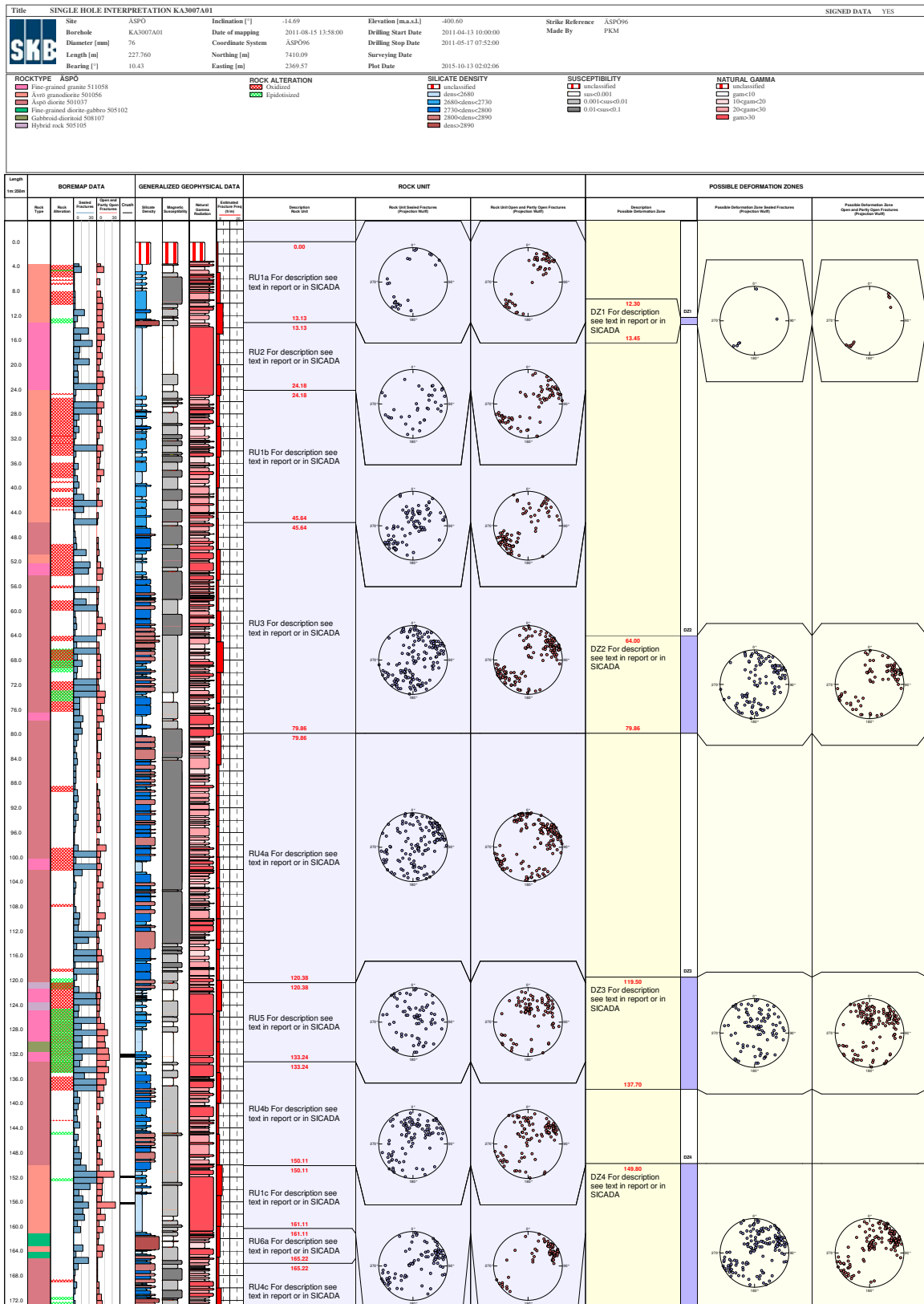
*Figur A-2. Schematisk skiss över tunnel sedd från ovan. Inritat visualiserar navigeringsplan, slutsektion (blastplane) och stickning.*

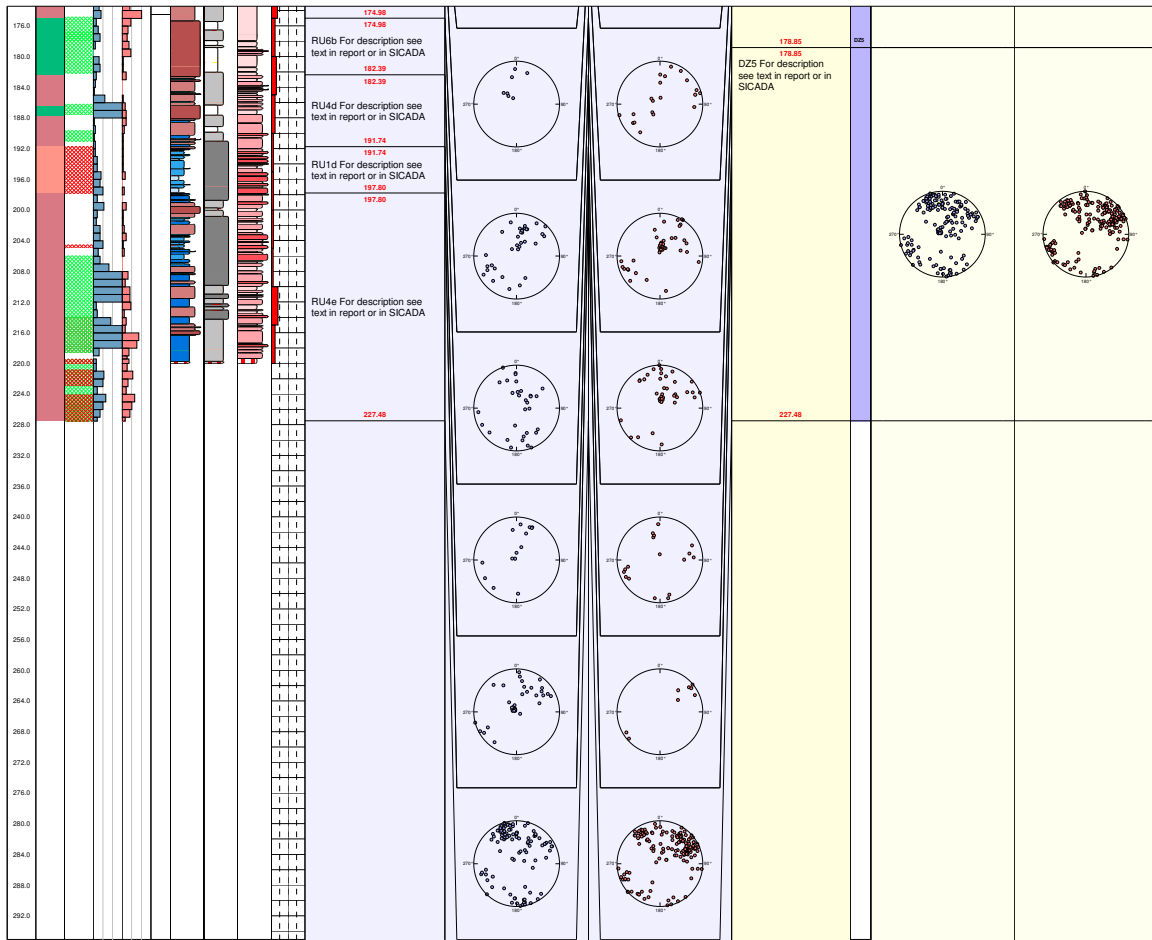
Geologisk enhålstolkning (SHI) KA2051A01



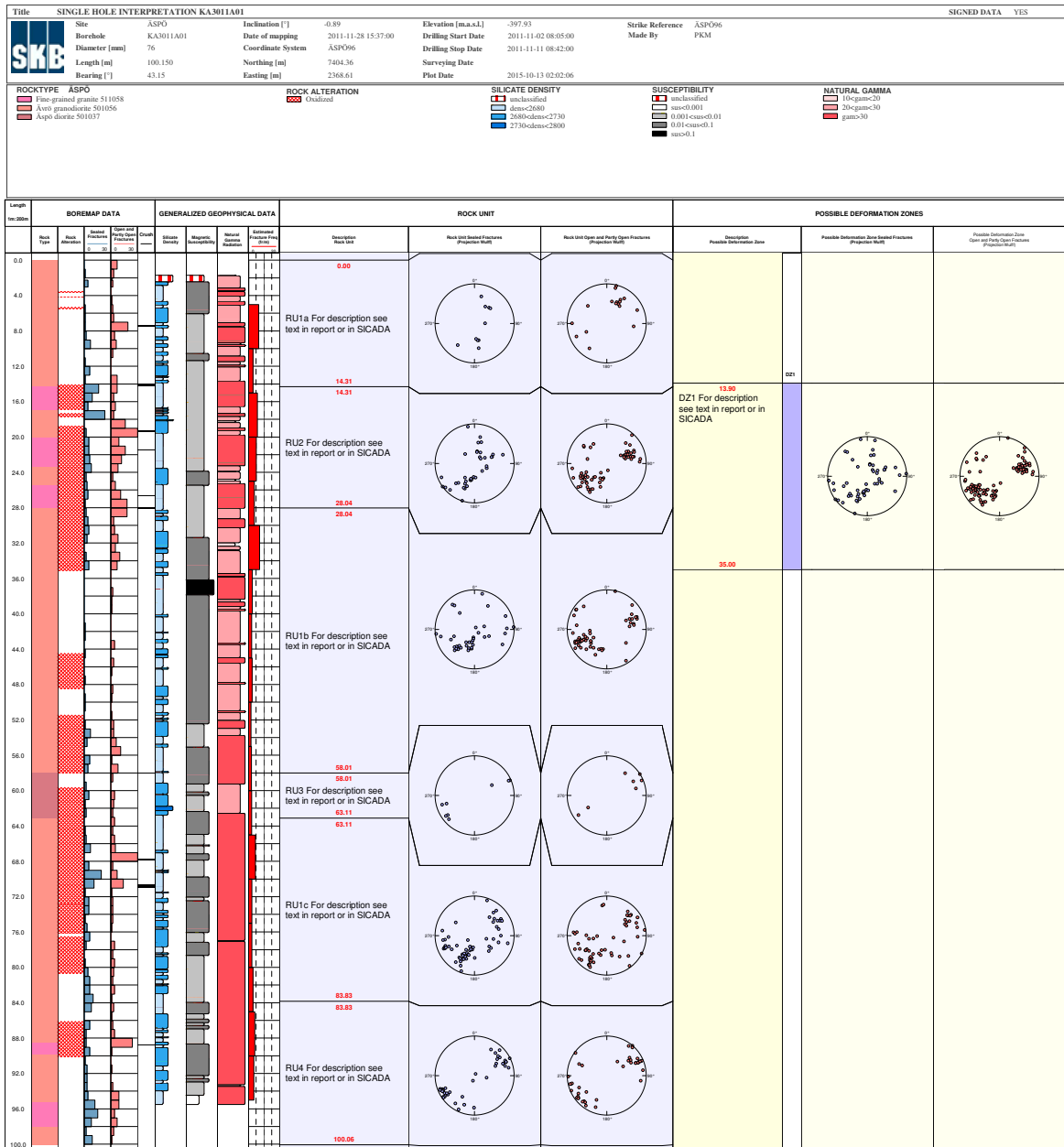


# Geologisk enhålstokning (SHI) KA3007A01

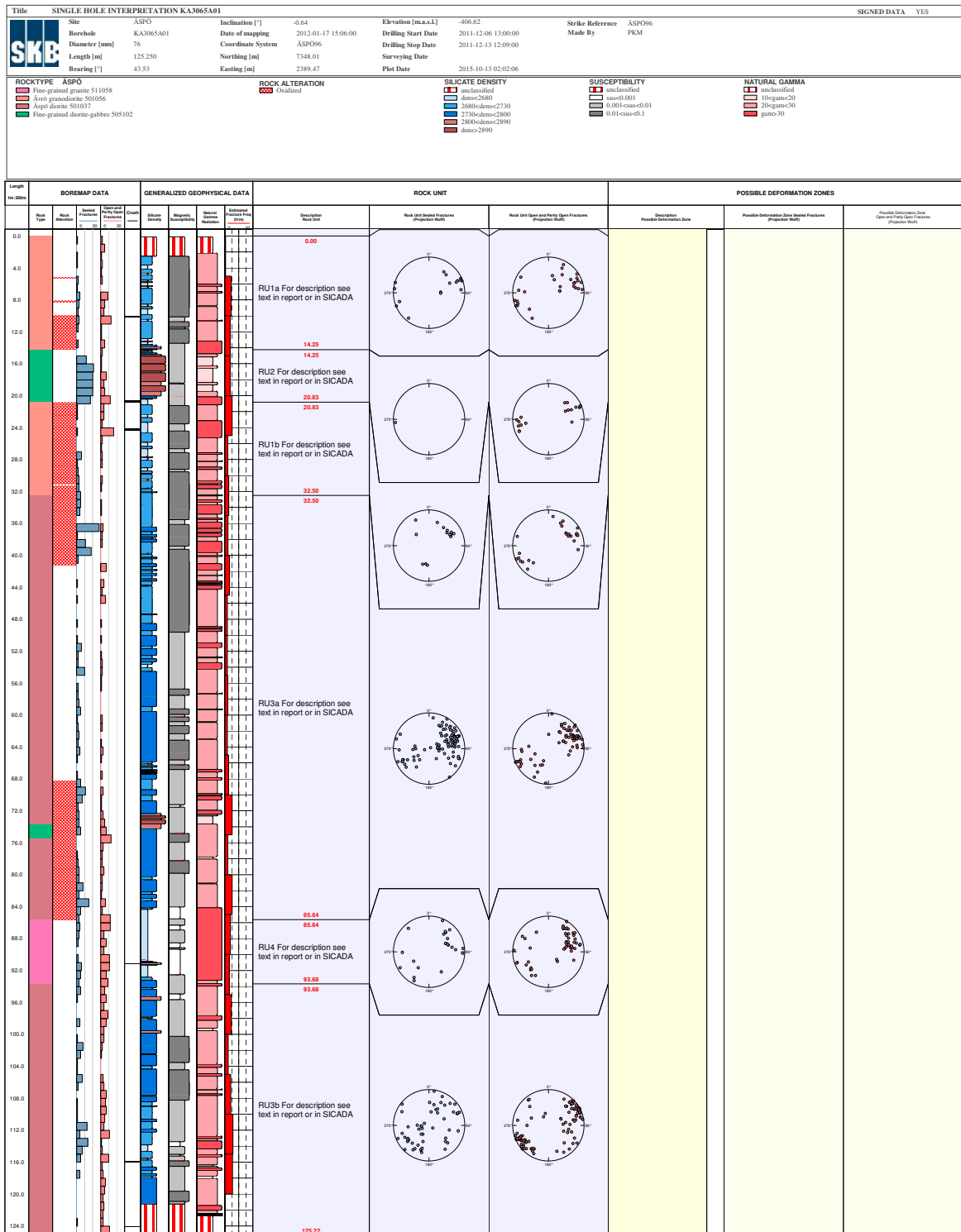




# Geologisk enhålstolkning (SHI) KA3011A01



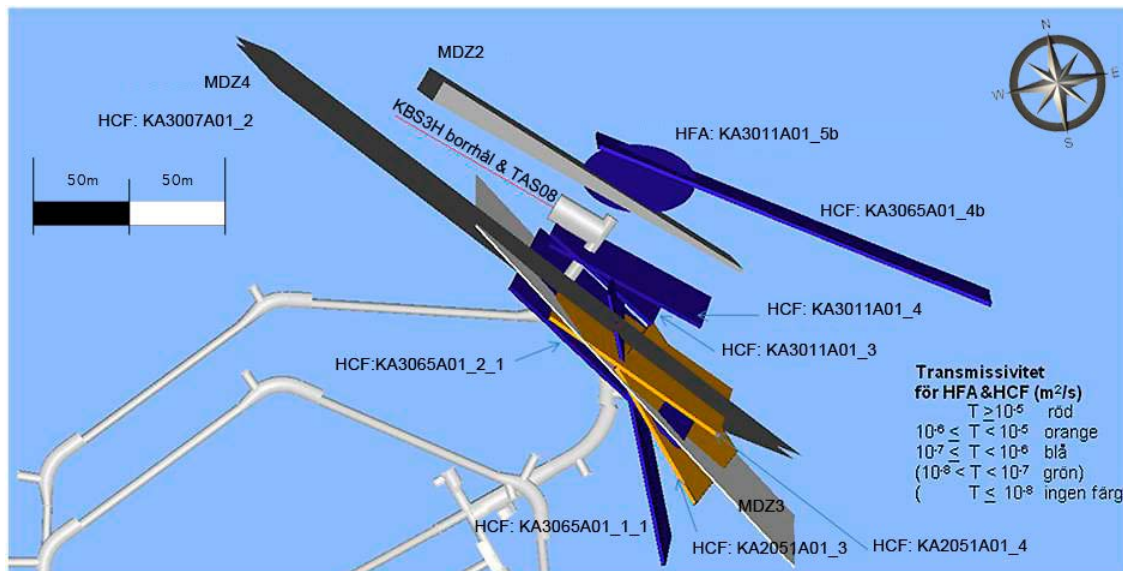
# Geologisk enhålstolkning (SHI) KA3065A01



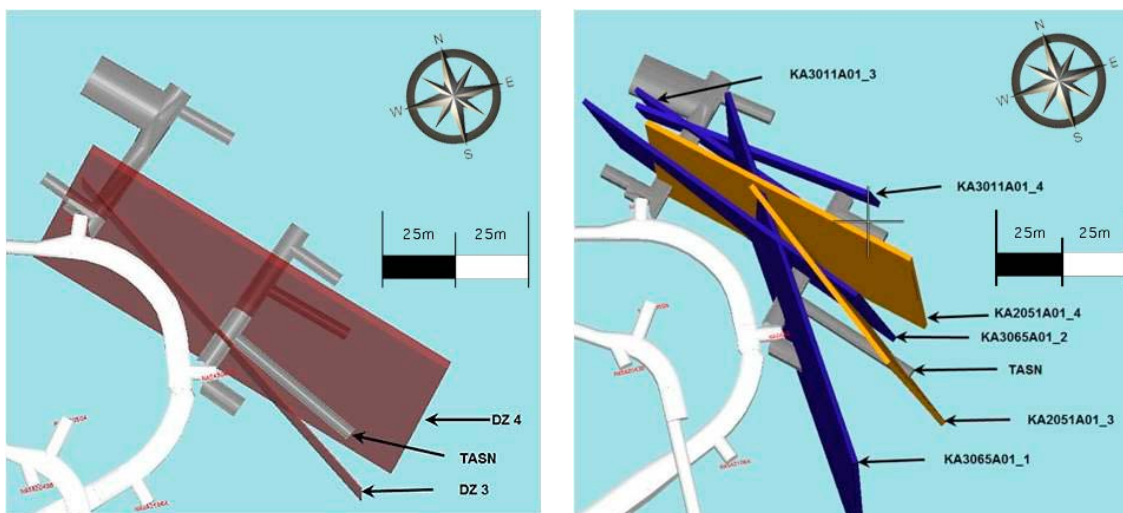
## Handlingar förfrågningsunderlag

ID	Handling
1	Anbudsfrågan
2	Ändringar i AB04 som är upptagna i administrativa föreskrifter (bifogades ej utan framgick i handling 9)
3	AB 04 (bifogades ej)
9	Administrativa föreskrifter
10	Mängdförteckning
11-1	Teknisk beskrivning Tunnelldrivning
12	Ritningsförteckning
TUDP002-P001	Arbetsområden NASA3067A, NASA3009A och TASJ
TUDP002-P002	Plan med normalprofil, översikt, arbetsområde NASA3067A
TUDP002-P003	Plan med normalprofil, översikt, arbetsområde NASA3009A
TUDP002-P004	Plan med normalprofil, översikt, sektioner, arbetsområde TASJ
TUDP002-P005	Normalsektioner, arbetsområden NASA3067A, NASA3009A och TASJ
TUDP002-P006	Principskiss för injektering, arbetsområden NASA3067A, NASA3009A och TASJ
TUDP002-P007	Planritning förstärkning TASP, TASU och TASJ
TUDP002-P008	Ritning för mätvall
13-1	PM Riskanalys
13-2	Principutförande för sprängplaner
13-3	Tidsplan TUDP002
13-4	Kvalitets- och miljöplan
13-5	Arbetsmiljöplan TUDP002
13-6	Inköp och hantering av kemikalier
13-7	Avfallshantering
13-8	Brandsäkerhet
13-9	Tillstånd för sprängning vid Äspölaboratoriet
13-10	Översiktsbild av Äspölaboratoriet
13-11	Overview of geological documentation of TASA
13-12	Overview of geological documentation of TASJ
13-13	Onormala händelser
13-14	PM hantering av LTDE-SD experimentborrhål KA3065A03
13-15	Elsäkerhet

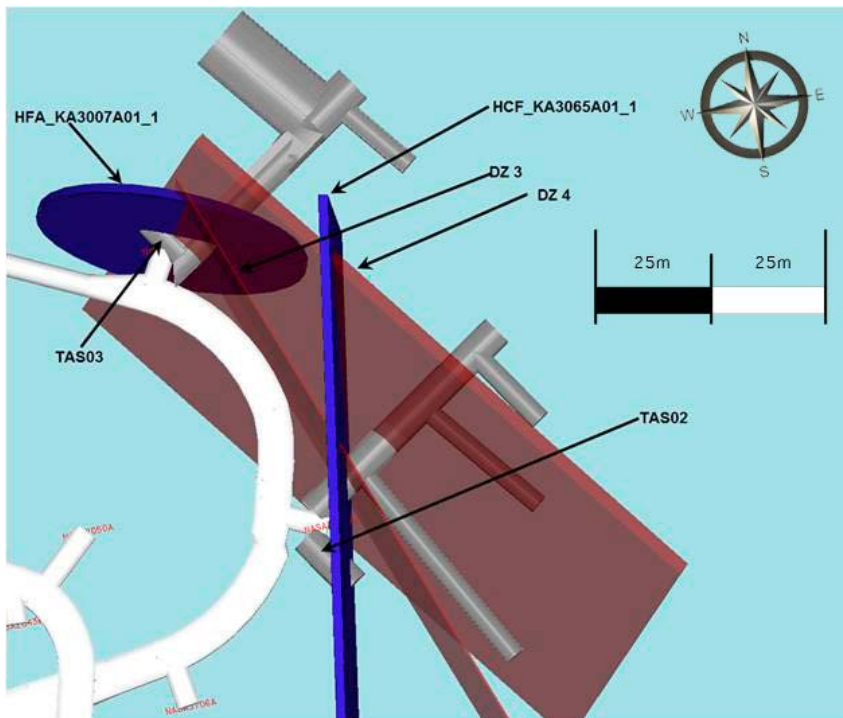
## Visualisering av geovetenskaplig prognos utifrån Modell M2.1-M2.4 vid platsanpassning av experimenttunnlar



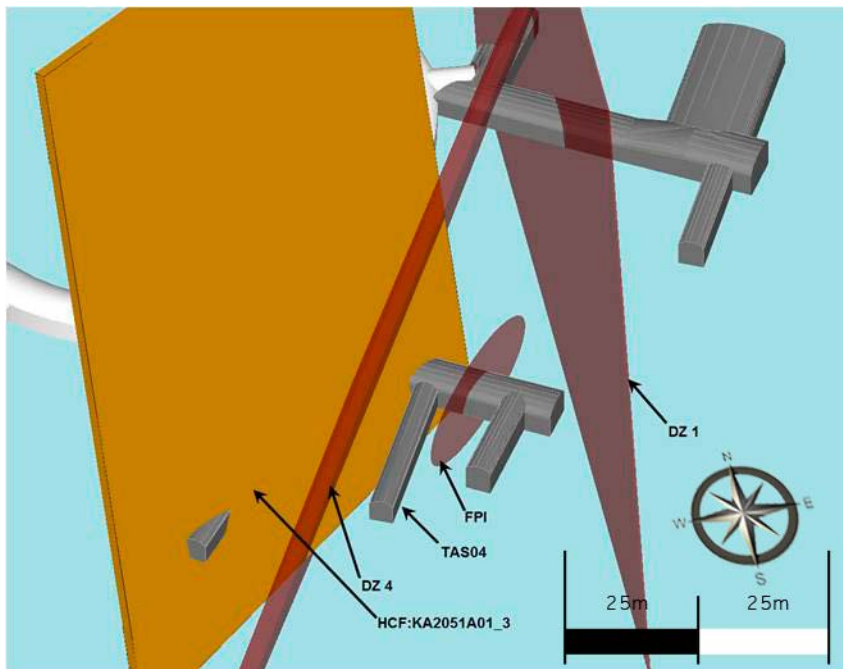
**Figur G-1.** Visualisering av geovetenskaplig prognos utifrån modell M2.1 vid platsanpassning av tunnel TAS08. Rekommenderat läge av tunnel TAS08 i tunnel TASU vid längdmått 54,93 m. Tunnellayout med Minor Deformation Zones (MDZ) i grått samt hydrauliska konduktiva strukturer (HCF) samt anomalier i vatteninflöde under kärnborrhången (HFA) i blått och orange och som bedöms eventuellt kunna ha skärning med nisch eller borrhål från KBS3H. TAS08 (ljusgrå) med en vinkel på 85° mot TASU och KBS3H pilotborrhål visualiserat vid det preliminärt rekommenderade läget längs med stamtunneln TASU.



**Figur G-2.** Visualisering av geovetenskaplig prognos utifrån modell M2.2 vid platsanpassning tunnel TASN. Rekommenderat läge för TASN i tunnel TASP vid längdmått 32,75 m. Tunnellayout med Minor Deformation Zones (DZ3 och DZ4) i brunt (vänster) samt hydrauliska konduktiva strukturer (HCF) i blått ( $10^{-7} < T < 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) och orange ( $10^{-6} < T < 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ) (höger).

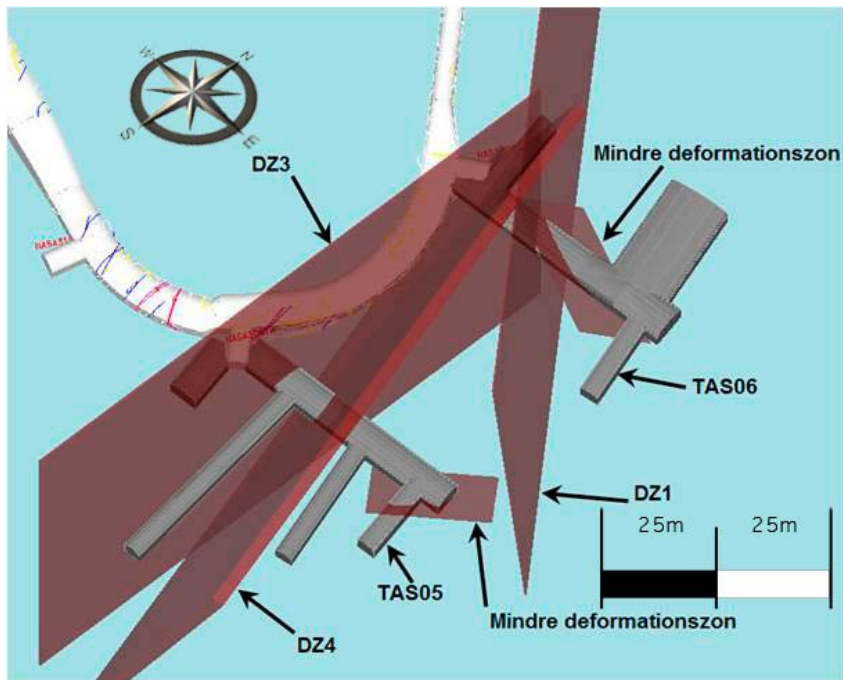


**Figur G-3.** Visualisering av geovetenskaplig prognos utifrån modell M2.3 vid platsanpassning tunnel TAS02 och TAS03. Rekommenderat läge för tunnel TAS02 i färdigbyggd lastnisch i tunnel TASP vid längdmått 14 m. Rekommenderat läge för TAS03 i påbörjad lastnisch i tunnel TASU vid längdmått 13,67 m. Tunnellayout med Minor Deformation Zones (DZ3 och DZ4) i rött samt hydrauliska konduktiva strukturer (HCF) samt anomalier i vatteninflöde under kärnbronningen (HFA) i blått.



**Figur G-4.** Visualisering av geovetenskaplig prognos utifrån modell M2.4 vid platsanpassning av tunnel TAS04. Rekommenderat läge av tunnel TAS04 i tunnel TASP vid längdmått 52,10 m. Tunnellayout med Minor Deformation Zones (DZ1, och DZ4) i rött, samt hydraulisk konduktiv struktur (HCF:KA2051A01\_3) i gult samt Full Perimeter Intersection (FPI) i brunt som identifierats i geologisk tunnelkartering.



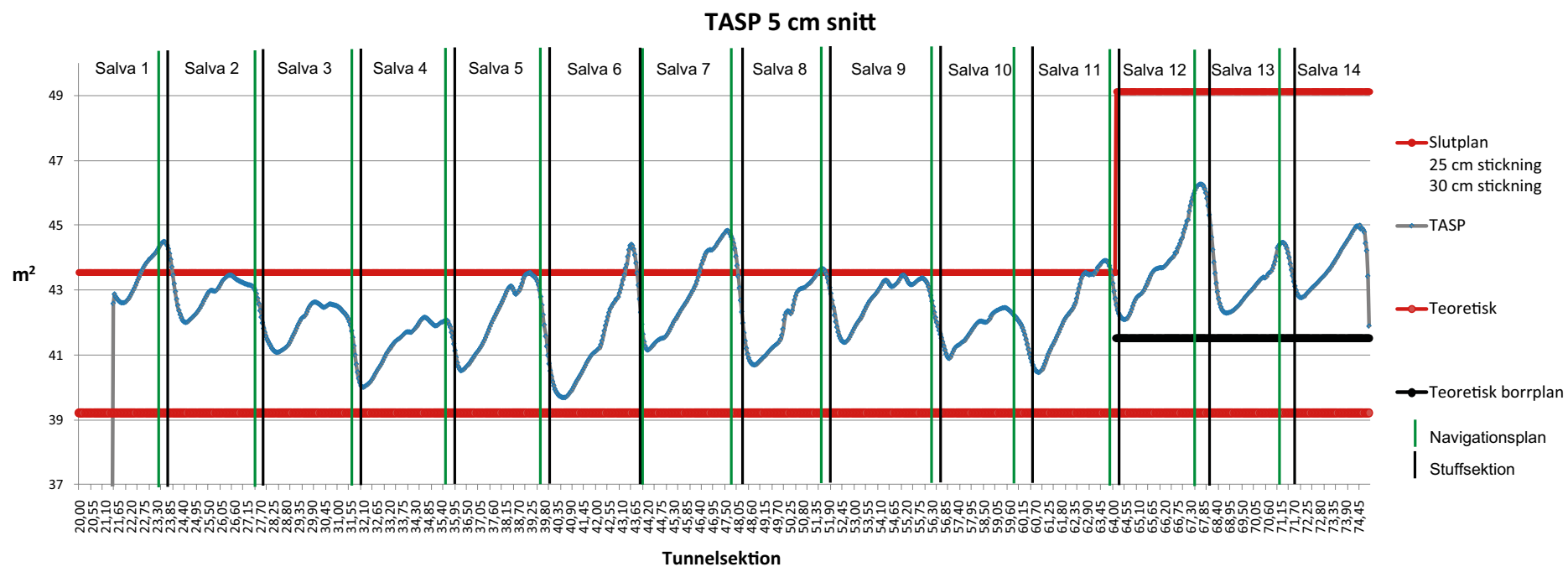


**Figur G-5.** Visualisering av geovetenskaplig prognos utifrån modell M2.4 vid platsanpassning av tunnel TAS05 och TAS06. Rekommenderat läge av tunnel TAS05 i tunnel TASP vid längdmått 68,25 m. Rekommenderat läge av tunnel TAS06 i tunnel TASU vid längdmått 60,25 m. Tunnellayout med Minor Deformation Zones (DZ1, DZ3 och DZ4) samt mindre deformationszon som identifierats i geologisk tunnelkartering men ej fastlagts i modellen i rött.

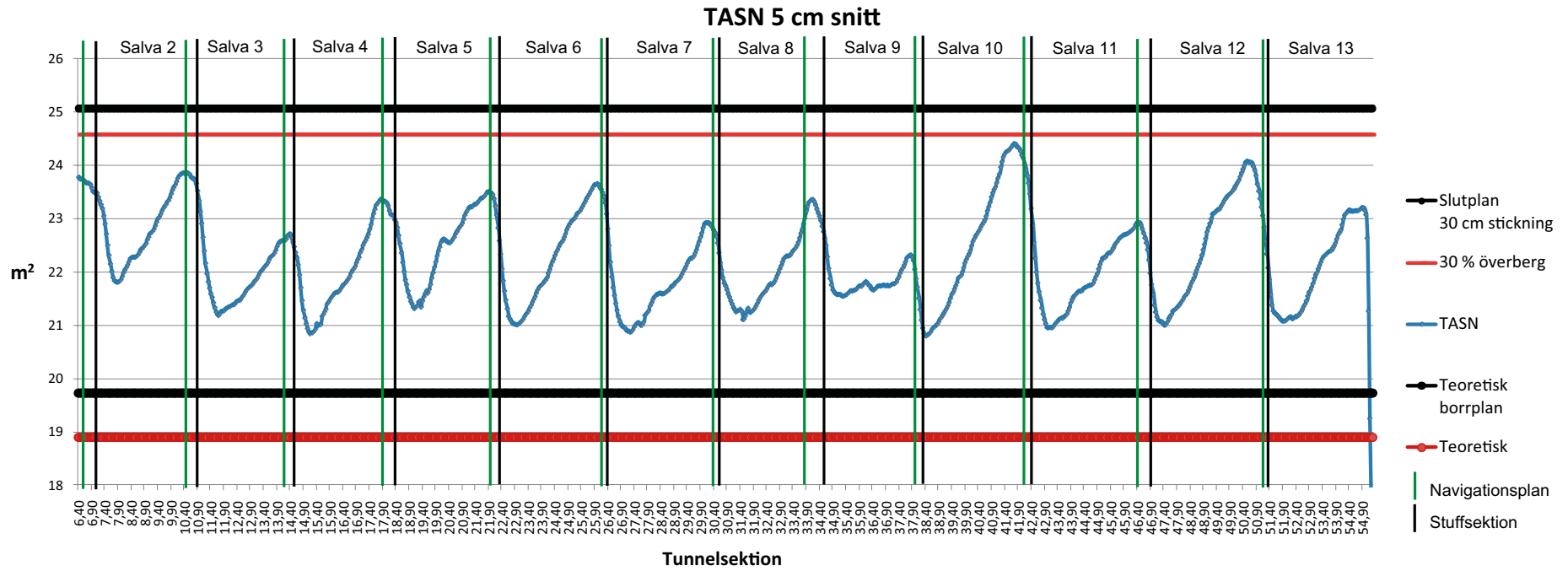




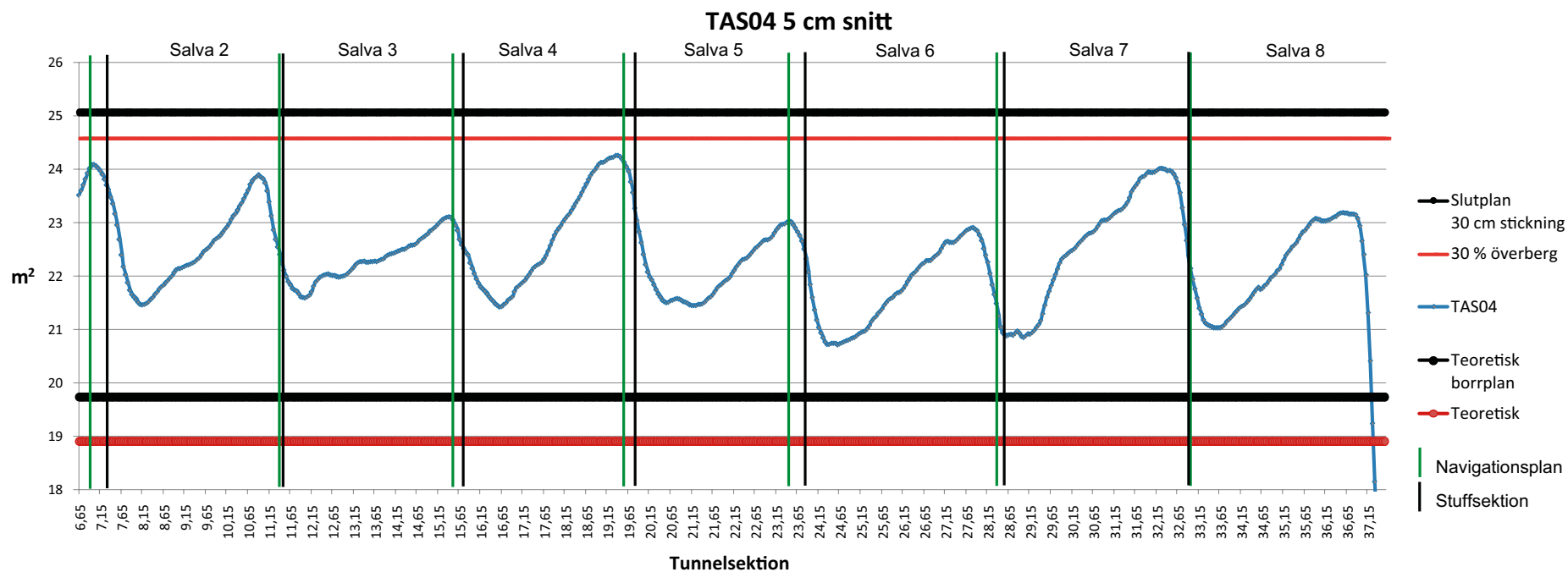
## Variationer för tvärsnittsarea för tunnlarna TASP, TASN och TAS04



**Figur I-1.** Variationer för tvärsnittsarea var 5:e cm för salva 1-14 i TASP (sulan ej inkluderad). Teoretisk tunnelarea  $39,2 m^2$ . Slutplan 25 cm stickning  $43,6 m^2$  teoretiskborrplan ansättning 10 cm utanför kontur  $41,5 m^2$  och slutplan 30 cm stickning  $49,1 m^2$ . I diagrammet ses även ansatt navigeringsplan samt stuffsektion för respektive salva.



**Figur I-2.** Variationer för tvärsnittsarea var 5:e cm för salva 1-13 i TASN (sulan ej inkluderad). Teoretisk tunnelarea 18,9 m<sup>2</sup>. Tunnelarea 30% överberg 24,6 m<sup>2</sup>. Teoretisk borrhplan ansättning 5 cm utanför kontur 19,7 m<sup>2</sup> och slutplan 30 cm stickning 25,1 m<sup>2</sup>. I diagrammet ses även ansatt navigeringsplan samt stuffsektion för respektive salva.



**Figur I-3.** Variationer för tvärsnittsarea var 5:e cm för salva 1-8 i TAS04 (sulan ej inkluderad). Teoretisk tunnelarea 18,9 m<sup>2</sup>. Tunnelarea 30% överberg 24,6 m<sup>2</sup>. Teoretisk borrplan ansättning 5 cm utanför kontur 19,7 m<sup>2</sup> och slutplan 30 cm stickning 25,1 m<sup>2</sup>. I diagrammet ses även ansatt navigeringsplan samt stuffsektion för respektive salva.