

Rapport
R-18-01
Maj 2019



Injektering av deponerings- området i förvaret för använt kärnbränsle

– Historik, metodik och strategi

Thomas Janson
Johan Funehag
Patrik Vidstrand

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB

SWEDISH NUCLEAR FUEL
AND WASTE MANAGEMENT CO

Box 3091, SE-169 03 Solna
Phone +46 8 459 84 00
skb.se

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING

ISSN 1402-3091

SKB R-18-01

ID 1628633

Maj 2019

Injektering av deponeringsområdet i förvaret för använt kärnbränsle

– Historik, metodik och strategi

Thomas Janson, Johan Funehag
Tyréns AB

Patrik Vidstrand
Svensk Kärnbränslehantering AB

En pdf-version av rapporten kan laddas ner från www.skb.se.

© 2019 Svensk Kärnbränslehantering AB

Definitioner och begrepp

Från SKB:s ordlista för säkerhetsredovisning och ansökningshandlingar.

Term och förkortning	Definition och eventuell anmärkning
Använt kärnbränsle	Kärnbränsle som ska slutförvaras och inte användas på nytt.
Barriär	(i kärntekniska anläggningar vid uppförande, innehav och drift:) Fysiskt hinder mot spridning av radioaktiva ämnen.
Barriärfunktion	(i slutförvar :) Barriärers sätt att fungera för att bidra till att innesluta, förhindra eller fördröja spridning av radioaktiva ämnen och som också avser barriärens förmåga att skydda och bevara funktionen hos andra barriärer .
Bergarbeten	Aktiviteter för att skapa bergutrymmen med angiven placering och geometri och med erforderlig stabilitet och täthet.
Bergrum	Större uttaget hålrum i berg. ANM. Används som samlingsterm för t ex hall, silo , sal eller nisch.
Bergutrymme	(i Kärnbränsleförvaret :) Utrymme i berget som krävs för Kärnbränsleförvaret , samt de irreversibla förändringar och de konstruktioner som finns kvar i eller på det omgivande berget efter deponering, återfyllning respektive förslutning. ANM. 1 Ett bergutrymme består av: – utrymmets faktiska geometri och placering, – det berg som omger utrymmet och som påverkats av byggnationen, – konstruktioner för injektering och bergförstärkning samt material från genomförande av verksamheterna i Kärnbränsleförvaret som finns kvar i och på berget efter rivning och rengöring inför deponering, återfyllning respektive förslutning. ANM. 2 Före deponering, återfyllning respektive förslutning är varje bergutrymme en del av anläggningen, efter deponering, återfyllning respektive förslutning är det en del av slutförvaret .
Centralområde	(i Kärnbränsleförvaret :) Samlad del i undermarksdelen som omfattar bergum för drift, logistik och underhåll.
Deformationszon	Väsentligen 2-dimensionell geologisk struktur inom vilken deformation kan påvisas ANM. 1 Används som samlingsterm. ANM. 2 Deformation som skett då berget var trögflytande på grund av hög temperatur eller tryck benämns plastiska deformationszoner , medan deformation som skett i helt stelnad och kall berggrund benämns som spröda deformationszoner . Notera att en deformationszon kan först ha bildats i plastisk miljö och sedan reaktiverats i spröd miljö.
Deponeringshål	(i Kärnbränsleförvaret :) Hålrum för deponering av kapslar med använt kärnbränsle och för installation av buffert.
Deponeringsområde	(i Kärnbränsleförvaret :) Del av förvarsområde där deponeringshål avsedda för deponering av kapslar med använt kärnbränsle får placeras.
Deponeringstunnel,	(i Kärnbränsleförvaret :) Tunnel som har deponeringshål i golvet.
Detaljprojektering	Aktiviteter som syftar till att ta fram handlingar för upphandling av utförandeentreprenad.
Domän	(geologisk, berg:) Bergenhet eller bergenheter med en eller en uppsättning snarlika egenskaper. ANM. Exempelvis definieras sprick domäner (FD), berg domäner (RD) och hydrauliska domäner (HCD, HRD).
Förvarsområde	(i Kärnbränsleförvaret :) Del av undermarksdelen som omfattar samtliga deponeringsområden .
HCD	Se hydraulisk strukturdomän .
Kärnavfall	a. Använt kärnbränsle som har placerats i slutförvar , b. radioaktivt ämne som har bildats i en kärnteknisk anläggning och som inte har framställts eller tagits ur anläggningen för att användas i undervisnings- eller forskningssyfte eller för medicinska, jordbrukstekniska eller kommersiella ändamål, c. material eller annat som har tillhört en kärnteknisk anläggning och blivit radioaktivt förorenat samt inte längre ska användas i en sådan anläggning, och d. radioaktiva delar av en kärnteknisk anläggning som avvecklas.
Kärnbränsleförvaret	Egennamn och gemensam benämning för KBS-3-förvarsanläggningen och de färdigställda delar av KBS-3-förvaret som finns i den.

Term och förkortning	Definition och eventuell anmärkning
Slutförvar	Förvar för säker och slutlig förvaring av kärnämne eller kärnavfall . ANM. 1 Ett slutförvar omfattar tekniska barriärer , bergutrymmen och naturliga barriärer och det kärnavfall eller kärnämne som ska slutförvaras och som i allmänhet är inplacerat i avfallskollin . ANM. 2 Om det av sammanhanget är entydigt vilket av SKB:s slutförvar som avses får slutförvar användas synonymt med KBS-3-förvar , SFR eller SFL . Källor: Baserad på SSMFS 2008:21 1 § samt KTL 10 § .
Slutförvarsanläggning	Anläggning som krävs för att uppföra ett slutförvar och för att genomföra de verksamheter SKB beslutat ANM. En slutförvarsanläggning är alltid associerad med det slutförvar som ska uppföras i anläggningen.
Stamtunnel	(i Kärnbränsleförvaret .) Genomgående tunnel i deponeringsområde från vilken deponeringstunnlar utgår.
Systemprojektering	Aktiviteter som syftar till att ta fram de handlingar som krävs för upphandling av detaljprojekteringar eller totalentreprenad.
Transporttunnel	(i Kärnbränsleförvaret .) Tunnel som förbinder stamtunnlar i olika deponeringsområden eller stamtunnel och centralområde .
Undermarksanläggning	Se undermarksdel .
Undermarksdel	(i Kärnbränsleförvaret .) Utrymmen, konstruktioner och byggnader under mark som krävs för att uppföra KBS-3-förvaret och driva KBS-3-förvarsanläggningen .

Injekterings-specifika begrepp.

Term	Definition
Basdesign	Basdesignen är den som finns före injekteringen har startat. Den är baserad på undersökningarna före injekteringen.
Designtryck	Det tryck som injekteringen ska utföras med.
Efterinjektering	Borring och injektering efter berguttag.
Förinjektering	Borring och injektering i bergmassa före berguttag.
Injekteringsövertryck	Det tryck över grundvattentrycket som injektering utförs med.
Injekteringstid, effektiv injekteringstid	Tid från angivet tryck är uppnådd till injektering avslutas.
Injekteringsdesign	Injekteringsdesignen definierar injekteringstryck – och tid, skärmgeometrin och injekteringsmedlet, samt kontroller och åtgärder.
Hålspets, hålspetsavstånd	Avstånd mellan injekteringshålens botten i samma injekteringskärm.
Inträngning	Längden/sträckan som injekteringsmedlet når ut i bergmassans spricksystem.
Inträngningsförmåga, penetrera	Injekteringsmedlets möjlighet att passera igenom öppningar/sprickvidder.
Kompletterande hål	Injekteringshål som utförs i del av skärm efter injektering av en första eller andra omgång.
Kompletterande omgång	
Låg-pH injekteringsmedel	Avser ett injekteringsmedel vars lakvatten har ett pH lägre än 11.
Stick	Avstånd mellan hålspets och teoretisk tunnelkontur.
Stuffinjektering	Borring och injektering i tunnelns fortsättning från tunnelfront/stuff.
Överlapp	Avstånd mellan hålspets för skärm till skärmläge (påhugg för) för nästa skärm.

Sammanfattning

SKB:s planerade slutförvarsanläggning i Forsmark utgörs av en undermarksanläggning som täcker ett nästan 4 km² stort område på ca 470 meters djup. Vid uttag av deponeringstunnlarna kommer injektering att användas för att begränsa inflödet av vatten och skapa förutsättningar för effektiva arbetsprocesser för deponering och återfyllning av tunnlar. Injekteringen görs som förinjektering, dvs framför tunnelfronten, och med låg-pH injekteringsmedel. Denna rapport beskriver framtagna injekteringsstrategi som är baserad på vedertagen kunskap samt erfarenheter från tidigare SKB projekt.

Ett stort antal injekteringsprojekt, med fokus på injektering i små sprickvidder på stort djup, har genomförts av SKB sedan 80-talet och framåt. Huvudslutsatsen från dessa projekt är att en designmetodik har utvecklats för relationen mellan förutsättningar (vattentryck, gradienter och sprickvidder) och injekteringsparametrarna (injekteringsövertyck, injekteringsmedlets egenskaper och injekteringstider). Metodiken innebär att injekteringsdesignen kan uppdateras på ett objektivet och spårbart sätt då förutsättningar ändras, kriterier inte uppfylls eller önskade utföranderesultat inte uppnås. Mer allmänna erfarenheter från utvecklingsprojekten är bland annat att:

- Specifika egenskaper på injekteringsmedel är nödvändiga för både små och stora sprickvidder.
- Utrustningen (manschetter och pumpar) ska klara höga grundvattentryck och ha hög mätnoggrannhet vid registrering vid både små och stora injekteringsflöden.
- Injektering är ofta tidskrävande om man skall uppnå tillräcklig inträngning eller stora mängder injekteringsmedel.
- Stuffinjektering krävs för att reducera grundvattengradienterna och vattenflödena i tunnelstuff.
- Arbetsmiljöaspekter ska beaktas vid de höga trycken.
- Det huvudsakliga cementbaserade injekteringsmedlet innehåller tre huvudkomponenter (cement, vatten, silkatslurry) som kräver en strikt hantering och blandningsförfarande för att injekteringsmedlet skall erhålla de önskade egenskaperna.
- Övåntade händelser/observationer kommer alltid att inträffa och därför behövs en beredskap med specifika material och utrustning. Dessa material och utrustning ska finnas tillgängliga så att åtgärder kan göras för att minimera störningarna vid injekteringen.
- Vid injektering krävs en förberedd organisation med en ständig injekteringsresurs på plats.

Framtagning av en branschgemensam och sammanhållen projekteringsmetodik av förinjektering har initierats av Trafikverket för infrastrukturprojekt. Tre projekteringskategorier är förslagna, från enkla (PK 1) till komplexa förhållanden (PK 3), men det poängteras att även specialfall kan förekomma där projekt eller projektdelar inte kan placeras in standardmässigt. Beroende på kategorin som bestäms erhålls vilka parametrar som ska analyseras och nivå på analyserna, såsom bergmassans hydrauliska konduktivitet, sprickvidder, inläckagekrav med mera. Då kategorin bestämts ska projekteringslösningarna arbetas fram. Arbetet kan innefatta allt från erfarenhetsmässiga till projektspecifika detaljanalyser. Metodiken beskriver slutligen rekommendationer för verifieringen av projekteringslösningarna, inför och under injektering.

Om den föreslagna projekteringsmetodiken skulle tillämpas i Forsmark förvaransområde fås projekteringskategori 3 (PK 3) eller specialfall. Av de parametrar som föreslagits att analyseras enligt projekteringsmetodiken har de flesta parametrarna i olika grad analyserats i samband med SKB:s tidigare projekt. Vid genomförande av injekteringsdesignen enligt PK3 skall injekteringsklasser upprättas. Injekteringsklasserna ska beskriva kriterier för beslut om klass, skärmlayout, injekteringsmedel, tryck och tid, kriterier för åtgärder under utförande samt observationer/uppföljning under och efter injekteringen. Detta har gjorts vid enstaka SKB:s projekt tidigare men då endast för ett fåtal injekterings-skärmar på grund av de korta tunnallengderna. SKB:s nu framtagna injekteringsstrategi är mer generell och inkluderar stegen:

- Förutsättningar såsom anläggningsbeskrivning, typmiljöer, krav på inläckage och dropp samt bergrumsgeometrier fastställs.

- Injekteringsdesign för förinjektering, dvs beslutsprocess för förinjektering samt basdesignen i de olika typmiljöerna (Injekteringsklasser) tas fram.
- Verifiering av injekteringsdesignen, dvs beskrivna observationer med kriterier samt åtgärder, om kriterierna inte uppfylls.
- Krav på utförande och utrustning specificeras.
- Uppföljning efter utförd injektering definieras.

Anläggningen inom försvarsområdet består av centralområde, deponeringstunnlarna samt stam- och transporttunnlar. Dessa har olika krav på inläckage och geometriska förutsättningar. Bergmassans geologiska och hydrogeologiska förutsättningar vid injekteringsdesignen har preliminärt kategoriserats i så kallade typmiljöer och typzoner. Bergmassan på försvarsområdet beskrivs med sex typmiljöer och två typzoner. Denna beskrivning och indelning av typmiljöer och typzoner är preliminär och kan förändras med ökad platsförståelse inom försvarsområdet. I den nuvarande platsmodellen beskrivs att stora delar av bergmassan saknar vattenförande strukturer eller har obetydliga vattenflöden vilket innebär att den dominerande typmiljön har inget injekteringsbehov. De övriga typmiljöerna har olika sprickighet och vattenföring och därmed olika grad av injekteringsbehov. Typzonerna grupperas beroende på förväntad storlek på vattenföring. Baserad på de nuvarande förutsättningarna och krav på inläckage har en preliminär injekteringsdesign (basdesign) upprättats.

Planeringen av injekteringen börjar med en prognostisering av vilka typmiljöer och typzoner som kan förväntas för varje tunnel. Prognosticerade typmiljöer och typzoner ger en första indikation på behov av förinjektering eller inte. Inför tunneldrivningen görs undersökningar i långa pilothål. Från resultat av undersökningarna identifieras typmiljöer och typzoner med injekteringsbehov längs tunneln och de förväntade inläckagen. En uppdatering av basdesignen görs och därefter utförs en förberedelse för förinjektering längs tunneln samt vilka injekteringsklasser som ska tillämpas. Då tunneldrivningen står inför en förväntad typmiljö eller zontyper med injekteringsbehov utförs sonderingshål vid stuf. Inför en typmiljö eller zontyp med inget prognoserat injekteringsbehov ska direkt efter drivningen tunneln karteras geologiskt och hydrogeologiskt. Karteringensresultaten bedöms därefter mot prognosticerad typmiljö eller typzon för att eventuellt förändra kriterierna för typmiljö eller typzon med inget injekteringsbehov.

Under och efter injekteringen görs ett antal kontroller och observationer för att verifiera typmiljön/typzon och vald design samt åtgärda utförandet om fastställda kriterier inte uppfylls. Erfarenheten från gjorda observationer och uppföljningar ska sedan användas vid uppdateringar av designen.

Kraven på utrustningen syftar till att kunna utföra injektering i enlighet med designen. De önskvärda injekteringsövertrycken kommer att ställa höga krav på utrustning, material och säkerhetsrutiner vid utförande. Den konventionella utrustningen för injektering och som normalt används idag vid tunneldrivning kommer inte klara alla injekteringssituationer vid en utbyggnad av slutförvarsanläggningen. De injekteringssituationer som i första hand är svåra att klara med utrustningen är kopplade till det stora djupet kombinerat med höga krav på inläckage vilket innebär att små flöden ska kunna pumpas och registreras/kontrolleras med tillräcklig noggrannhet. Vidare kommer stora flöden att förekomma som också ska kunna hanteras och registreras med en stor noggrannhet i dosering och kontroll av blandningsförfarandet. Det krävs även en beredskap för oväntade situationer som kan sättas in utan större väntetider. En planerad uppföljning ska finnas efter utförd injektering. Uppföljningarna ska besvara frågan om kraven har uppfyllt samt om designen och utförandet kan effektiviseras eller förbättras.

Summary

SKB's planned underground repository for radioactive waste in Forsmark will be situated at approximately 470 meters depth over an area of about 4 km². Pre-grouting will be used during the construction of the facility to limit the inflow of water and create a foundation for an efficient installation and backfilling process. Pre-grouting, i.e. grouting at the tunnel front before excavation, with low-pH grout is the current method to limit the tunnel leakage. The purpose of this report is to describe the proposed grouting strategy, which is based on an industry standard developed by the Swedish Transport Administration and experiences from previous research projects performed by SKB.

SKB has performed a number of grouting projects focused on grouting in fine apertures and at great depths since the 80's. The main result from these projects is a design methodology which provides a relationship between the conditions (water pressure, water gradients and apertures) and the grouting parameters (pressure, grout properties and grouting times). The methodology allows for the grouting design to be updated in a traceable way when the conditions change, criteria are not met or desired results are not gained. General experience and conclusions from the projects are:

- There is a need for grouts with specific properties for both fine and large apertures.
- There is a need for equipment's for both high groundwater pressure and high measurement accuracy in registration of grouting flow.
- Grouting is often time consuming if you want to achieve enough penetration of small apertures or a large grout volume.
- Grouting in the tunnel front is needed to reduce the groundwater gradients and flows in the tunnel front.
- Health and safety considerations are important when working with these high grouting pressures.
- The main grout that has been used contains three main components (cement, water, silica-slurry). This grout requires operation and mixing procedure under control.
- Unexpected events and observations will always occur. A preparedness including both equipment and material should always be considered.
- The organization shall be prepared to handle unexpected events and observations.

Development of a structured methodology for grouting design has been initiated by the Swedish Transport Administration for infrastructure project. The proposed grouting design methodology is based around three different design categories, DC 1 to DC 3, depending on the complexity of the grouting task complemented with a special case category where projects or parts of projects cannot be categorized on a standard basis. Depending on the design category, the parameters which will be analysed, and the level of the analysis are obtained. The parameters could be: the hydraulic conductivity, apertures, leakage requirements etc. The design category will guide the development of project specific grouting designs and verification requirements, both before and during the grouting work.

If the proposed grouting design methodology should be applied on the planned repository in Forsmark, it will be placed in design category 3 (DC 3) or special case. The main reason for this is that the planned facility is located at great depth with high-water gradients and pressures combined with high requirements in regard to grouting in fine apertures. The parameters which are recommended to be analysed according to the grouting methodology have already, to varying degrees, been analysed in SKB's previous projects. Implementation of the grouting design according to DC3 implies establishment of grouting classes with description of decision criteria on class, grouting fan layout, grout, pressure, grouting time, observations and follow-up of the results during and after grouting. This has been done in some SKB projects, but only for a few grouting fans because of the short tunnel lengths. SKB's now proposed grouting strategy includes the following steps:

1. Preconditions as site description, hydraulic rock mass type for grouting, sealing requirements and tunnel geometries are documented.
2. Design for pre-grouting, i.e. a process for decision of grouting and basic design in different rock mass types (grouting classes) is developed.
3. Verification of grouting, i.e. describe observations with criteria and actions if the criteria is not achieved.
4. Performance and equipment requirements are specified.
5. Required follow-up after grouting work are specified.

The underground repository consists of a central area, deposition tunnels, and main and transport tunnels with different requirements for grouting and geometric conditions. The geological and hydrogeological conditions of the rock mass have been preliminary generalized with so called rock mass types for grouting and zone types. The rock mass is described in six types and two zone types. This description and division of types and zones is preliminary and can be changed with increased understanding in the repository area. In the current site description of Forsmark the dominate rock mass has no water bearing structures or has only minor leakage and hence the dominate rock mass type has no grouting requisite. The other rock mass types have different amount of fractures and varying water flows and hence different needs in regard to grouting. The zone types have been divided into two groups for grouting depending on the expected water flow. Based on the current conditions and sealing requirements, a preliminary grouting design (basic design) has been performed using project specified analyses.

The grouting begins with a survey estimation of the rock mass type for grouting and zone types that can be predicted for each tunnel. Predicted types and zones provide a first indication of possible need of grouting. Investigation in long pilot holes will be done before tunnel excavation. The results from the investigations will identify rock mass types and zones and expected leakage and requirements. An update of the basic design is done including preliminary placement of grouting fans. Probe drilling will then be used for detailed investigations when the excavation reaches an area where there is an expected need for grouting. Rock mass type and zone with no expected need for grouting should be mapped directly after the rock excavation. The results from the mapping should be compared with survey estimation and the criteria for grouting or not could be changed.

During and after the grouting, controls and observations are made to verify the rock mass type or zone and the design. Actions are performed if the specified criteria are not met. Experience from observations and follow-ups should finally be used for updates of criteria and design.

The requirements and specifications of the equipment are based on the grouting design. The grouting pressures that will be used put high demands on equipment, materials and safety routines. A group of different machines will be required to handle grouting, as a single conventional rig as used in Sweden today will not be able to fulfil the requirements for all different grouting situations. The main challenges relate to the great depths combined with high requirements in regard to leakage where there is a need to handle both very small flows and larger inflows without losing accuracy. There are also high requirements placed on the equipment used for the mixing of the grouting material. There is, in addition, a need for preparedness for handling unexpected scenarios.

Finally, a planned quality assurance is required for all grouting work to verify that requirements have been fulfilled and to investigate if the design and execution could be further efficiency or improvement.

Innehåll

1	Introduktion	11
1.1	Bakgrund	11
1.2	Syfte	11
1.3	Rapportdisposition	11
1.4	Avgränsningar	11
2	Tidigare injekteringsprojekt	13
2.1	Stripaprojekt	13
2.2	Uppförande av Äspölaboratoriet	14
2.3	Forsknings- och utvecklingsprojekt under 1990 och 2000-talet	15
2.4	Injekteringsmedel	17
2.4.1	Cementbaserade injekteringsmedel med lågt pH	17
2.4.2	Silica sol	18
2.5	Demonstrationsprojekt i Äspö	19
2.5.1	Injektering i tunnel TASM	19
2.5.2	Injektering i tunnel TASQ	19
2.5.3	Injektering i tunnel TASS	20
2.5.4	Injektering av KBS-3H	23
2.5.5	Injektering Äspö Utbyggnad	23
2.6	Inledande injekteringsprojektering av Kärnbränsleförvaret	25
2.7	Summering av injektering på stort djup	26
3	Allmän rekommenderad projekteringsmetodik för förinjektering	29
3.1	Projekteringskategori	29
3.2	Omfattning av information och parametrar	31
3.3	Projekteringslösningar	32
3.4	Verifiering av projekteringslösningar	33
4	Tillämpning av allmän projekteringsmetodik för Forsmark	35
4.1	Val av projekteringskategori	35
4.2	Information och parametrar	36
4.3	Projekteringsmetodik	37
4.4	Verifiering av design	37
4.5	Utrustning och utförande	38
5	Injekteringsstrategi för Kärnbränsleförvaret	39
5.1	Platsspecifika förhållanden	39
5.2	Allmänna förutsättningar	42
5.2.1	Anläggning	42
5.2.2	Inläckagekrav	43
5.3	Projekteringssteg av basdesign	44
5.4	Verifiering av platsförhållandena och injekteringsdesignen	54
5.4.1	Undersökningar pilothål	55
5.4.2	Observationer under injekteringen	56
5.4.3	Observationer och uppföljning efter injekteringsutförandet	57
5.4.4	Injekteringsutförande och uppdatering av injekteringsdesign	57
5.5	Utrustning och utförande	58
5.5.1	Allmänt	58
5.5.2	Utrustning	58
5.5.3	Blandning	60
5.5.4	Beredskap	60
	Referenser	61
Bilaga 1	Inläckage efter injektering beroende på den injekterade zonens tjocklek	65
Bilaga 2	Vattnets eroderande kraft som funktion av grundvattengradient	67

Bilaga 3	Injekteringstider för bakåtlöde beroende av grundvattentrycket och injekteringsmedlets egenskaper	69
Bilaga 4	Geltider beroende av injekteringsövertryck och sprickvidd för att uppnå inträngning på 3 m	71

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

SKB:s planerade slutförvarsanläggning i Forsmark utgörs vid ca 470 meters djup av ett ca 4 km² stort område där undermarksanläggningen placeras. Anläggningen kommer att uppföras under en tidsperiod på ca 70 år. För att säkerställa att förvaret kommer att uppfylla tekniska krav samt en spårbarhet avseende design och utförande ska tekniska riktlinjer tas fram. Riktlinjerna ska baseras på beprövad eller väl utprovad metodik och teknik. Erfarenheter från SKB:s teknikutveckling ska användas för att säkerställa kvalitén på kommande projektering och utförande.

För att bibehålla säkerhet efter förslutning av Kärnbränsleförvaret ställs krav på den utsprängda och återfyllda tunneln. Bland kraven finns att begränsa inläckaget av grundvatten till undermarksanläggningen för att:

- Inläckage av grundvatten till Kärnbränsleförvarets bergutrymmen behöver begränsas för att påverkan av omgivande grund- och ytvatten inte överstiger vad som kan tillåtas i enlighet med tillstånd enligt Miljöbalken.
- En god arbetsmiljö i bergutrymmena ska säkerställas.
- I tunnlar som skall återfyllas med bentonitmaterial behöver inläckage av grundvatten begränsas för att kunna klara installation av återfyllning innan inflödande vatten når återfyllningsfronten.

Förinjektering är referensmetoden för att minimera inläckaget (SKB 2010). Ett krav vid injektering i förvarsområdet är att injekteringsmaterialet inte ska ge ett lakvatten med ett pH högre än 11, efter att den initiala förhöjda pH-plymen har klingat ut, annars riskerar bentonitbarriären att få försämrade egenskaper. Därför ska injekteringen utföras med låg-pH injekteringsmedel i förvarsområdet.

Krav på inläckaget varierar mellan olika anläggningsdelar och därmed utförandet av förinjekteringen. Då inläckagekraven förväntas innebära krav på reduktion av inläckage från fina sprickor, som inte kan penetreras av cementbaserade injekteringsmedel, kommer även alternativa injekteringsmedel bli aktuella, såsom silikatbaserade injekteringsmedel (silica sol).

1.2 Syfte

Syftet med denna rapport är att beskriva en strategi för projektering av injektering i Forsmark slutförvarsanläggning. Denna ska baseras på vedertagna kunskaper och resultat från tidigare SKB projekt.

1.3 Rapportdisposition

Inledningsvis, i kapitel 2, görs en summering av resultat från tidigare injekteringsprojekt inom SKB, med huvudfokus på projekt utförda i SKB:s undermarksanläggning i Äspö. Därefter, i kapitel 3, görs en beskrivning av en rekommenderad projekteringsmetodik för injektering som har initierats av Trafikverket. Den rekommenderade projekteringsmetodiken stäms av med SKB:s specifika förutsättningar och mål med injekteringen i kapitel 4. Slutligen, i kapitel 5, presenteras SKB:s föreslagna projekteringsmetodik för injektering med en preliminär injekteringsdesign (basdesign).

1.4 Avgränsningar

Denna rapport presenteras vedertagen kunskap och erfarenheter av förinjektering vid bergtunnel-drivning. Övrig injektering, såsom efterinjektering, injektering av bulthål, läckande injekteringshål och injektering av undersökningshål, beskrivs inte i denna rapport.

2 Tidigare injekteringsprojekt

I följande avsnitt summeras resultat från olika injekteringsprojekt för SKB sedan 80-talet och framåt.

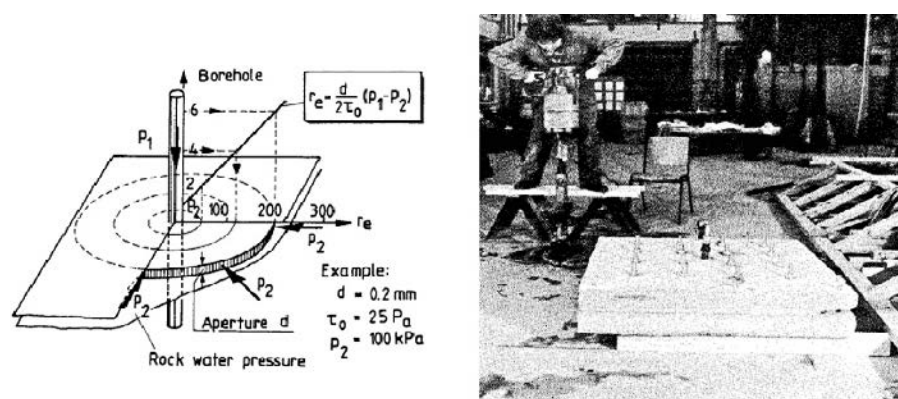
2.1 Stripaprojekt

Under 80-talet, i samband med SKB:s Stripaprojekt, genomfördes ett omfattande program för injektering, med huvudfokus på att förstå och förbättra injekteringsmedels inträngningsförmåga i sprickor, se Pusch et al. (1985) och de projektspecifika rapporterna från Stripaprojektet (Pusch et al. 1988, 1991b, Börgesson et al. 1991). Parallellt med programmet för injektering utfördes studier på de egenskaper hos sprickor som styr flödet i sprickor. Flödet av vatten studerades vid olika experiment med sprickor för att bland annat identifiera fenomenet med kanalströmning i sprickor, se Tsang et al. (1987) och rapporter från Stripaprojektet (Abelin och Birgersson 1987, Abelin et al. 1987a, b).

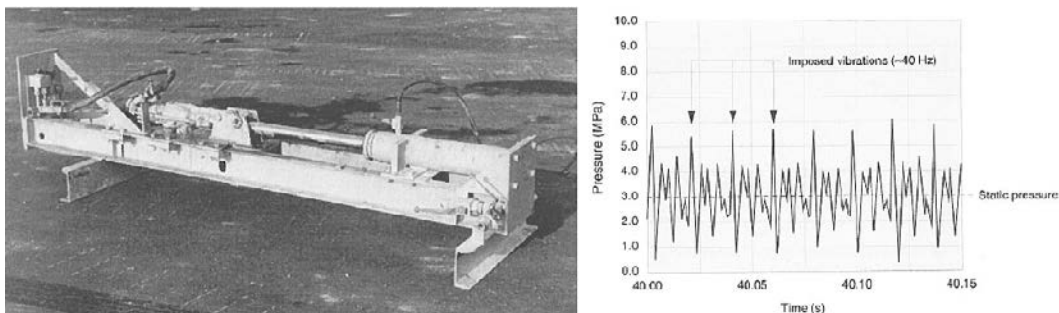
Inledningsvis gav analyser och erfarenheter från experiment med cementbaserade injekteringsmedel att sprickvidder ner till 0,2–0,5 mm kunde penetreras och att bergmassan kunde injekteras till en hydraulisk konduktivitet på 10^{-6} – 10^{-8} m/s (Pusch et al. 1985). Det konstaterades vidare att strömning i sprickor bland annat är beroende av bergmassans spänningsförhållande och fyllnadsmaterial, som kan inverka negativt på inträngningen, samt att strömningen oftast sker i kanalmonster på grund av kontaktytor mellan två sprickor. Det konstaterades att en sprickas kanalmonster påverkar injekteringsmedlets spridning och inträngning. Utöver detta diskuterades också hur möjligheten är för ett injekteringsmedel att fylla ut tätare partier längs kanalerna i sprickorna och ut mot sprickans kontaktytor (Pusch et al. 1991a).

Fortsatta utredningar och försök, både på laboratorier och i fält, gjordes för att förbättra inträngningsförmågan med olika injekteringsmedel, både cement- och bentonitbaserade. En teoretisk flödes- och inträngningsmodell användes för att prognosticera spridningen som därefter verifierades i laboratorium, se figur 2-1.

Strömningsegenskaperna på ett stort antal injekteringsmedel, både cement- och bentonitbaserade, mättes med rheometer för att förstå olika blandningars reologi och därmed få en bättre inträngningsförmåga. Tekniken som främst utvecklades och provades för att förbättra inträngningsförmågan var så kallad dynamisk injektering, där injekteringsövertrycket varierar med viss frekvens, se figur 2-2. Tekniken provades både i spalt på laboratorium och i fält.



Figur 2-1. Den teoretiska modellen och försök i laboratoriet för att verifiera den (Pusch et al. 1985).



Figur 2-2. Injekteringsutrustning och ett exempel på hur trycket varierades i projektet i Stripa (Pusch et al. 1988).

I slutrapport från Stripa projektet (Gray 1993) så redovisades att med dynamisk injektering och framtagna injekteringsmedel, både cement- och bentonitbaserade, förbättrade inträngningsförmågan. I försök med spalter på 0,1 mm erhöles en inträngning av cementbaserade injekteringsmedlen med låga vattencemental. Inträngningar ner till 20 μm erhöles med bentonitbaserade injekteringsmedel. Vidare utfördes fältförsök med cementbaserade injekteringsmedel, där de hydrauliska undersökningarna visade att bergmassans hydrauliska konduktivitet reducerades ner till ca $1-5 \times 10^{-10}$ m/s efter injektering. I slutrapporten poängterades vidare att ett ”högt motstånd mot erosion och piping” erhöles med den dynamiska injekteringen.

2.2 Uppförande av Äspölaboratoriet

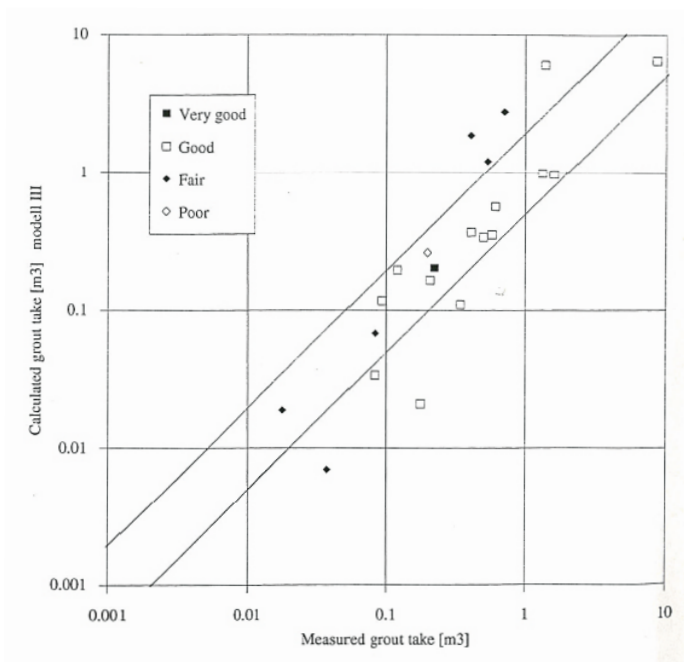
Under uppförandet av Äspölaboratoriet, i början av 90-talet, gjordes uppföljningar av injekteringen med syfte att få en bättre förståelse kring injekteringsens effekt och spridning, se Stille et al. (1993, 1994).

Äspölaboratoriets nedfartstunnel injekterades med selektiv injektering, dvs baserat på resultat från sonderingshål med hydrauliska tester togs beslut om förinjektering skulle utföras eller inte. Inledningsvis användes den då konventionella gällande injektering med cementbaserade injekteringsmedel, med en kornfördelning och vatteninnehåll (vct) högre än dagens konventionella cementbaserade injekteringsmedel, och konstanta injekteringsövertryck oavsett djup. Injekteringen påbörjades i hål med högst vattenförlust och pågick tills ett stopptryck uppnåddes, dvs inget registrerbart injekteringsflöde erhöles vid ett konstant tryck. I injekteringsmedlen tillsattes färg för att sedan eventuellt kunna identifiera sprickor med injekteringsmedel. För att begränsa spridningen användes ett volymkriterium om maximalt inpumpad injekteringsvolym.

Uppföljningen bestod i 145 injekterings-skärmar, med en injekterad volym av ca 280 000 liter, på en tunnallengd av ca 2,5 km. Uppföljningsaktiviteterna var främst vattenförlustmätningar från varje skärm, injekteringsutförande såsom tryck och volym per hål samt mätningar av injekteringsmedlens egenskaper med rheometer. Grundläggande inträngningssamband utvecklades för strömning med Bingham-modell, dvs injekteringsmedlens flödesmodell som kopplades mot transmissivitet, empiriska sprickegenskaper vid injekterings-spridning samt injekteringsövertryck. Uppmätta injekteringsvolym kunde kopplas till sambandet mellan injekteringsmedlens strömningsegenskaper, spricktransmissivitet, geologisk kartering av sprickegenskaper samt utfört injekteringsövertryck, se figur 2-3.

När tunneldrivningen nådde ner till större djup, dvs mer än 100–150 m, och vid större vattenförande partier observerades problem med injekteringsmedlens hållfasthetstillväxt. Speciellt problematiskt var passagen genom deformationszonen NE-1 med kraftig vattenföring och höga vattentryck. Identifieringen av svårigheter att passera vattenförande deformationszoner med kraftig vattenföring resulterade senare en utredning om hur passagen av NE-1 skulle ha kunnat lösas från ett injekteringsperspektiv (Bodén och Sievänen 2005).

Ett antal olika recept på cementbaserade injekteringsmedel provades, såsom olika cementsorter och tillsatser, samt kemiska injekteringsmedel provades för att kunna passera deformationszonen med tunneldrivningen Stille et al. (1993). Ett acceptabelt inläckage uppnåddes efter stora mängder inpumpade injekteringsmedel.



Figur 2-3. Uppmätta injekteringsvolymer mot beräknade injekteringsvolymer baserade på hydrauliska egenskaper, geologisk kartering av sprickegenskaper och utförd injekteringsövertryck (Stille et al. 1994).

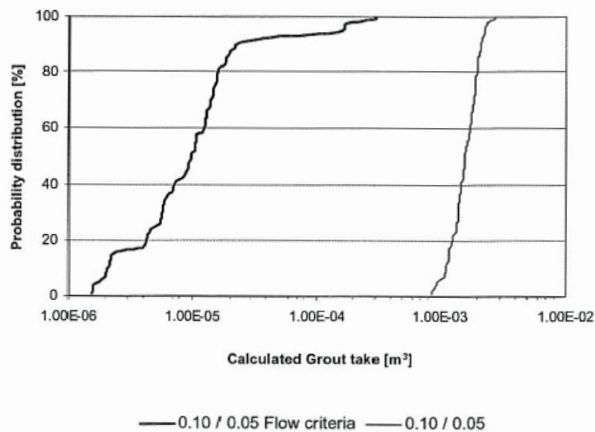
Det slutliga receptet på injekteringsmedlet som ansågs vara lösningen på problemet var ett cementbaserat injekteringsmedel med hög andel accelerator, dvs natriumklorid. Denna lösning med natriumklorid i det cementbaserade injekteringsmedlet, mellan 5 och 15 %, ansågs därefter vara nödvändig att använda vid fortsatt tunneldrivning. Med detta receptet uppnåddes en tillräcklig snabb hållfasthetstillväxt som klara att hålla tillbaka de stora flödena under höga grundvattentrycken. Injekteringsmedlets beständigheten diskuterades eftersom natriumklorid (salt) påverkar generellt cementkonstruktioners livslängd.

2.3 Forsknings- och utvecklingsprojekt under 1990 och 2000-talet

Under mitten av 90-talet påbörjades inom SKB en översyn, med bland annat resurser från högskolor och institut, om kommande injekteringsbehov och kunskapsläget inom Sverige. Från slutsatser av översynen påbörjades tre mer omfattande forsknings- och utvecklingsprojekt av SKB (Bodén et al. 2001).

De tre projekten hade olika fokus, där ett behandlade karaktärisering av bergmassan med avseende på injekteringsbehov (i), det andra projektet injekteringsmedlets spridningsförlopp (ii) och det tredje projektet cementbaserade injekteringsmedlens egenskaper (iii). Två av projekten, dvs (i) och (ii), utfördes som traditionella doktorandprojekt med doktorsavhandlingar på Chalmers (Fransson 2001) respektive KTH (Eriksson 2002). Det tredje projektet utfördes inledningsvis som ett utvecklingsprojekt på dåvarande CBI (Cement och Betong Institutet), som hade fokus på beständighet och kemisk stabilitet, och Vattenfall Utveckling, som hade fokus på filteringsstabilitet. Det sistnämnda kom senare att övergå till ett industridoktorandprojekt på KTH (Eklund 2005).

De två första projekten gav ett förslag på karakteriseringsmetodik för berg från injekteringsynpunkt (i) samt utvecklade numeriska modeller för simulering av injekteringsförloppet (ii) vilket gav principiella förståelser för olika fenomen och utförande under injekteringen, se figur 2-4.



Figur 2-4. Exempel på resultat från numerisk simulering, med illustration av åtgången cementbaserad injekteringsmedel beroende på ett flödeskriterier (fet linje) används eller inte (tunn linje) (Eriksson 2002).

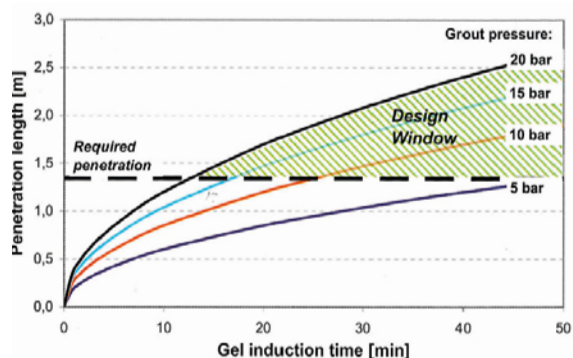
Det tredje projektet innefattade flera olika delar såsom inventering och karakterisering av cementmaterial med olika tillsatser, beskrivning av cementbaserade injekteringsmedel avseende beständighet och den kemiska påverkan och slutligen filteringsstabilitet. Utredningarna från projekt (iii) visade bland annat att under injekteringen sker en separation i det cementbaserade injekteringsmedlet då lättare partiklar i medlet flödar en längre sträcka än mer tyngre partiklar på grund av gravitation och låga strömningshastigheter. Därmed kan den kemiska reaktionen för cementbaserade injekteringsmedel bli olika beroende på om medlet har flödat, i exempelvis sprickor, eller bibehållits i ett stilla tillstånd, exempelvis i ett kärl.

Laborationsförsök utfördes av Eklund (2005) för att hitta parametrar som påverkar de cementbaserade injekteringsmedlens inträngningsförmåga i smala vidder. Resultaten visade att störst påverkan har kornstorleken och kornfördelning. Svårigheten med att karaktärisera de cementbaserade injekteringsmedlen med avseende på inträngningsförmåga via laborationsförsök uppmärksammades eftersom resultaten från försöken påverkades av provningsmetod, såsom spalt eller filtermetod, samt provningsmängden.

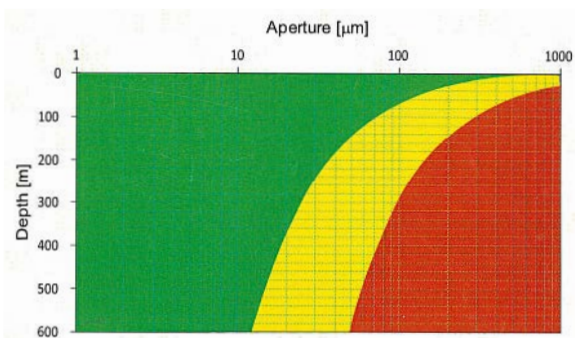
Under de aktuella forskningsprojekten identifierades nya frågeställningar. Två av dessa frågeställningar var dels erosion av ohärdat cementbaserat injekteringsmedel, som beskrevs med ”vandrar ut i stuff eller rinner tillbaka in i injekteringshål”, dels att hitta ett alternativt injekteringsmedel med bättre inträngningsförmåga än cementbaserade injekteringsmedel, dvs möjligheten med kolloidal silika (silica sol). Båda dessa frågeställningar initierade nya doktorandprojekt med SKB som delfinansiär, dvs Axelsson (2009) och Funehag (2007).

I Funehag (2007) beskrivs injekteringsmedlet silica sol, se mer i avsnitt 2.4.2, samt underlag och samband för design med silica sol, se figur 2-5.

I Axelsson (2009) beskrivs även materialet silica sol men främst beskrivs villkor för att undvika erosion av cementbaserade injekteringsmedel i sprickorna, se figur 2-6. Risken för erosion är främst kopplat till tunnlar med stort djup.



Figur 2-5. Designfönster för silica sol injektering där önskvärd inträngningslängd och valt injekteringsövertryck ger vilken gelinduktionstid silica solen ska blandas för (Funehag 2007).



Figur 2-6. Nomogram för att kunna uppskatta risken för erosion i cementbaserade injekteringsmedel, i en tunnel med radien 5 m. I rött område är risken hög för erosion och en design krävs som beaktar risken, i gult område finns en viss risk men denna kan hanteras med ett cementbaserat injekteringsmedlen med hög flytgräns och i grönt område är risken låg (Axelsson 2009).

Därefter har SKB finansierat och deltagit i flera doktorandarbeten:

- Injekteringsövertryckets inverkan på bergmassan (Gothäll 2009).
- Injektering i ett 3D-dimensionellt vattenförande spricksystem (Hernqvist 2011).
- De hydrauliska egenskaperna runt tunnelkonturen och injekteringens effekt (Butron 2012).
- Kopplingen mellan hydrogeologiska och bergmekaniska egenskaper i sprickor som kan injekteras (Thörn 2015).

Injekteringens spridningsförlopp med Binghamflöde hade fram till år 2004 endast kunnat lösas numeriskt, se exempelvis Eriksson (2002) eller analytiskt för den maximala inträngningen, se exempelvis Stille et al. (1993). För ett kanalflöde (1D-flöde) och sprickplansflöde (2D-flöde) visade Gustafson et al. (2013) en analytisk lösning som gav en relativ inträngning i 1D eller 2D flöden. Den relativa inträngningen är förhållandet mellan den aktuella inträngningen vid en vis tidpunkt och maximal inträngning vid den oändliga tiden. Baserat på denna analytiska lösning utvecklades analysmetodikerna och det så kallade konceptet "Real time grouting control method" (RTGC) introducerades, se Kobayashi och Stille (2007) och Kobayashi et al. (2008).

Målet med RTGC konceptet är att man ska kunna utvärdera spridningen av injekteringsmedlet under själva pumpningen på stuf och därmed kunna verifiera injekteringens spridning samt sätta rätt stoppkriterium under pågående pumpning. Verifiering av konceptet har gjorts på utförda injekteringar. Försök gjordes för att detta ska kunna automatiseras direkt vid pumpningen men ännu har inte alla praktiska registrering- och pumpningstekniska problem lösts.

2.4 Injekteringsmedel

Avsnittet är uppdelat i två delavsnitt ett kring cementbaserade injekteringsmedel med lågt pH och ett kring injekteringsmedlet kolloidal silika (silica sol). För en allmän beskrivning av konventionella cementbaserade injekteringsmedel finns flera referenser, bland annat Eriksson och Stille (2005) och Stille (2015).

2.4.1 Cementbaserade injekteringsmedel med lågt pH

Ett samarbete genomfördes i början av 2000-talet mellan SKB, NUMO (Japan), och Posiva (Finland) där cementbaserade injekteringsmedel med låg pH togs fram och testades (Bodén och Sievänen 2005). Ett konventionellt cementbaserat injekteringsmedel ger ett pH-värde för lakvattnet på 12 till 13. För att undvika att riskera att bentonitbarriären får försämrade svällförmåga bör lakvattnet inte överstiga ett pH-värde över 11.

Ett cementbaserat injekteringsmedel med lågt pH erhålls med alternativa cementsorter eller tillsatser som kan blandas i olika proportioner i förhållande till vatten. Totalt studerades och testades ca 200 olika receptblandningar. De tekniska egenskaperna som provades i laboratorium bestod av:

- Strömningsegenskaperna viskositet och flytgräns med rheometer.
- Penetrationsförmågan med filterpump och penetrameter.
- Sedimentering och separation i glascylinder.
- Hållfasthetstillväxt med fallkon.

Dessutom kompletterades vissa recept med mätning av marshkontiden och bestämning av tryckhållfastheten via enaxligt tryckförsök.

I samarbetsprojektet indelades receptblandningarna i fem huvudgrupper; Portlandcement och silica-slurry, slagcement, sulfitecement, lågalkalisk cement samt flygaska. De mest lämpliga recepten, med avseende på pH värdet, tekniska och miljömässiga egenskaper, valdes ut för två mindre fältförsök i Finland.

Resultaten från provningen i laboratoriet visade att receptblandningar med Portlandcement och silica-slurry, benämnt som OPC+SF, uppfyllde kriterierna bäst. Första fälttestet med bland annat OPC+SF var inte tillfredsställande och visade att recepten behövde förbättras ytterligare, främst med avseende på hållfasthetstillväxten och penetrationsförmågan.

Inför fältförsök nummer två förbättrades recepten efter nya laborationstester. Receptet bestod av vatten, Ultrafin 16, Grout Aid samt tillsats av SP40 (melaminbaserad flytmedel), vilket gav ett W/DM på 1,6, dvs förhållande mellan mängden vatten och torrmaterial. På grund av att recepten innehåller tre huvudkomponenter (vatten, cement och silica-slurry) blir det traditionella begreppet vattencementtalet (vct) mindre relevant och begreppet W/DM mer användbart.

Fältförsöket gav bättre injekteringseffekt än första försöken men inte helt tillfredsställande då bland annat inläckaget i det injekterade tunnelavsnittet ökade efter bultmontaget och resultatet från den löpande provningen med filterpump gav sämre resultat än motsvarande laborationsprovning.

Utveckling av receptblandningarna med Portlandcement och silica-slurry fortsatte av Posiva med nya laborationstester och fältförsök (Sievänen et al. 2006). Resultaten efter laborationsprovningarna gav ett recept med ett lägre W/DM tal, dvs 1,4, och ett nyutvecklat naftalenbaserat flytmedel från leverantören jämfört med receptet vid fältförsök två. Laborationsprovningarna visade att olika faktorer påverkade resultaten såsom åldern på cementet och silikaten, blandartyp samt blandningstemperatur.

Fältförsöken gav en injekteringseffekt på ca 90 % med mindre fukt och läckage efter bergguttaget genom den injekterade tunneln. En erfarenhet från försöken var problemet med att blanda rätt med samtliga komponenter samt att ha beredskap för mätutrustning om något går sönder.

Det framtagna receptet med W/DM 1,4 rekommenderas för fortsatt användning (Sievänen et al. 2006).

2.4.2 Silica sol

Studier av injekteringsmedlet kolloidal silika, eller det så kallade silica sol, som alternativt injekteringsmedel för SKB inleddes i början av 2000-talet. Medlet är en lösning bestående av partiklar gjorda av amorf kisel och vatten, lösningens partiklar varierar mellan 2 och 100 nm. Lösningen innehåller vanligtvis ca 40 % partiklar, som joniseras från vattenglas.

De inledande studierna av materialet, främst dess reologiska egenskaper och inträngningsförmåga, påbörjades av Funehag (2007) och Axelsson (2009). Medlet beskrivs som en Newton-vätska med en viskositet kring 5 mPas men som efter tillsättning av en accelerator, vanligtvis saltlösning, gelar kraftigt efter vanligtvis 10 till 40 minuter beroende på saltlösningens koncentration samt temperatur. Både kortare och längre geltider kan erhållas beroende på önskemål. Inträngningsförmågan har kunnat påvisas ner till ca 10 μm (Funehag 2007).

Silica solen har en jämförelsevis låg sluthållfasthet men får en snabbare tillväxt av den, jämfört med cementbaserade injekteringsmedel. Direkt efter gelningen, dvs normalt efter 20–50 minuter, är hållfastheten ca 60 till 80 Pa. Hållfastheten ökar sedan kontinuerligt, exempelvis fås efter ca sex månaders gelning en hållfasthet på ca 45–60 kPa (Axelsson 2009). Vidare kan det gelade medlet krympa vid torra förhållanden men krympningen är obetydlig vid 98 % luftfuktighet.

Medlet är svagt basiskt, pH mellan ca 7 och 8, och utgörs av så kallade nano-partiklar och ska därför skyddas mot ögon- och hudkontakt men i övrigt saknas kända negativa hälsoeffekter. Vidare ska ingående komponenter hanteras som färskvaror, 18 månaders långtidsstabilitet försäkras den vanligaste leverantören, samt förvaras vid ungefär rumstemperatur, dvs 5 till 35 grader.

Beständigheten är inte helt klarlagd men det gelade medlet anses stabilt så länge det finns vatten i omgivningen. I det pågående forskningsprojektet, som SKB finansierar och deltar i, om silica sol:s beständighet (Sögaard 2018) har det konstaterats att både grundvattnets kiselinhåll och pH-värde är betydelsefullt att ha kännedom om. Kiselinhållet behöver vara mättad för att inte påverka silica solens beständighet. Beständigheten påverkas även av ett högt pH-värde, vid vilken nivå är förnärvarande oklart.

2.5 Demonstrationsprojekt i Äspö

Under större delen av 2000-talet bedrev SKB ett omfattande arbete med fokus på demonstrationsprojekt i SKB:s berglaboratorium under Äspö, för att verifiera pågående metodikutveckling av injekteringsdesign och injekteringsmedel, se avsnitt 2.3 och 2.4. Målet med demonstrationsprojekten var att *”Tillse att det finns kunskap, metoder, injekteringsmedel och utrustning för att klara upp-trädande tätningssituationer med de särskilda krav som slutförvaret ställer”* (Emmelin et al. 2007). Nedan beskrivs de huvudsakliga projekten.

2.5.1 Injektion i tunnel TASM

I en bergpelare mellan Äspö:s nedfartstunnel och den mindre tunneln TASM har flera undersökningar och tester utförts för att verifiera samband, injekteringsmetodik och injekteringsmedel. Inledningsvis borrades hål för hydrauliska undersökningar och karakterisering (Fransson 2001). Därefter prognostiserades en cementbaserad injektion med inträngningslängd och volym (Eriksson 2002). Både inträngningslängd och volym prognostiserades som små, dvs 0 till 200 mm respektive mindre än 0,015 liter. Detta baserades på små hydrauliska sprickvidder, dvs mellan 40 och 50 mm, samt att sprickplanen innehåller en stor andel kontaktytor. Injektionen utfördes och därefter borrades injektoringen upp. Inträngningen bedömdes visuellt till ca 5 cm och med en sprickutfyllnad på ca 50 %.

Bergpelaren användes senare för att verifiera inträngning och sprickutfyllnad med det alternativa injekteringsmedlet silica sol (Funehag 2007). Fyra nya hål borrades och därefter utfördes nya hydrauliska undersökningar och karakterisering för att bedöma spricktransmissiviteter och hydrauliska sprickvidder. De hydrauliska sprickvidderna varierade mellan 13 och 52 mm. Därefter gjordes en injekteringsdesign för injekteringsmedlet silica sol och som utfördes i ett av borrhålen. Det injekterade hålet och två närliggande hål, ca 0,3 m från det injekterade hålet, observerades och undersöktes. Injektionens resultat undersöktes visuellt genom observationer i bergmassan och mikroskopiering samt genom att nya hydrauliska undersökningar utfördes i kvarvarande borrhål. Inträngningen bedömdes till ca 0,65 m och sprickutfyllnaden på ca 70 %.

2.5.2 Injektion i tunnel TASQ

Det första storskaliga injektionsförsöket i Äspö utfördes år 2004 (Emmelin et al. 2004). Detta gjordes i samband med berguttaget av tunnel TASQ, som sprängdes ut för att genomföra de så kallade pelarstabilitetsförsöken ”APSE” (Andersson och Eng 2005). Injektionen i samband med berguttaget utfördes inte som en kontinuerlig förinjektion, utan beslut om injektion baserades på resultat från den hydrauliska karakterisering. Huvudsyftet med injektionsförsöket i TASQ var att observera och dokumentera vad man kunde uppnå med *”bästa tillgängliga teknik, material och kunskap under aktuella förhållanden”*.

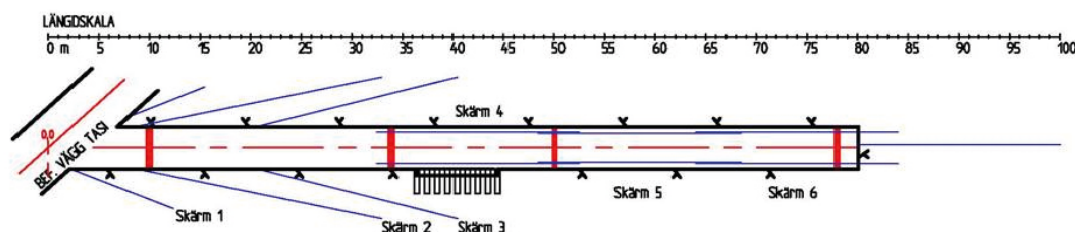
Försöket följde en karakteriseringsmetod som innebar stegvisa beslut och analyser av design utifrån resultat av undersökningar i det inledande pilotborrhål genom hela tunneln och därefter sonderings- och injekteringshål vid aktuell injekteringskärm.

De hydrauliska testerna, dvs inflöde under borring och tryckuppbyggnadstester, syftade till att identifiera strukturer som skulle injekteras. Injektering skulle utföras om de hydrauliska sprickvidder var över 50 μm . Val av injekteringsutförandet, dvs hålgeometrier, injekteringsövertryck och -tider samt injekteringsmedlets egenskaper, baserades på beräkningar i en numerisk kanalnätmodell där resultat från de hydrauliska testerna gav indata. Beräkningarna i den numeriska modellen visade prognostiserad bruksspridning och injekteringseffekt beroende på utförande. Injekteringsutförandet och medlets egenskaper justerades tills resultaten från beräkningarna blev de optimala.

Baserat på resultat från undersökningarna i pilothålet ansattes två injekteringskärmar med ett injekteringsutförande. Undersökningarna i sonderingshål inför den första injekteringskärm gav betydligt större inflöden än förväntat, och injekteringsutförandet anpassades med två omgångar istället för ursprungliga en omgång. Målet med den första injekteringsomgången var att injektera de större inläckagen, varefter den andra omgången utfördes enligt ursprunglig design med målet att injektera de mindre inläckagen. Injekteringseffekten, dvs inläckage före och efter injektering, var hög, dvs mellan 95 och 97 %, och överstämde bra med motsvarande prognos.

2.5.3 Injektering i tunnel TASS

År 2006 initierades "Fintättningsprojektet" med syftet att vara SKB:s referensprojektet vid injektering på stort djup, dvs 450 m, med SKB:s inläckagekrav och kriterier. Den injekteringsmetodik och teknik som hade utvecklats inom SKB:s tidigare projekt skulle demonstreras i den knappt 80 meter kommande TASS tunneln. Projektets mål härleddes från det preliminärt ansatta tillåtna inläckaget för en deponeringstunnel, dvs 5 l/min, 300 m tunnel. Det tillåtliga inläckaget ger att cementbaserad injektering inte är tillräckligt i de sprickvidder som behövs injekteras och därför skulle ett injekteringsmedel behövas med bättre inträngningsförmåga än ett cementbaserat. Initialt låg därför projektfokus på injekteringsmedlet silica sol, där erfarenhet saknades av storskalig silica sol injektering på aktuellt djup. Projektets mål kom även att omfatta det tidigare framtagna cementbaserade injekteringsmedlen med lågt pH. Totalt utfördes sex stycken injekteringskärmar med skärmlängd på ca 20 m, se figur 2-7.



Figur 2-7. Planskiss över TASS-tunneln med förinjekteringskärmarna markerade med blåa linjer och mätvallar med röda linjer (Funehag och Emmelin 2011).

De tre första skärmarna borrades utanför tunnelkontur, se figur 2-7. Ingen tidigare erfarenhet fanns från att göra injekteringskärrar innanför konturen och därför beslöts att de tre efterföljande skärmarna skulle borrar helt innanför tunnelkonturen. Detta för att begränsa spridning av injekteringsmedel och undvika injekteringshål i bergmassan utanför tunneln. Följande resultat och erfarenheter från projektet har noterats (Funehag och Emmelin 2011):

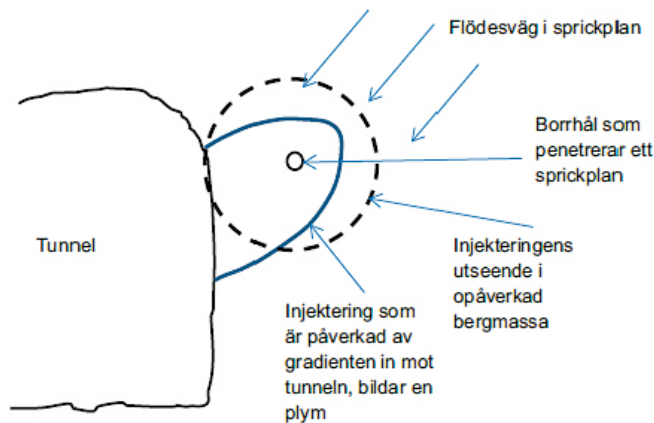
- Resultat i kontrollhål visade att inläckaget reducerades 100 till 1 000 gånger jämfört med inläckage i undersökningshål före injekteringen.
- Undersökningar i pilothålen gav olika uppskattade hydrauliska sprickvidder beroende på undersökningsmetod. Dubbelmanschett i 3-meter sektion gav större sprickvidder jämfört med ”Posiva Difference Flow Logger” (PFL) mätningar. Rekommendationen var att använda PFL som ger mer tillförlitliga resultat för att bestämma injekteringsmedel gällande penetrerbarheten. För större flöden, dvs > 5 l/min, stryps flödet i PFL och därmed kan inte de största vidderna bestämmas med PFL.
- Trots god kännedom om bergmassan inför injekteringen genom tidigare undersökningar, närliggande tunnlar samt omfattande undersökningar i pilothål så erhöles oväntade observationer under projektet. En av dessa observationer var en större förekomst av sub-horisontella vattenförande sprickor än vad som prognosticerats samt markant större inflöden i någon skärm än vad som prognostiserats.
- Trots tre parallella pilothål med utförda hydrotester längs tunneln så identifierades inte alla större inflöden jämfört med resultat från hydrotester i injekteringskärrar. Därför poängterades det att planerade åtgärder även ska innehålla scenarier som inte har identifierats i pilothål men av erfarenhet kan förekomma.
- Dimensioneringskriteriet ”*minsta hydrauliska sprickvidd som behöver tätas för att klara täthetskravet*” ansågs vara den mest aktuella parametern för att styra injekteringsdesignen. I den minsta hydrauliska sprickvidden ska inträngningen nå en bestämd längd, främst genom val av injekteringstiden. Små förändringar av dimensionerande sprickvidden kan ge stora praktiska konsekvenser på nödvändiga injekteringstider.
- Någon tydlig gräns när injekteringsmedlet silica sol eller cementbaserade injekteringsmedel skulle användas kunde inte särskiljas.
- Vid designen antogs att ett överlapp i inträngningen mellan två injekteringshål till 50 % i den minsta sprickvidden som skulle injekteras. Detta kan vara rimligt vid injekteringshål utanför tunnelkontur och ger då också en injekterad zon runt tunnelkontur. Då hålen är innanför tunnelkontur fås inte en tillräcklig zon utanför tunnelkontur, vilket också bekräftades i en skärm då inträngningen utanför tunneln blev otillräcklig. Vidare antogs 2D flöden i sprickplan, vilket troligtvis ger kortare inträngningslängder än vad sprickor med kontaktytor har och därmed fås konservativa resultat med analys i 2D sprickplan.
- Skärm utanför kontur bestod av 20 m långa hål, hålstick (avstånd mellan tunnelkontur och hålspets) på 5 m samt ett hålspetsavstånd på 2 m som justerades till 1,5 m för att minska injekteringstiden. Skärm innanför kontur bestod av motsvarande geometri förutom hålsticket. Inledningsvis borrades injekteringshålen parallella och raka med tunneln men efter en skärm ändrades det så att ”ena hålets ansättning motsvarade det andra borrhålets slutpunkt projicerat i tunnelstuff”, dvs en vridning av hålen så att de flacka sprickorna skulle träffas bättre.
- Injekteringshål innanför tunnelkontur tillför ett antal praktiska problem. Först ska borrhningen, med gällande ansättning- och toleranskrav (4 %), av hela hålet hamna innanför kontur. Detta innebär att ansättningen för ett 20 m långt hål måste vara 80 cm innanför teoretisk kontur. Från början av projektet hade avvikelsemätningar i borrhål gjorts. Baserat på dessa mätningar erhöles därför 30 cm som en slutlig ansättning men detta ställer högre krav på borrhningen än normalt. Färre injekteringshål fås med hål innanför kontur men betydligt längre injekteringstider per hål och höga tryck för att uppnå en viss inträngning utanför tunnelkontur.
- Injektering i stuffhål ingick inte i ursprunglig basdesign men användes efter observationer om stuffläckage. Resultat visar vidare att injektering i stuffhålen reducerar tryckgradienten i nästkommande skärm. Detta förbättra förutsättningar för att klara erosionsvillkoren. Vidare rekommenderades injektering i stuffhål i tunnelände för att reducera eventuellt stuffläckage.

- Trots villkoret för ”hydraulic jacking” (uppspräckning) var uppfyllt inträffade lokalt och ytligt knak (indikation på spräckning) vid injektering. Det är därför viktigt att manschetter placeras tillräckligt långt in i injekteringshålen och är förankrade.
- Minst 5 kontrollhål användes som löpande kontroll av injekteringen och gav ett indirekt resultat genom ett medianinflöde från flera ”oberoende stickprov” men besvarar inte frågeställningen om inträngning varit tillräcklig. Kriteriet för kontrollhål med ”nollflöden” var satt till 0,1 l/min i inflöde.
- Fyra injekteringsomgångar med kontroller gjordes: stuffinjektering, omgång A, B och C. Kontrollerna visade att inflödesreduceringen avtog väsentligt med antalet injekteringsomgångar, dvs omgång B och C var i flera skärmar ”onödiga” och hade inte behövts för att uppnå tillräcklig reduktion av inläckaget.
- I projektet testades och användes en vacuum pump för avluftning och tömning av vatten som mer traditionella sätt inte klarar. Pumpen bedömdes klara detta om timingen mellan arbetsmomenten blir rätt såsom att pumpning av injekteringsmedel påbörjas direkt efter avluftningen.
- Mätning av inflöden med mätvallar var nödvändigt för att kontrollera resultaten. För att få mätvärdena säkerställda gjordes ett omfattande arbete såsom rensad sula och därefter en ”fiberduk-makadamkonstruktion” i botten (Funehag och Emmelin 2011).
- Utrustningskraven med avseende på de höga trycken samt korrosionskraven innebär ”mycket höga kostnader” jämförelsevis, speciellt för injekteringsmanschetten som är en förbrukningsvara.
- Höga krav ställdes på invägningen av olika komponenter vid injekteringsblandningen men efter flera försök med automatisk invägning fick manuell invägning göras för att få repeterbara blandningar. Vidare var krav på noggrannhet stor på flödesmätningen och även detta moment fick göras med manuell registrering då den automatiska registreringen inte klarade kraven.
- Noteringar om arbetsmiljön gäller främst injekteringsmanschetter som ofrivilligt kan glida eller skjutas ur hålen pga de höga trycken samt att ytan i de injekteringshål som har injekterats med injekteringsmedlet silica sol blir glatta. Manschetter som kan justeras glider lätt ut, dvs extra förankringar behövs.
- Inför injekteringsarbetena lades det ner tid på att ge information till entreprenören och de inblandade att förstå injekteringsdesignen, vikten av valda parametrar såsom injekteringstid och -tryck, nödvändiga kontroller och observationer samt att följa givna specifikationer. Trots detta förekom enstaka missförstånd. Icke planerade förändringar och åtgärder under arbetet gjordes i samförstånd med alla inblandade.
- Det poängteras att en basdesign kan göras men för att lyckas krävs sedan ett angreppssätt där prognosen och basdesignen hela tiden kan uppdateras efter observationer på stuff.
- Bemanningen vid injekteringsarbetena underskattades inledningsvis, det krävdes bland annat en heltidsresurs på plats för att dokumentera och leda arbetet.

Vidare utfördes efterinjektering i TASS tunnelns mittdel, där kvarvarande inläckage var som störst, se Funehag (2016). Denna mittdel motsvarar området för skärm 4 i figur 2-7 som utfördes innanför tunnelkontur och där hålen inte anpassades till den horisontella strukturen samt att designen baserades på inträngning mellan hålen och inte till injekterad zon utanför tunneln.

Designen av efterinjekteringen motsvarar metodiken för förinjekteringen men där injekteringsöverttrycket anpassas till risken för bergutfall och vattnets tryckgradient runt tunneln. Kännedom om vattnets tryckgradient runt tunneln var väsentlig för att kunna dimensionera efterinjekteringen då den påverkar både inträngningen under injekteringen, se figur 2-8, och injekteringsmedlets erosionsrisk efter injekteringen.

Under och efter efterinjekteringen uppstod problem med att vissa borrhål började läcka efter en tid. Läckaget uppstod i både hål som inledningsvis inte läckte och i hål som läckte och som upprepade ominjekteringar hade utförts i med blandade resultat. Även större ytläckage i sprickor och slag erhöles efter injekteringen. Inläckagemålet nåddes inledningsvis men efter avslutat arbete ökade det till mer än det ursprungliga. Troliga orsaker bedömdes var för långa avstånd mellan hålen, manschettplacering som satt långt in i hålen, ökat grundvattentryck in mot tunneln samt erosion av injekteringsmedlet silica solen i sprickorna. Åtgärder har diskuterats men är ännu inte gjorda i dagsläget.



Figur 2-8. Principiell bild hur omkringliggande vattenflöde påverkar en efterinjektering (Funehag 2016). Där den radiella spridningen, streckad cirkel i figuren, blir påverkad av det naturliga vattenflödet in mot tunneln och får en spridningskoncentration in mot tunneln, heldragen plymform i figuren, istället.

Slutligen kan konstateras att projektets mål uppnåddes för alla förinjekteringskärmor utanför tunnelkontur, och två av tre förinjekteringskärmor innanför kontur, dvs för alla förinjekteringskärmor utom skärm 4. Efterinjekteringskärmorna i sektionen, vid motsvarande läge som skärm 4, uppnådde inledningsvis inläckagemålet men efter en tid inte.

2.5.4 Injektion av KBS-3H

Injektionsförsök i horisontella borrhål med stor diameter, dvs 1,85 m, utfördes vid nedfartstunneln vid nivå -220 m, se Eriksson och Lindström (2008). Injektionen utfördes som en efterinjektering, dvs efter det horisontella hålet var uttaget. Huvudmålet var att visa en metod och teknik för injektivering i horisontella deponeringshål. För det utvecklades en så kallad mega-packern för injektivering som skulle klara utförande av hydrauliska tester och injektivering.

De inledande hydrauliska testerna genom den ca 2 m långa mega-packern gav att fem positioner i det ca 95 m långa horisontella hålet skulle injektiveras med injektiveringsmedlet silica sol. Det huvudsakliga målet att kunna injektivera med hjälp av mega-packern, effektiva injektiveringslängden var ca 1,6 m, uppnåddes. Totalåtgången silica sol varierade mellan ca 4 till 60 liter per position. Inflödet före injektivering varierade mellan 0,15 till 2,40 l/min per position, dvs en hydraulisk sprickvidd mellan 36 till 124 mm. Efter injektiveringen var motsvarande inflöde 0,03 till 0,25 l/min. Detta ger en injektiveringseffekt på 86,8 till 99,8 %.

2.5.5 Injektion Äspö Utbyggnad

En utbyggnad av Äspölaboratoriet utfördes under år 2012 och bestod i ett antal tunnlar och nischer. I tunnlar utfördes ett antal förinjektiveringsskärmor med huvudmålet att bibehålla grundvattennivån i omkringliggande bergmassa vid utbyggnaden (Johansson et al. 2015). Injektionen ingick inte i den tidigare serien med demoprojekt som har beskrivits i tidigare avsnitt, utan som ett arbetsmoment vid en mer konventionell tunneldrivningscykel med borring-sprängning.

Projekteringen inleddes med att ta fram en basdesign som baserades på geologisk- och hydrogeologiska förutsättningar och tänkbara injektiveringssituationer. Förutsättningarna erhöles från undersökningar i närliggande kärnborrhål och Äspö:s databas. Den dimensionerande hydrauliska sprickvidden uppskattades till ca 50 µm. Detta skulle innebära ett icke cementbaserat injektiveringsmedel men eftersom projektdirektivet var att i första hand använda ett cementbaserat injektiveringsmedel med lågt pH så dimensionerades injektiveringen efter detta. Injektiveringsöverttrycket valdes till dubbla grundvattentrycket, dvs ett totaltryck på 9 till 12 MPa beroende på 300 eller 400 m grundvattentryck. Då injektiveringen skulle göras på stort djup, dvs vid djupet ca 420 m, blev villkoret mot erosion dimensionerande för designen. Detta gav en inledande stuffinjektivering vid större inflöden och injektiveringstider upp till 35 och 45 minuter beroende på injektiveringsmedlets egenskaper.

Inför utförandet justerades designen, efter bland annat test av utrustning som visade att föreskrivet totaltryck inte kunde uppnås och från förprovning av de cementbaserade injekteringsmedlen på plats som gav andra resultat på injekteringsmedlets egenskaper än de som förutsatts vid basdesignen (Olofsson et al. 2014). Injekteringen dimensionerades vid justeringen efter inträngningslängd i minsta dimensionerande hydraulisk sprickvidd så att totaltrycket blev 8 MPa, vid 400 m vattentryck, och maximal injekteringstid till 20 minuter. Villkoret mot erosion beaktades inte vid uppdateringen av designen. Injekteringsdesignen förändrades därefter ytterligare i steg under utförandet, främst med avseende på injekteringstid och maximal volymsåtgång.

Ett antal, både förväntade och oväntade, observationer gjordes under injekteringsutförandet (Johansson et al. 2015). Den mest diskuterade observationen var problem med injekteringsmedlet som inte härdade trots längre uppehåll i arbetet och långa väntetider, upp till fyra dygn. Detta observerades främst som utglidning eller läckage av injekteringsmedel ur hålen efter manschettdemontering, se figur 2-9.

Övriga observationer var bland annat manschetter som gled ut eller rörde sig i hålet, manschetter som inte kunde justeras vid läckage, stor spridning i resultat från den löpande provningen av injekteringsmedlets egenskaper, injekteringsvolymerna med både mindre mängder än hålvolum och större än maxvolumkriteriet, problem med hantering av ytläckage, för korta borrade injekteringshål, borrade hål med mindre diameter än injekteringsmanschetten (slitna borrkronor) samt tomma injekteringshål utan injekteringsmedel efter berguttag.

Flertalet av observationerna åtgärdades direkt eller inför nästa injekteringskärm. Injekteringen uppfyllde sitt projektmål att bibehålla omkringliggande bergmassas grundvattennivån. Resultaten och analyserna visar att de tolkade geologiska och hydrogeologiska förhållandena från undersökningarna överensstämde, att injekterade sprickvidder som analyserats med hjälp av registrerade flödeskurvor till ungefär den dubbla hydrauliska sprickvidden och att den relativa inträngningen av injekteringen varierade men låg vanligtvis omkring 0,41 eller 0,22 beroende 1D eller 2D flöde, vilket är lågt för att undvika erosion på injekteringsmedlen.

Bland erfarenheterna kan noteras att det finns ett tydligt behov att utveckla injekteringsutrustningen för att uppnå önskade injekteringsövertryck och tillräcklig noggrannhet vid registreringen, av främst flödet. Vidare att utveckla eller finna manschetter som fyller sin funktion vid höga tryck och kan justeras vid problem som exempelvis läckage i hålet runt manschett.

Cementbaserade injekteringsmedel med silica-slurry klarar de låga pH kraven samt de önskvärda tekniska egenskaperna men blandningarna är känsliga för avvikelser vid blandning. Känsligheten kan bero på att tre huvudkomponenter (vatten, cement och silica-slurry) ska blandas istället för normalt två (vatten och cement). Därför finns ett tydligt behov att utveckla blandningsförfarandet i fält såsom invägning och blandningsstorlek, blandningsordning och -tid, blandningstyp och hastighet samt hantering av kvarvarande spill (bruk och vatten) i utrustningen samt blandningskontroll och yttre förutsättningar (fukt, temperatur etc).

Slutligen rekommenderas att inför kommande injekteringsarbeten ha tillräckligt med resurser hos beställaren som hanterar och har befogenheter för olika tester och kontroller, beslut samt uppföljning direkt på plats vid injekteringsutförandet och därefter utvärdering av resultat.



Figur 2-9. Uttryckt injekteringsmedel, där injekteringsmedlet är en mjuk sammanhållande massa trots en lång väntetid.

2.6 Inledande injekteringsprojektering av Kärnbränsleförvaret

För Kärnbränsleförvaret i Forsmark har två inledande förprojekteringar utförts med benämningarna "Layout D1" och "Layout D2". De två förprojekteringarna innehåller bland annat en injekteringsprojektering, se Brantberger et al. (2006) respektive Brantberger och Janson (2009). Fokus i dessa injekteringsprojekteringar var att bedöma injekteringsinsatsen för att uppnå kraven, inläckage efter injektering samt ge underlag till säkerhetsanalys.

I Layout D1 bedömdes att den injekterade zonen runt tunnlar kunde uppnå en hydraulisk konduktivitet på 1×10^{-7} m/s eller 1×10^{-9} m/s. Dessa konduktiviteter kopplas till injekteringsnivå 1, dvs till konduktiviteten 1×10^{-7} m/s, och injekteringsnivå 2, dvs till konduktiviteten 1×10^{-9} m/s. Accepterade inläckagenivåer kunde erhållas med en kombination av dessa två injekteringsnivåer, dock påpekades att den lägre konduktiviten (injekteringsnivå 2) kunde vara svår att uppnå med injektering.

Ingen detaljerad design eller några injekteringslösningar presenterades i Layout D1. Det som beskrevs var att injekteringsmedlet skulle vara cementbaserat, enligt SKB:s låg pH recept, och kunna injektera hydrauliska sprickvidder ner till 50 μm för att klara den lägre injekteringsnivån. Vidare beskrivs injektering i konventionella injekteringskärmar i en eller två omgångar beroende på injekteringsnivå. Mängden injekteringsmedel i deponeringstunnlarna uppskattades till mellan 460 och 1 120 m^3 för Layout D1.

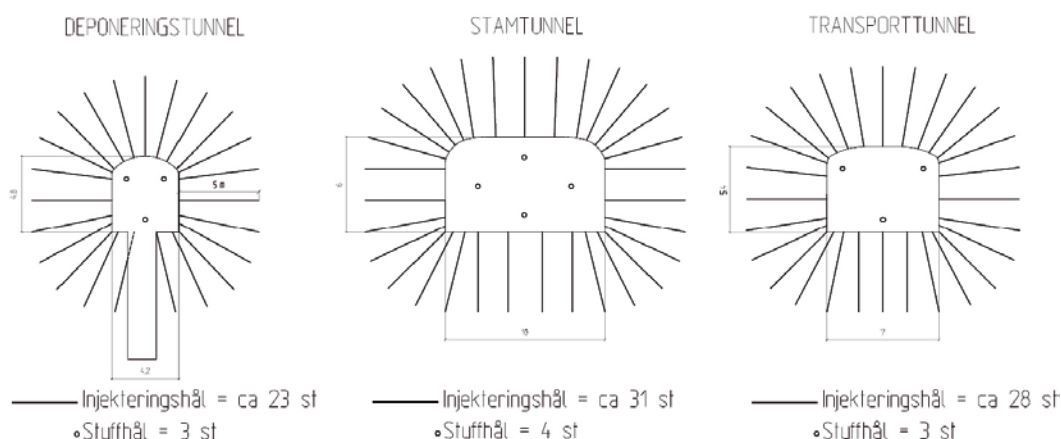
Inför projekteringen av Layout D2 hade Forsmarks platsmodell uppdaterats jämfört med Layout D1, dvs förutsättningarna hade justerats och detaljerats. I Layout D2 hade en utökad injekteringsprojektering utförts med det alternativa injekteringsmedlet silica sol, injekteringskärmar innanför tunnelkontur, mer beskrivning av utförandet och utrustning samt att verifiering av injekteringen skulle göras med undersökningar och observationer.

Inläckagenivåerna i D2 baserades på injektering kunde uppnå en konduktivitet på 1×10^{-8} m/s eller 1×10^{-9} m/s, där den högre nivån (1×10^{-8} m/s) motsvarar enbart cementbaserat injekteringsmedel med låg pH och den lägre nivån (1×10^{-9} m/s) även användande av injekteringsmedlet silica sol. Injektering med silica sol ska kunna injektera hydrauliska sprickvidder ner till ca 15–20 μm för att uppnå den lägre nivån (1×10^{-9} m/s).

I Layout D2 beskrivs att injekteringsarbetet i huvudsak ska genomföras med selektiv förinjektering, dvs vid tunnelavsnitt med vattenförande sprickor eller deformationszoner görs en förinjektering. Förinjekteringen skulle utföras med olika injekteringsklasser. Beskrivningen av injekteringsklasser baseras på så kallade "grouting types" (SKB 2009), dvs:

- Grouting type 1 (GRT1): Injektering av diskreta sprickor.
- Grouting type 2 (GRT2): Systematisk tunnelinjektering.
- Grouting type 3 (GRT3): Kontroll av stora inflöden och höga tryck.

Samtliga injekteringsklasser baseras på en basinjekteringskärm som i detalj beror på anläggningens geometri. I figur 2-10 illustreras dessa skärmar för de olika geometrierna i deponeringsområdet.



Figur 2-10. Principutförande av injekteringskärmar i deponeringsområdet (Brantberger och Janson 2009).

Injekteringsklass 1 innebär att injektering inte behöver utföras eller att endast en injekteringskärm utförs med ett begränsat antal injekteringshål eller som en fullständig injekteringskärm. Efter första injekteringsomgången förväntas ingen ytterligare omgång injektering. Klassen förväntas inte användas i deponeringstunnlar.

Injekteringsklass 2 innebär att injektering utförs som en förinjektering med en eller eventuellt två injekteringsomgångar. Minst en fullständig injekteringskärm borrar och injekteras, därefter utförs kontrollhål för att besluta om en eventuell ny injekteringsomgång. Klassen förväntas användas i deponeringstunnlar, där de högre krav på inläckage än övriga tunnlar ger ett behov av kontrollhål och eventuellt fler omgångar.

Injekteringsklass 3 innebär att injektering utförs som en kontinuerlig och omfattande förinjektering med flera omgångar. Vidare kan speciällösningar och specialutrustning bli nödvändiga. Klassen kan vara aktuell vid passage av deformationszoner med kraftig vattenföring och höga grundvattentryck. Då deponeringstunnlar inte kommer att utföras genom deformationszoner med kraftig vattenföring så kommer inte heller klassen bli aktuell för deponeringstunnlar.

Vidare beskrevs att injekteringsövertrycket för alla injekteringsklasser skulle vara minst dubbla grundvattentrycket vilket bland annat motiveras med undvikande av erosion och bakåtlöde när injekteringen stoppas. Ytterligare beskrivs att:

- De erfarenheter som finns avseende blandning av cementbaserade injekteringsmedel med lågt pH är att blandningsutrustningens prestanda och kvalitet är av stor betydelse för att få repeterbara egenskaper vid upprepade blandningstillfällen. Detta innebär även att kontroll av utrustning, rengöring och blandningstider ska ske regelbundet.
- Vid injektering med injekteringsmedlet silica sol krävs en anpassad blandnings- och pumpningsprocedur. Nuvarande procedur innebär att en sats blandas för varje enskilt injekteringshål. Eventuellt kvarvarande blandning ska efter utförd injektering tömmas ur utrustningen (från omrörare till slanganslutning vid manschett) och utrustningen rengörs innan nästa blandning påbörjas. Detta förfarande kräver mer planering, logistik och tid än konventionell cementbaserad injektering. Injektering med injekteringsmedlet silica sol kräver normalt fler resurser och en större kompetens och noggrannhet hos de som sköter injekteringen jämfört med cementbaserad injektering. Det finns således ett utvecklingsbehov avseende utrustningen, som skulle möjliggöra en mer effektiv injektering med silica sol.
- All utrustning, exempelvis slangar, kopplingar etc, ska vara dimensionerade för de höga totaltrycken som gäller på deponeringsdjupet. För konventionella manschetter innebär detta exempelvis att dessa behövde kompletteras så att tre uppspända gummipackningar finns längs borrhållsväggen.
- Blandningsutrustning, injekteringspumpar samt registreringsutrustning ska klara både låga och höga flöden.
- Ett avluftningssystem/utrustning ska finnas för att avlufta/avvattna injekteringshålen innan injekteringen påbörjas.
- En viss beredskap av snabbhårdande injekteringsmedel, utrustning för kraftiga vattenförande deformationszoner såsom Blow-Out-Preventor samt utrustning för ostabila injekteringshål såsom tubé-manschett.

Mängden injekteringsmedel i deponeringstunnlarna uppskattades till mellan 270 och 1 090 m³ i Layout D2.

2.7 Summering av injektering på stort djup

Den utvecklade designmetodik och dess tillämpning ger en bra förståelse för hur relationen mellan förutsättningar (vattentryck, gradienter och sprickvidder) och injekteringsparametrarna (injekteringsövertryck, bruksegenskaper och injekteringstider) fungerar ihop. Detta innebär att då förutsättningar ändras, kriterier som inte uppfylls eller önskade utföranderesultat inte uppfylls kan designen uppdateras på ett objektivet och spårbart sätt.

Nedan summeras huvudfarenheter av injektering på stort djup.

Vid injektering av fina sprickvidder (10 till 20 mm) i kombination med höga grundvattentryck:

- Använd injekteringsmedel med god inträngningsförmåga och motståndskraft mot erosion.
- Använd utrustning (manschetter, pumpar för låga flöden) som klarar höga grundvattentryck samt har hög mätnoggrannhet vid registrering.
- Är tidskrävande för att nå tillräcklig inträngning i sprickorna.
- Utför stufwinjektering, dvs utför injektering i hål placerade i tunnelfronten först, för att reducera grundvattengradienten.
- Beakta arbetsmiljöriskerna vid höga grundvattentryck.

Vid injektering av stora flöden med höga tryck:

- Beredskap för specifika injekteringsmedel som har en snabb hållfasthetstillväxt.
- Använd utrustning (manschetter, pumpar för stora kapaciteter) som klarar höga grundvattentryck och stora injekteringsflöden.
- Utför stufwinjektering, dvs utför injektering i hål placerade i tunnelfronten först, för att få tillräckliga injekteringsvolymen i bergmassan och därmed reducera de höga flödena.
- Beredskap och planering för stora mängder injekteringsmedel under en längre tid.
- Beakta arbetsmiljöriskerna vid höga grundvattentryck.

Cementbaserade injekteringsmedel med tre huvudkomponenter (cement, vatten, silka-slurry):

- Förbättra rutiner vid blandningsförfarandet vid fält såsom invägning och blandningsstorlek, blandningsordning och -tid, blandningstyp och hastighet samt hantering av kvarvarande spill (bruk och vatten) i utrustningen.
- Oklart hur yttre förutsättningar (fukt, temperatur etc) påverkar blandningen.

Oväntade händelser/observation:

- Behövs en beredskap av material och utrustning?
- Förbered organisation som kan bli tillgänglig om så behövs.

Slutligen att tillräckligt med resurser finns hos beställaren för att kunna hantera olika tester och kontroller, beslut samt uppföljning direkt på plats vid injekteringsutförandet och därefter utvärdering av resultat.

3 Allmän rekommenderad projekteringsmetodik för förinjektering

En ökad kunskap och förståelse om injektering i sprickigt hårt kristallint berg har allmänt skett under de senaste decennierna. En stor del av denna kunskap finns samlade och presenterade i Eriksson och Stille (2005), Gustafson (2009), Funehag (2011) och Stille (2015). Trots detta förkommer stora variationer i projekteringsmetodik för injektering mellan olika undermarksprojekt med likartade förutsättningar. Därför initierade Trafikverket år 2015 ett projekt ”*Enhetlig modell för projektering av berginjektering*” med syftet att skapa en branschgemensam och sammanhållen projekteringsmetodik vid infrastrukturprojekt, se BeFo rapport 167 (Creütz et al. 2017). Trafikverkets mål är att denna rekommenderad projekteringsmetodik för förinjektering ska inarbetats i ”*Projektering av bergkonstruktioner*” (Trafikverket 2014) och därefter tillämpas inom Trafikverkets projekt.

I det följande beskrivs denna projekteringsmetodik för att i kapitel 4 tillämpa den på slutförvarsanläggningen i Forsmark.

3.1 Projekteringskategori

Projekteringsmetodiken för förinjektering inleds med att bedöma projekteringskategori för att bestämma lämplig projekteringsinsats (Creütz et al. 2017). Projekteringskategorin bestämmer nivå och omfattning på undersökning och projektering. För en låg projekteringskategori rekommenderas enklare undersökningar och allmänt vedertagna projekteringslösningar medan en hög kategori rekommenderas mer omfattande undersökningar samt projektspecifika projekteringslösningar och detaljanalyser. Bestämningen av projekteringskategorin baseras på:

- Klassificering av berget som ska injekteras, dvs indelning i typberg.
- Krav på injekteringens resultat, dvs inläckagekrav.
- Injekteringens komplexitet, dvs svårighetsgrad.

Bedömning av typberg ska baseras på hydraulisk konduktivitet, vattenförande sprickgrupper, flödesdimension i enskilda sprickor, sprickfyllnad samt bergmassans struktur och sprickavstånd (Creütz et al. 2017).

Krav på injekteringens resultat kopplas vanligtvis till miljödom/miljödomsansökan, som anges eller omskrivs till ett maximalt tillåtet inläckage till tunneln. Då storleken på inläckaget påverkas av djupet så ska bedömningen relatera till aktuellt djup.

Slutligen ska bedömningen av projekteringskategori korrigeras mot bedömd svårighetsgrad, som bestäms med utgångspunkt från erforderlig injekteringseffekt och erforderlig hydraulisk konduktivitet i den injekterade zonen för att uppnå inläckagekravet.

Underlag vid bedömning av projekteringskategori visas i figur 3-1.

I beskrivningen poängteras även att det förekommer speciella fall där projekt eller delar av ett projekt inte kan placeras i en projekteringskategori standardmässigt. Exempel på specialfall som listas är bl a komplexa geometrier, lite eller stor bergtäckning, passage av närliggande anläggning, zontjocklek större än tunnelns bredd och djupvittrade bergarter (Creütz et al. 2017).

Identifiering av projekteringskategori				
	Låga krav >0,25 l/min, 100 m x djupmeter	Måttliga krav 0,15-0,25 l/min, 100 m x djupmeter	Höga krav 0,10-0,15 l/min, 100 m x djupmeter	Mycket höga krav <0,10 l/min, 100 m x djupmeter
Typberg 1	Projekterings- kategori 1		Projekterings- kategori 2	Projekterings- kategori 3
Typberg 2				
Typberg 3				

Justering av projekteringskategori med hänsyn till svårighetsgrad				
Erforderlig tätningseffekt				
	< 90 %	90-99 %	>99 %	
Injekterade zonen hydrauliska konduktivitet K_{inj} [m/s]	>10 ⁻⁷ m/s	Minska ev. projekteringskategori ett steg		
	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁸ m/s			Öka ev. projekteringskategori ett steg
	<10 ⁻⁸ m/s			

Figur 3-1. Underlag för val av projekteringskategori (Creütz et al. 2017).

3.2 Omfattning av information och parametrar

Information eller parametrar som bör analyseras och tolkas, beroende på projekteringskategori, visas i tabell 3-1 nedan. Tabell 3-1 ingår i remissbilagan till Trafikverkets uppdatering av ”Projektering av bergkonstruktioner”, se inledning kapitel 3.

Tabell 3-1. Information och parametrar som minst krävs i respektive projekteringskategori (PK) för vidare bedömningar och analyser.

Information och/eller parameter	Analys och tolkningsätt/nivå		
	PK 1	PK 2	PK 3
Bergmassans hydrauliska konduktivitet före injektering	Storskaliga konduktiviteten av bergmassa och zoner baserad på hydro tester i skala 10–100 m.	Storskalig konduktivitet men även utvärdering av effektiva hydrauliska konduktiviteten baserad på sektionsvis hydro-tester i utvalda områden.	Effektiva hydrauliska konduktiviteten av bergmassa och zoner baserad på sektionsvisa hydrotester i hål.
Sprickkartering	Enligt konventionellt bergklassificerings-system.	Se PK1 + resultat från kärnkartering med sprickfrekvens och sprickor kopplade till tester i sektioner. Redovisning i stereogram.	Se PK2
Sprick transmissiviteter	-	Transmissiviteten för mätsektioner baseras på en spricka per mätsektion.	Upprättande av spricktransmissivitets-fördelning. Kartering av sprickantal per kärnborrhål.
Sprickvidder	-	Sprickvidden beräknas utgå-ende från transmissiviteten.	Upprättande av sprickvidds-fördelning.
Vattenförande sprickgrupper	-	Sprickkartering, identifiering av andel öppna naturliga sprickor samt bedömning av rådande bergspänningsorientering.	Se PK2
Flödesdimension	-	-	Tolkning från hydrotester.
Sprickfyllnad	Enligt konventionellt bergklassificeringssystem.	Se PK1	Se PK1
Struktur-/sprickavstånd	Enligt konventionellt bergklassificeringssystem.	Se PK1	Se PK1
Grundvattentryck	Uppskattas med markyta och tunneldjup.	Se PK1	Grundvattennivån uppmätt i grundvattenhål.
Tunnelgeometri	Enligt projektet	Enligt projektet	Enligt projektet
Inläckagekrav	Om ej fastställt ska erfarenhetsmässig bedömning av storleks-ordning utföras.	Om ej fastställt ska översiktlig hydrogeologisk analys upprättas som minst tar hänsyn till: <ul style="list-style-type: none"> – Bedömd storskalig hydraulisk konduktivitet – Grundvattennivå – Tunneldjup 	Om ej fastställt ska översiktlig hydrogeologisk modell upprättas som minst tar hänsyn till: <ul style="list-style-type: none"> – Bedömd storskalig hydraulisk konduktivitet – Antagen erforderlig täthet – Grundvattennivå – Tunneldjup – Grundvattenbildning – Omgivande dränerande anläggningar

Beroende på skedet i en byggprojektering, dvs utredning, systemhandling, bygghandling eller byggskede, ska olika bearbetningar av information och parametrar göras för projekteringslösningen.

3.3 Projekteringslösningar

I projekteringsmetodiken beskrivs att för bygghandlings- och byggskedet ska bearbetningar av projekteringslösningar göras beroende på projekteringskategori enligt följande principer:

- PK1: Helt erfarenhetsmässiga och verifieras genom observationer vid utförande. Exempel på erfarenhetsmässiga är skärmgeometrier, egenskaper för cementbaserade injekteringsmedel, lämpliga injekteringsövertryck och -tider samt beslutskriterier.
- PK2: I huvudsak erfarenhetsmässiga, se PK1, men verifieras vid projektering med enklare analyser och vid utförande genom observationer. Exempel på analyser är beräkningar av tillräcklig spridning med givna injekteringsövertryck- och tider vid olika sprickvidder.
- PK3: I huvudsak projektspecifika med en fördjupad analysprocess.

För projekteringskategori 1 och 2 finns rekommenderade standardlösningar på skärmgeometri, injekteringsmedel och injekteringsövertryck och -tider samt beskrivning av beslutskriterier.

För projekteringskategori 3 ska en projektspecifik detaljanalys göras. I figur 3-2 illustreras analysprocessen för projekteringskategori 3.

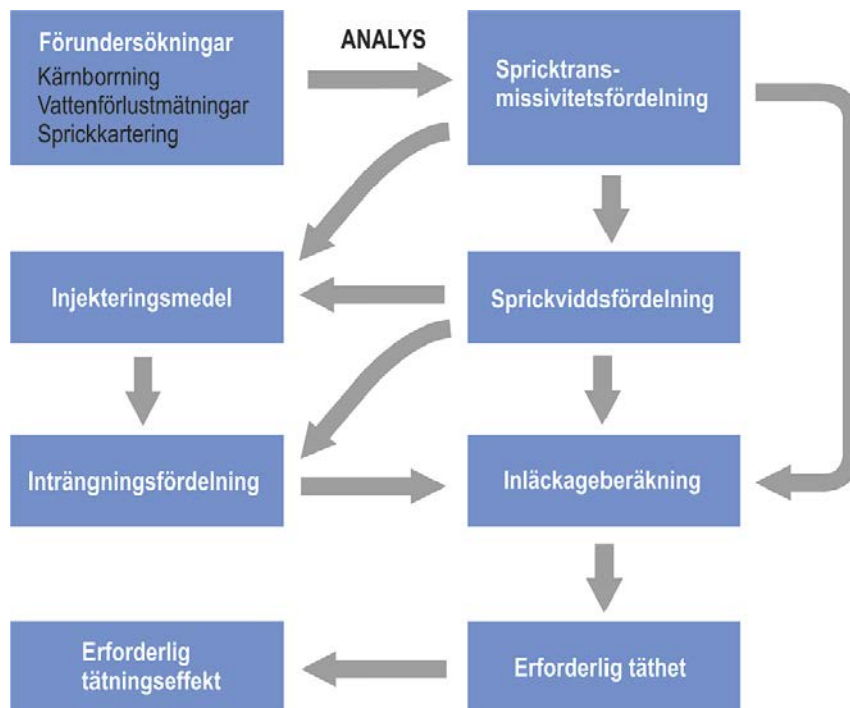
I detaljanalysen för PK3 ingår att upprätta fördelning av spricktransmissiviteter och sprickvidder i bergmassan baserad på undersökningar, att analysera inträngningslängden av injekteringsmedel i bergmassan samt att prognosticera inläckage utifrån val av injekteringsmedel, sprickviddsfördelning och skärmlayout.

Projekteringslösningarna som ska tas fram/analyseras för de tre projekteringskategorierna är:

- Skärmgeometri, som i PK1 och PK2 i huvudsak baseras på erfarenheter men i PK3 ska vara projektspecifika.
- Injekteringsmedel, i huvudsak erfarenhetsmässiga utom i PK3. Vidare finns rekommendationer på vilka provningar och metoder som ska tillämpas.
- Injekteringsövertryck och -tid, i huvudsak erfarenhetsmässiga i PK1 och PK2 men ska verifieras i PK3. I PK3 ska dessa dimensioneras.
- Beslutskriterier under injektering med varierande rekommendationer för de olika projekteringskategorierna.

I BeFo rapporten (Creütz et al. 2017) beskrivs vilka redovisningar och handlingar som rekommenderas att göra beroende på projekteringsskedet men oavsett projekteringskategori. Vid bygghandlingsskedet ska de projekterade injekteringslösningarna redovisas i form av Injekteringsklasser.

Injekteringsklasserna ska innehålla beskrivning av skärmlayout, val av injekteringsmedel, tryck och tid samt beslutskriterier och observationer/uppföljningar med kriterier och åtgärder under och efter utförd injektering. Projekteringskategorierna utgör underlag för beskrivningarna oavsett Injekteringsklass.



Figur 3-2. Analysprocess vid projekteringskategori 3, från analys av spricktransmissivitet- och sprickviddsfördelning baserat på förundersökningar till uppskattning av erforderlig inträngning och injekteringseffekt (Creütz et al. 2017).

3.4 Verifiering av projekteringslösningar

I projekteringsmetodiken beskrivs att verifiering av lösningar och resultat ska göras i enlighet med observationsmetoden, se mer i den rekommenderade projekteringsmetodiken (Creütz et al. 2017). Detta förutsätter dock ”en projektorganisation som har kompetens och organisatoriska förutsättningar att hantera gränssnitten som finns mellan arbetet med att verifiera aktuell teknisk lösning under pågående produktion och att fatta beslut och eventuellt genomföra förutbestämda korrigerande åtgärder”.

I BeFo rapporten beskrivs exempel på uppföljningar/observationer, under och efter injekteringsutförandet, som ska beskrivas i projekteringslösningarna. Dessa förtydligats i underlaget till Trafikverkets riktlinjer, se inledning kapitel 3, och redovisas i avsnitt 4.4.

4 Tillämpning av allmän projekteringsmetodik för Forsmark

I följande kapitel görs en tillämpning av den allmänna rekommenderade projekteringsmetodiken för injektering, se kapitel 3, på Forsmarks försvarsområde, dvs på djupet –450 till –477 m. Syftet med kapitel 4 är att tillämpa den rekommenderade projekteringsmetodiken med Forsmarks förutsättningar och tidigare SKB erfarenheter för att få ett underlag till vidare injekteringsstrategier.

4.1 Val av projekteringskategori

Den rekommenderade projekteringsmetodiken för injektering som beskrivs i kapitel 3 ger för Forsmarks försvarsområde följande:

- Typberg: samtliga typberg som finns beskrivet i projekteringsmetodiken förekommer i Forsmarks försvarsområde, dvs från Typberg 1 "Låg till måttlig genomsläpplig bergmassa med flödesrestriktioner främst till följd av begränsad sprickkonnektering" till Typberg 3 "Måttlig till hög genomsläpplig bergmassa med ett välkonnekterat spricksystem och få flödesrestriktioner". Typberg 1 dominerar i försvarsområdet och Typberg 3 finns främst kopplade till zoner.
- Kravet på injekteringens resultat. SKB:s krav på inflöde till en deponeringstunnel styrs av utifrån vilka vattenhanteringsmetoder som kan användas vid återfyllningsinstallation (Koskinen 2017). De inflöden som innebär inga specifika åtgärder är 0,25 l/min per 6 m, se avsnitt 5.2.2. Bedömningen blir "Mycket höga krav", dvs under 0,10 l/min, 100 m × djupmeter.
- Svårighetsgraden baseras på uppskattat inläckage före och det tillåtna inläckaget efter injektering, dvs erforderlig injekteringseffekt, samt bedömd erforderlig konduktivitet i den injekterade zonen. Vid förprojekteringen för Layout D2 gjordes dessa uppskattningar (Brantberger och Janson 2009).

Den huvudsakliga injekteringseffekten bedömdes till 0 % eftersom bergmassans hydrauliska konduktivitet är låg ($< 10^{-10}$ m/s), dvs inläckagekraven klaras utan injektering i större delen av bergmassan. Genom deformationszoner erhöles en injekteringseffekt mellan ca 50 och 90 % beroende på deformationszonens transmissivitet och valt injekteringsmedel. Den konduktiviteten som kan uppnås i den injekterade zonen uppskattades till mellan ca 1×10^{-9} m/s och 1×10^{-10} m/s beroende på valt injekteringsmedel. Detta ger en "difficult grouting" till "very difficult grouting" enligt definition i den allmänna projekteringsmetodiken (Creütz et al. 2017).

Där injektering behöver utföras i försvarsområdet fås generellt projekteringskategori 3 (PK3), se figur 4-1. Detta främst på grund av djupet och "mycket höga krav" på injekteringens resultat.

Identifiering av projekteringskategori				
	Låga krav >0,25 l/min, 100 m x djupmeter	Måttliga krav 0,15-0,25 l/min, 100 m x djupmeter	Höga krav 0,10-0,15 l/min, 100 m x djupmeter	Mycket höga krav <0,10 l/min, 100 m x djupmeter
Typberg 1	Projekteringskategori 1			Projekteringskategori 3
Typberg 2	Projekteringskategori 1		Projekteringskategori 2	
Typberg 3	Projekteringskategori 1			

Justering av projekteringskategori med hänsyn till svårighetsgrad				
Erforderlig tätningseffekt				
	< 90 %	90-99 %	>99 %	
Injekterade zonen's hydrauliska konduktivitet Kinj (m/s)	>10 ⁻⁷ m/s	Minska ev. projekteringskategori ett steg		
	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁸ m/s			Oka ev. projekteringskategori ett steg
	<10 ⁻⁸ m/s			

Figur 4-1. Generellt val (röda cirklar) av projekteringskategori för Forsmarks försvarsområde.

I den rekommenderade projekteringsmetodikerna påpekas dock att klassificeringen inte kan gälla för alla fall bl a vid stor bergtäckning (> 150 m), vilket gäller för Forsmarks försvarsområde. Vid dessa fall ska det ”undersökas huruvida den specificerade undersökningen och/eller designen inom projekteringskategorin är lämplig”. Fortsättningsvis i detta kapitel antas att projekteringskategori 3 (PK3) gäller med eventuella projektspecifika justeringar.

4.2 Information och parametrar

Med projekteringskategori (PK3) fås vilken information och parametrar som ska analyseras och/eller tolkas enligt projekteringsmetodikerna i kapitel 3. I tabell 4-1 jämförs rekommenderad information och parametrar som ska analyseras och tolkas med SKB:s tidigare erfarenheter av detta.

Tabell 4-1. Information eller parametrar för vidare analyser i PK3 samt jämförelse med SKB:s erfarenheter av dessa.

Information/parametrar och analyser/bedömning av dessa i PK3	Erfarenheter från SKB:s olika projekt
Effektiva hydrauliska konduktiviteten i bergmassa och deformationszoner baserad på sektionsvisa hydrauliska tester i hål.	Hydrauliska tester är rutinmässiga inom SKB men analysmetoder inom SKB projekt kan variera. En uppdatering av metodbeskrivning pågår.
Sprickkartering enligt konventionellt bergklassificeringssystem samt resultat från kärnkartering som kopplar till hydrauliska tester. Redovisning i stereogram.	Normalt finns de båda karteringsundersökningarna i SKB:s geologiska och hydrogeologiska undersökningsprogram. Redovisning i stereogram förekommer men inte helt rutinmässigt.
Upprättande av spricktransmissivitetfördelning. Kartering av sprickantal per kärnborrhål.	Har utförts i demoprojekt och bör beskrivas. Kartering ska utföras enligt SKB:s undersökningsprogram.
Upprättande av sprickviddsfördelning.	Se ovan.
Bedömning av vattenförande sprickgrupper genom sprickkartering, identifiering av öppna sprickor samt bergspänningsorientering	Har gjorts men osäkra slutsatser kan fås då närliggande kärnborrhål kan visa andra resultat och bedömningar. Normalt fås bra överensstämmelse mellan bedömning inför och utfall vid tunneldrivning men ibland ingen överensstämmelse. Ska istället kombineras med hydrauliska test.
Bedömning av flödesdimension genom tolkning av hydrauliska tester.	Har utförts vid TASM projektet (pelarförsöket). Vid uppföljningar har detta gjorts men inga generella slutsatser kan dras om bergmassans flödesdimension, kan variera från hål till hål och tom under flödet i samma hål. Tveksamt om denna bedömning blir helt riktig.
Bedömning av sprickfyllnad enligt konventionellt bergklassificeringssystem	Rutinmässigt i SKB:s geologiska undersökningsprogram.
Bedömning av sprickstruktur/sprickavstånd enligt konventionellt bergklassificeringssystem	Rutinmässigt i SKB:s geologiska undersökningsprogram.
Grundvattennivåer/tryck uppmätta i observationshål	Rutinmässigt i SKB:s hydrogeologiska undersökningsprogram.
Givna tunnelgeometrier	Finns typsektioner för olika berggrum men kommer att finjusteras.
Givna Inläckagekrav	Har funnits strikt tidigare men pågår utredning kring inflöden vid återfyllning av tunnlar och berggrum beroende på metoder vid hantering av vatten.

Då Forsmarks försvarsområde också kategoriseras som ”specialfall”, främst på grund av stor bergtäckning (> 150 m), finns speciella informationsbehov. Informationsbehoven är kopplade till:

- Att injektera små sprickor.
- Stor inverkan av vattengradient och höga grundvattentryck.

Injektera små sprickor kopplar främst till sprickviddsfördelning och inläckage, vilka framgår i tabell 4-1. Likaså finns i tabell 4-1 identifiering av grundvattentryck, främst genom hydrauliska tester och mätningar i observationshål. För uppskattning av vattengradient behövs projektspecifika lösningar, exempelvis med hjälp av långa undersökningshål där grundvattentrycket mäts i sektioner längs hålet.

4.3 Projekteringsmetodik

De preliminära projekteringslösningarna eller basdesignen kan i många projekt tas fram genom erfarenhetsmässiga riktlinjer men för Forsmarks försvarsområde, med projekteringskategori 3 och identifierat specialfall, behövs projektspecifika detaljanalyser utföras. De projektspecifika detaljanalyserna kan göras preliminärt i dagsläget, baserad på resultat från Forsmarks platsundersökningsprogram. För en slutlig detaljanalys och design behövs specifika tunnelundersökningar enligt information och parametrar i tabell 4-1.

I tabell 4-2 beskrivs genomförande av design enligt PK3 och som bedöms minst ingå i de projektspecifika detaljanalyserna för Forsmarks försvarsområde. Dessa genomförande jämförs med SKB:s tidigare erfarenheter av detta och om de behövs eller inte i olika grad.

Tabell 4-2. Genomförande av design enligt PK3 samt erfarenheter från SKB.

Genomförande av design i PK3	Erfarenheter från SKB:s olika projekt
Upprätta injekteringsklasser, med kriterier för beslut om klass, samt innehållande skärmlayout, val av injekteringsmedel, tryck och tid samt beslutskriterier och observationer/uppföljning under och efter injekteringen.	I tidigare demonstrationsprojekt har inte en indelning av injekteringsklasser gjorts. Detta beroende på de fåtal injekteringskärrmar som utförts. I förprojekteringen D2 för Forsmark indelades de olika anläggningsdelarna i injekteringsklasser, baserade på en bedömning av injekterings svårighetsgrad, se avsnitt 3.1. Rekommenderad skärmgeometri, injekteringsmedel samt utförande och utrustning beskrevs generellt för varje klass. Indelning i klasser kommer att tas fram vid detaljprojekteringen.
Baserat på analyser av sprickvidder, resttransmissivitet, inläckage och inträngningslängder fås skärmlayout, kriterier, injekteringsstryck, injekteringsmedels egenskaper och behov av alternativa injekteringsmedel. Vid analys ska det anges vilka antaganden som utförts gällande dimensionerande sprickvidd, dimensionerande inträngningslängd (hänsyn ska tas till att "verkligt" avstånd i sprickor är större än vinkelräta hålavståndet), antagen flödesdimension i beräkningar samt ansatt tryck och injekteringsmedels egenskaper. Analyserna ska även beakta variationerna på injekteringsmedels egenskaper.	Motsvarande genomförande har utförts i demoprojekt, främst i fintättningsprojektet för TASS-tunneln, samt delvis inför Äspö Utbyggnad. I tidigare förprojektering gjordes motsvarande mer översiktligt då dels metodiken inte var helt utvecklad samt att syftet var en mer översiktlig beskrivning. Effekten av variationen av injekteringsmedels egenskaper, vilket erfarenheterna visar är betydande, har inte varit fokus tidigare men rekommenderas att visa mer tydligt i framtida analyser. Detta kommer utvecklas vidare inom detaljprojekteringen.
Behov av sonderingsborrhål och kontrollhål vid kritiska passager och/eller i etablerade injekteringsklasser utreds.	Detta har hanterats tidigare inom SKB:s injekteringsprojekt och kommer att fortsättas med.
Känslighetsanalyser utförs för kritiska parametrar.	Generellt har kritiska parametrar beskrivits och hanterats med observationer och åtgärder men inte med specifika känslighetsanalyser. Ska hanteras som tidigare men med komplettering för variationer av injekteringsmedlets egenskaper samt grundvattenstryck.
Kriterier om kompletterande hål/omgång baseras på antalet hål som kan underkännas samt registrerade injekteringsparametrar under injekteringen.	Detta har hanterats vanligtvis genom registrerade injekteringsparametrar samt vid TASS projektet med godkända hål (< 0,1 l/min). Detta ska anges i detaljprojekteringen.
Utgående från prognostiserad omfattning av injekteringsklasser tas underlag till mängdförteckning fram för respektive injekteringsklass.	Detta har tidigare gjorts för Äspö Utbyggnad och vid förprojektering D2 mot anläggningsdelar och kommer ingå i detaljprojekteringen.

4.4 Verifiering av design

I den inledande beskrivningen för verifiering av design, se avsnitt 3.4, beskrivs att verifiering av lösningar och resultat ska göras i enlighet med observationsmetoden samt vikten av en projektorganisation med kompetens och som är aktiv under produktion med beslutsrätt. Detta överensstämmer väl med SKB:s erfarenhet från tidigare utförda projekt.

I tabell 4-3 jämförs förslagen på observationer/verifieringar av designen i den rekommenderade projekteringsmetodiken för projekteringskategori PK3 med SKB:s tidigare erfarenheter av detta.

Tabell 4-3. Observationer/verifiering av design i PK3 samt SKB:s motsvarande erfarenheter.

Förslag på observationer/verifiering av design i PK3	Erfarenheter från SKB:s olika projekt
Registrerade injekteringsparametrar (tryck, volym, flöde och tid) observeras löpande för att kunna jämföras under och/eller efter injekteringsutförandet med projekterat injekteringsförlopp och projekteringsantagande.	Detta har utförts i demoprojekten men har varierat med avseende noggrannhet, redovisningsfrekvens samt kontroll och uppföljning. Ska preciseras vid detaljprojekteringen.
Löpande provningen av injekteringsmedlets för att verifiera förprovning och ansatta tekniska egenskaper på injekteringsmedlet.	Detta har generellt inte utförts i varje omgång samt varierat med avseende på vilka egenskaper som provats och provningsmetod. Ska preciseras vid detaljprojekteringen.
Kontrollhål kan utföras mellan injekteringshål för att följa upp inträngningen och den injekterade zonens genomsläpplighet.	Detta har inte utförts i alla projekt. Det ska anges i detaljprojekteringen när detta är aktuellt, dvs inte kontinuerligt, samt kriterier för resultaten från kontrollen.
Kontroll av läckaget från utförda injekteringshål för att verifiera utförandet och/eller projekteringsvillkoret erosion.	Detta har inte utförts i alla projekt. Detta ska anges i detaljprojekteringen, inklusive kriterier och eventuella åtgärder.
Inläckage, geologisk kartering och injekteringsvolymerna följas upp och ger underlag för beslut om justering av skärmlayout och/eller injekteringsmedel i kommande skärmar.	Detta har utförts i de flesta projekten men inte alla och oklart med vilken frekvens och noggrannhet. Detta ska anges i detaljprojekteringen, inklusive frekvens och noggrannhet.
Mätning av förekommande inläckage till tunnel i mätdammar eller pumpgroppar för att kontrollera om injekteringen har uppnått inläckagekravet.	Detta har utförts i de flesta projekten men inte alla och oklart med vilken frekvens och noggrannhet. Detta ska anges i detaljprojekteringen, inklusive frekvens och noggrannhet.

4.5 Utrustning och utförande

De injekteringslösningar som erhållits i designen förutsätter att kunna utföras praktiskt i fält. Därmed ställs krav på utrustning/material och utförandet.

Från SKB:s erfarenheter, se kapitel 2, av injektering på stort djup finns flera specifika krav som främst kopplas till kontrasten mellan tätning av små och stora sprickvidder vid höga grundvattentryck. Detta kräver utrustning och material som ska klara höga tryck, kunna pumpa små flöden med hög noggrannhet samt parallellt ha hög kapacitet på blandning och pumpning vid stora flöden. Denna kompletta utrustning som uppfyller dessa krav finns idag inte på ”marknaden”, utan flera enheter kommer troligtvis att behöva användas parallellt.

Ytterligare erfarenhet är att förändringar i utförande är mer känsligt än vid konventionella ytliga injekteringar. Detta beror på att mindre förändringar ger större konsekvenser med de förutsättningar och förhållanden som gäller vid stort djup, såsom att både små och stora sprickvidder som ska injekteras parallellt och med de aktuella tryckförhållandena. Detta gäller även blandningsförfarandet för låg-pH cementbaserade injekteringsmedel, som är mer känsligt för små förändringar än konventionella cementbaserade injekteringsmedel. Den troliga huvudorsaken är att låg pH cementbaserade injekteringsmedel består av tre huvudkomponenter, dvs vatten, cement och silica-slurry, jämför med normalt två huvudkomponenter, dvs vatten och cement.

5 Injekteringsstrategi för Kärnbränsleförvaret

I de följande avsnitten beskrivs en injekteringsstrategi för förinjektering i Kärnbränsleförvaret i Forsmark enligt nedan:

- De platsspecifika förhållandena för injekteringen, det vill säga typmiljöer och zontyper, som injektering ska utföras i, se avsnitt 5.1.
- De allmänna förutsättningarna såsom anläggningsbeskrivning samt inläckagekrav inför upprättande av basdesignen, se avsnitt 5.2.
- Projekteringssteg av basdesign och analys av injekteringsparametrar som ingår i injekteringsklasser, se avsnitt 5.3.
- Metodik för verifiering av de platsspecifika förhållandena och injekteringsdesignen, se avsnitt 5.4.
- Krav på utförande och utrustning, se avsnitt 5.5.

5.1 Platsspecifika förhållanden

På förvarsnivå, dvs djup > 400 m, beskrivs i platsmodellen att bergmassan har få vattenförande strukturer, en sprickfrekvens på $0,005 \text{ m}^{-1}$ (SKB 2009). Den genomsnittliga hydrauliska konduktiviteten ($''\Sigma T/L''$) inom denna bergvolym beskrivs till $6,3 \times 10^{-11} \text{ m/s}$, vilket baseras på summa transmissiviteten ($''\Sigma T''$) från utförda bormeter undersökningshål ($''L''$) inom volymen (Brantberger och Janson 2009). I bergmassan förekommer även spridda deformationszoner med varierande vattenföring (SKB 2009).

För att beskriva förekomsten av enstaka vattenförande strukturer inom en bergvolym inför injekteringen, har dessa preliminärt kategoriserats i sex typmiljöer och två typzoner. Denna kategorisering är baserad på de geologiska beskrivningarna, se Stephens et al. (2007) och Stephens och Simeonov (2015), och de hydrogeologiska beskrivningarna, se Follin (2008). Typmiljöerna och typzonernas beskrivning och kategorisering är preliminär och kan förändras med ökad platsförståelse inom förvarsområdet.

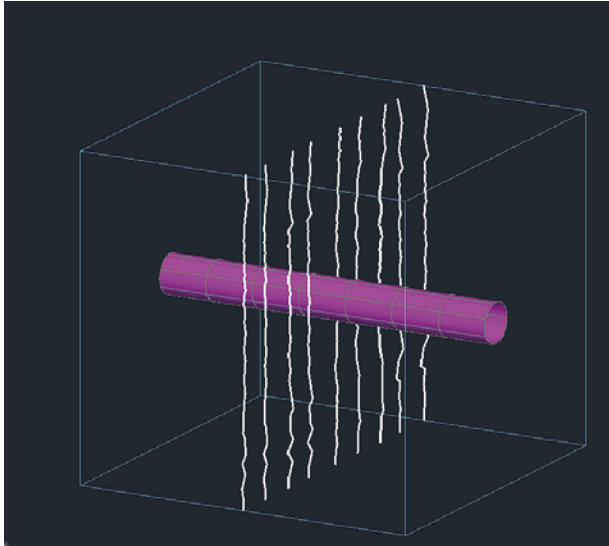
För typmiljöernas antas en bergvolym på $20 \times 40 \times 40 \text{ m}^3$ längs en tunnel, dvs djupet (20 m) samt höjd och bredd ($40 \times 40 \text{ m}^2$), och motsvarar en normal injekteringskärm samt avstånd mellan två deponeringstunnlar.

Typmiljö 0: innebär att bergvolymen saknar vattenförande strukturer eller att dess vattenförande strukturer ger ett obetydligt inläckage. Denna miljö förväntas vara den dominerande på förvarsnivå och innebär inget injekteringsbehov.

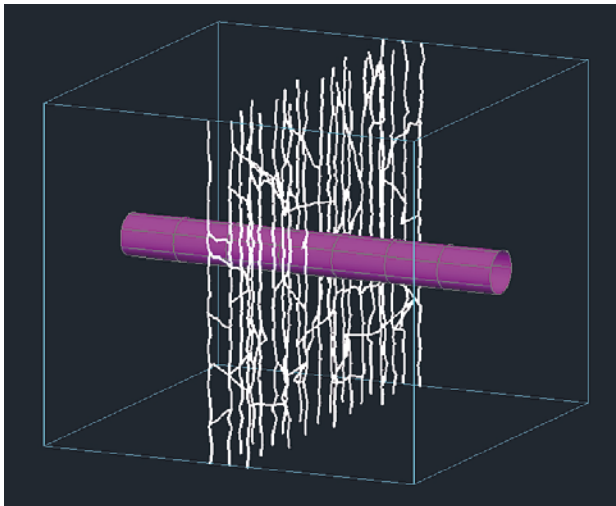
Typmiljö I: innebär en vertikal nordostlig till sydvästlig sprickstruktur, med i huvudsak enstaka flödeskanaler, och dessa träffar deponeringstunnlarna ungefär vinkelrätt, se figur 5-1. Inläckage inom bergvolymen till tunneln förväntas vara ca 0,4–2 l/min, dvs baserat på en antagen transmissivitet mellan ca 2×10^{-8} och $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Typmiljö II: innebär enstaka vertikal nordostlig till sydvästlig sprickstruktur inom en avgränsad bredd på 1–5 m, med i huvudsak flödeskanaler, och dessa träffar deponeringstunnlarna ungefär vinkelrätt, se figur 5-2. Inläckage inom bergvolymen till tunneln förväntas vara ca 1–10 l/min, dvs baserat på en antagen transmissivitet mellan ca 1×10^{-7} och $5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

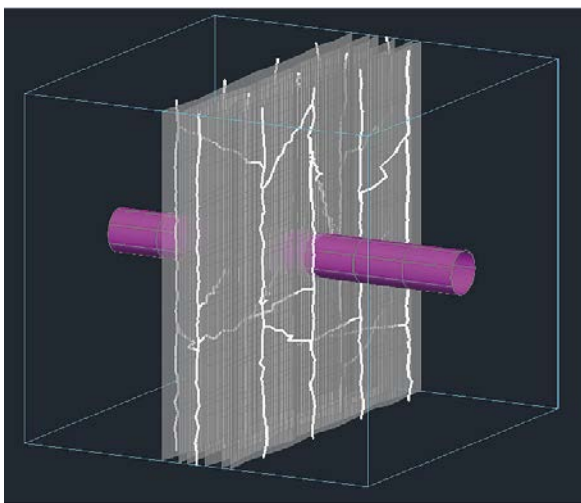
Typmiljö III: innebär vertikal nordostlig till sydvästlig sprickstruktur inom en bredd på 5–10 m med en kombination av flödeskanaler och -plan samt träffar deponeringstunnlarna ungefär vinkelrätt, se figur 5-3. Inläckage inom bergvolymen till tunneln förväntas vara ca 5–20 l/min, dvs baserat på en antagen transmissivitet mellan ca 5×10^{-7} och $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.



Figur 5-1. Typmiljö I och som träffar en schematisk deponeringstunnel vinkelrätt.



Figur 5-2. Typmiljö II och som träffar en schematisk deponeringstunnel vinkelrätt.

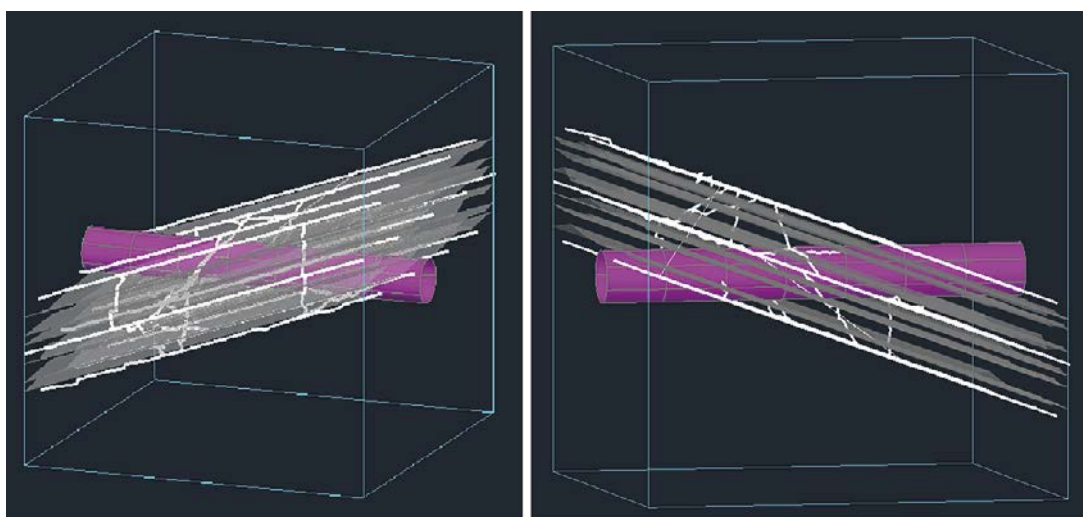


Figur 5-3. Typmiljö III och som träffar en schematisk deponeringstunnel vinkelrätt.

Typmiljö IV och V: innebär en öppen flack (ca 20 grader från horisontalen) sprickstruktur inom en bredd på 5–10 m. Typmiljö IV gäller då strukturen följer drivningsriktning (sprickan identifieras först i botten och har följt med under), se figur 5-4. Om strukturen istället möter drivningsriktningen (sprickan identifieras först i taket och kommer in i tunneln vartefter drivningen sker) fås typmiljö V, se figur 5-4. Inläckage inom bergvolymen till tunneln förväntas vara ca 15–30 l/min, dvs baserat på en antagen transmissivitet på ca $1-2 \times 10^{-6}$ m²/s.

I de beskrivna typmiljöerna kan enstaka vattenförande deformationszoner förekomma. Då underlaget för de spridda deformationszoners hydrauliska egenskaper är begränsat till enstaka mätningar görs därför en preliminär indelning i två typer av deformationszoner beroende på vattenförning. Vattenföringen för deformationszoner anges i transmissivitetet med varierande zonbredder. Indelningen av zontyper görs därför efter storleken på dess transmissivitet. Deformationszoner med lägre transmissivitet än 1×10^{-7} m²/s (< 2,5 l/min, zon), benämns som zontyp A, och zoner större än 1×10^{-7} m²/s (> 2,5 l/min, zon), benämns som zontyp B.

Ovanstående preliminära typmiljöer och zontyper är de som i dagsläget har generaliserats från de geologiska och hydrogeologiska beskrivningarna. Utöver dessa kan det förväntas att även andra hydrogeologiska sprickstrukturer förekommer, exempelvis sprickor med andra stupningar. Vidare kan inom samma volym (skärmlängd) flera olika sprickstrukturer förekomma, exempelvis de mer flacka (IV eller V) i kombination av de vertikala (I, II eller III). Identifiering av typmiljöerna och zoner kan bli svåra att särskilja, speciellt mellan typmiljö II, III och zoner med de lägre värdena på transmissivitet.



Figur 5-4. Typmiljö IV eller V, beroende på tunneldrivningsriktning i förhållande till strukturen, vänster bild typmiljö IV och höger bild typmiljö V.

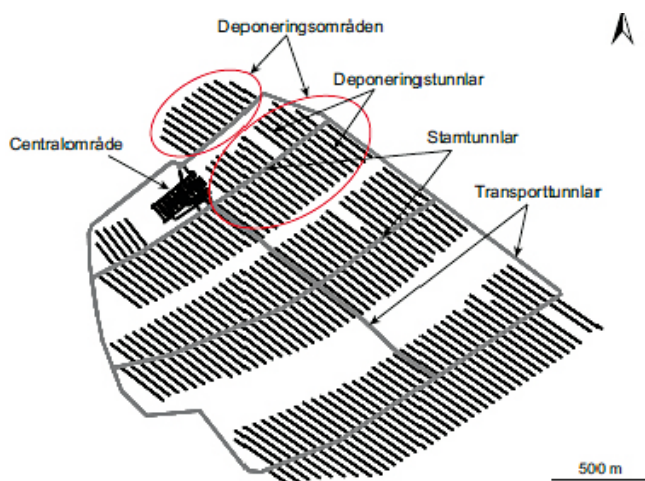
5.2 Allmänna förutsättningar

I detta avsnitt görs en beskrivning av de gällande förutsättningar för att beskriva förinjekteringens design och utförande.

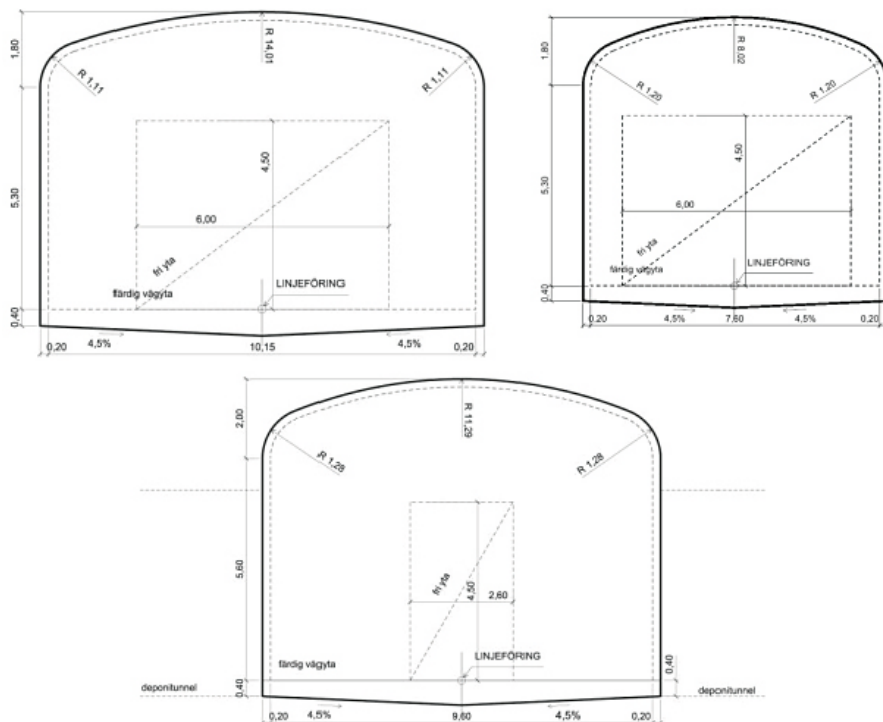
5.2.1 Anläggning

I området för förvaret så finns ett centralområde och ett antal deponeringsområden. I deponeringsområdena finns förutom deponeringstunnlarna ett antal stamtunnlar och transporttunnlar, se figur 5-5. De olika anläggningsdelarna innehåller olika krav och geometriska förutsättningar enligt Referensutformning PSAR.

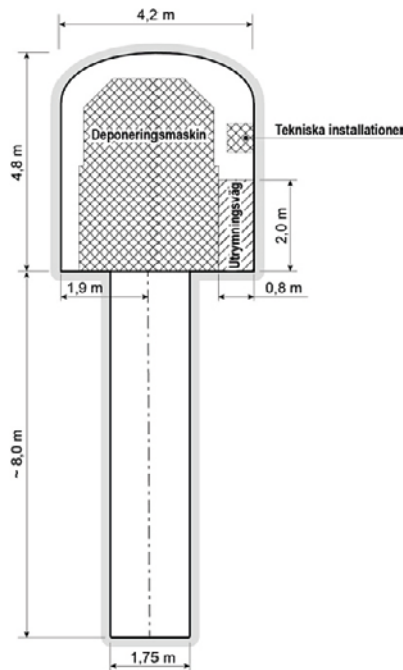
Stamtunnlarna, transporttunnlarna och deponeringstunnlarnas geometri visas i figur 5-6 och 5-7.



Figur 5-5. Området för förvaret med deponeringsområden innehållande stam- och transporttunnlar samt deponeringstunnlar (SKB 2016).



Figur 5-6. Tvärsnitt centra- och yttre transporttunnel (översta figurerna) och stamtunnel (undre figuren) enligt Referensutformning PSAR.



Figur 5-7. Tvärsnitt av deponeringstunnel med deponeringshålet i botten enligt Referensutformning PSAR.

5.2.2 Inläckagekrav

Målet med injekteringsdesignen i deponeringstunnlarna är att beskriva ett injekteringsutförande så att tunnlar under 5 år ska ha ett reducerat inläckage så att följande arbeten kan göras utan problem med vatten, enligt Koskinen (2017):

- Avjämna tunnelbotten.
- Borra deponeringshål.
- Såga slitsar i deponeringshålen.
- Installera buffert och kapslar.
- Återfylla tunneln.
- Installera tunnelpluggen.

Grundvatteninflödet till deponeringstunneln ska begränsas så att återfyllningsinstallation kan utföras. Krav för uppmätt inflöde till en deponeringstunnel styrs utifrån vilka vattenhanteringsmetoder som kan användas vid återfyllningsinstallation (Koskinen 2017). Den längdskalan som i huvudsak beskrivs för vattenhanteringsmetoder är en tunnellängd på 6 meter med följande kriterier och åtgärder:

- $Q < 0,25$ l/min per 6 meter innebär inga specifika åtgärder.
- $Q = 0,25-1,0$ l/min per 6 meter innebär åtgärder med hjälp av geotextil.
- $Q > 1,0$ l/min per 6 meter innebär dränering eller lagring av inflödet.

Ovanstående kriterier innebär att samtliga typmiljöer med förväntat läckage, dvs typmiljö I till V, och båda zontyperna kommer att behöva injekteras i deponeringstunnlarna för att undvika åtgärder. Om kriteriet 0,25 l/min per 6 m inte kommer klaras med injektering finns dock åtgärder, beroende på inflödets storlek, för att klara de installationsarbetena utan problem med vatten.

För stam- och transporttunnlar är inläckagekravet 10 l/min per 100 meter tunnel och med en teknisk livslängd på 100 år (SKB 2009). Vidare finns ett krav på en maximal hydraulisk konduktivitet kring tunnlar på 1×10^{-8} m/s men högre värden kan accepteras vid passage av deformationszoner med hög transmissivitet (SKB 2010). Detta innebär att injekteringsbehovet i stam- och transporttunnlar kommer att påverkas av antalet och vilka typmiljöer/zoner som prognoserats inför dess tunneldrivning.

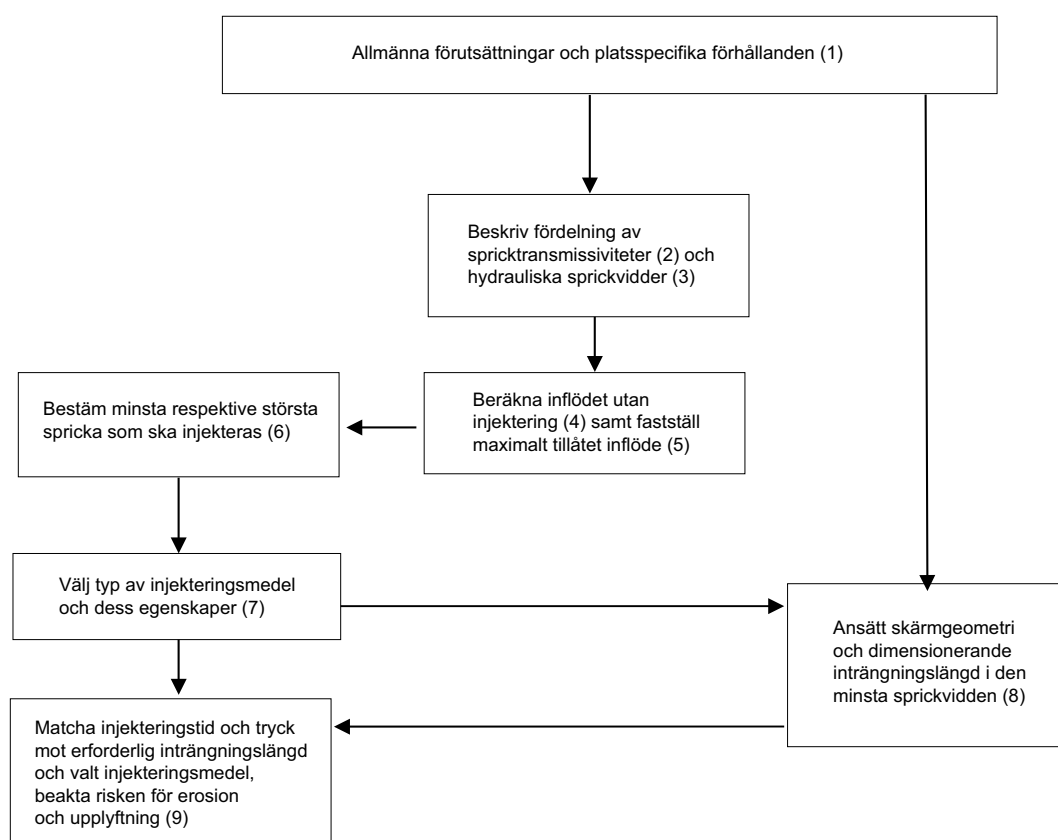
5.3 Projekteringssteg av basdesign

I avsnittet beskrivs en föreslagna projekteringssteg av basdesignen med analys av följande injekteringsparametrar:

- Injekteringsmedel, typ och egenskaper.
- Skärmgeometri (hålavstånd, längd och överlapp).
- Injekteringstid.
- Injekteringsövertryck.

Då både bergmassans vattenförande egenskaper och injekteringsens spridning är svår att förutsäga ska basdesignen anpassas till observationsmetoden, se Eurokod EN-1997-1:2004 kapitel 2.7. Vilket i korthet innebär att basdesignen ska verifieras och/eller åtgärdas samt detaljeras vartefter ny information och observationer fås. Tillämpning av observationsmetoden beskrivs i avsnitt 5.4.

Flödet för projekteringsstegen visas schematiskt i figur 5-8 och motsvarar figur 3-2 i avsnitt 3.3.



Figur 5-8. Flödesschema för att upprätta injekteringsdesign, baserad på allmänna förutsättningar och platsspecifika förhållanden i Forsmark, modifierad från Funehag och Emmelin (2011). Designen ska därefter verifieras eller justeras vartefter ny information eller observationer fås.

I det följande beskrivs de olika stegen (1 till 9) i figur 5-8.

Beskrivning Steg 1:

Basdesignen görs utifrån de platsspecifika förhållandena, se avsnitt 5.1, där prognosticerade typmiljöer och zontyper beskrivs och allmänna förutsättningar, se avsnitt 5.2.

Inför drivning av alla tunnlar görs borrning av långa undersökningshål där olika undersökningar ska göras (SKB 2016). De undersökningar som ska göras är bland annat underlag till de platsspecifika förhållandena för injektering och injekteringsdesignen. Då anläggningen består av många intilliggande tunnlar ska även erfarenheterna och resultat från tidigare tunneldrivning användas som underlag.

Beskrivning steg 2 och 3:

Fördelningen av spricktransmissivitet och hydrauliska sprickvidder, baserad på mätdata från hydrauliska tester och sprickdata från borrhål. Det rekommenderade sättet är att beskriva och bearbeta en sådan datamängd är med en statistisk kontinuerlig fördelning kallad Paretofördelningen, se Gustafson (2009) och exempel på fördelning i figur 5-9. De två huvudsakliga indatan är:

- Antalet sprickor längs borrhålet.
- Intervalltransmissiviteter utvärderade från sektionsvisa hydrauliska tester i borrhål.

I dagsläget saknas underlag för att kunna upprätta en fördelning av spricktransmissivitet och hydrauliska sprickvidder på förvarnsnivå.

Beskrivning steg 4 och 5:

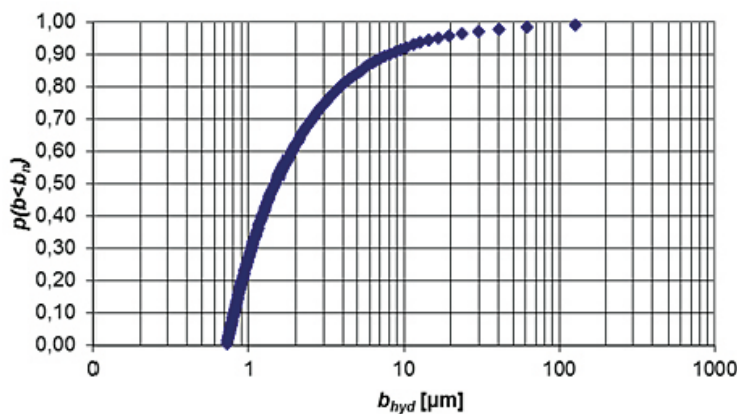
Beräkning av inflödet (q) till en oinjekterad tunneldel, på djupet H och med tunnelradien r , uppskattas genom (Gustafson 2009):

$$q = \frac{2\pi T_{\text{tot}} H / L}{\ln(2H/r) + \xi} \quad (5-1)$$

då bergmassans konduktivitet (K) är lika med T_{tot} dividerat med L , där T_{tot} är den summerade transmissiviteten som fås från de hydrauliska testerna i borrhål genom tunneldelen med längden L och ξ är skinfaktorn.

Då spricktransmissivitetsfördelningar är upprättade enligt steg 2 och 3 beräknas inflödet med hjälp av fördelningarna.

De maximala tillåtna inflödena anges med inläckagekriterierna, se avsnitt 5.2.2.



Figur 5-9. Exempel på sprickvidder med Pareto-fördelning.

Beskrivning steg 6:

Kriteriet ”minsta hydrauliska sprickvidd som ska injekteras” baseras på sprickviddsfördelning och maximalt tillåtet inflöde per 20 m. Likaså fås den största sprickvidden från sprickviddsfördelningen enligt den statistiska Paretofördelningen.

Den minsta sprickvidden som ska injekteras blir ofta låg (< 10 mm) med parametrarna sprickviddsfördelning och maximalt tillåtet inflöde per 20 m (Funehag och Emmelin 2011). En orsak till den låga sprickvidden är maxinflödet som är strikt ansatt och innebär inga variationer inom skärmen trots att inflödet i skärmen är ett totalvärde av flöden i flera sprickor/kanaler. Om definitionen på ”hål med inget läckage” ansätts här till ett inflöde mindre än 0,1 l/min motsvarar det en hydraulisk sprickvidd på ca 15 µm eller 20 µm, beroende på vattentryck (450 respektive 300 m).

Den hydrauliska sprickvidden (b_{hyd}) används normalt för att relatera till möjlig inträngningsförmåga då den kan uppskattas genom hydrauliska tester inför injekteringen. Analyser av injekterade sprickvidder (b_g) baserad på utförda injekteringar finns gjorda i tidigare projekt. Vid en jämförelse mellan injekterad sprickvidd och hydraulisk sprickvidd från hydrauliska tester fås att kvoten mellan injekterad och hydraulisk sprickvidd varierar i huvudsak mellan ca 1 till 3 och med ett medelvärde och median ofta kring 2. Detta innebär att den hydrauliska sprickvidden är konservativ och den minsta sprickvidden som behöver injekteras kan ansättas något högre.

Summering: ”minsta hydrauliska sprickvidd som ska injekteras” tas fram genom sprickviddsfördelning beskriven med Paretofördelning, men ansätts inte lägre än ca 20 µm av praktiska skäl.

Beskrivning steg 7:

De injekteringsmedel som ska användas är antingen ett cementbaserat med lågt pH (< 11) eller en lösning med ytterst fina silikatpartiklar, dvs kolloidal silica (silca sol). Valet av injekteringsmedel ska optimeras mot de olika resultaten från projekteringsstegen.

För de cementbaserade injekteringsmedlen har tre alternativ, med olika tekniska egenskaper, föreslagits enligt tabell 5-1. De redovisade värdena i tabell 5-1 baseras på resultat och rekommendationer från tidigare projekt med lågt pH, se referenser i avsnitt Andersson och Eng (2005), Sievänen et al. (2006), Brantberger och Janson (2009), Funehag och Emmelin (2011), Olofsson et al. (2014) och Johansson et al. (2015).

Tabell 5-1. Föreslagna cementbaserade injekteringsmedel med rekommenderade värden på de tekniska egenskaperna.

Cementbaserat injekterings-medel	Strömningsegenskaper		Inträngningsförmåga		Gelning/tillstyvnad, dvs skjuvhållfasthet efter 4 timmar (kPa)
	Flytgräns* (Pa)	Viskositet (mPas)	b_{min} (µm)	b_{krit} (µm)	
Typ I	10–13	20–30	ca 40	< 100	ca 1,0
Typ II	2–5	10–15	ca 30	-**	ca 0,5
Typ III	> 12	25–35	-**	ca 100	ca 1,0

*Värdena för flytgränsen är generellt höga mot de vanligtvis redovisade värdena men har erhållits vid olika tillfällen.

**Inget specifikt krav finns.

Dessa tekniska egenskaper ska verifieras för de olika injekteringsmedlen och dess recept genom egenskapsprovning före injekteringsarbetena startar. Därefter görs löpande provning under injekteringsarbetena för att verifiera egenskaperna under arbetet. De olika provningsmetoderna som används i branschen är indirekta metoder och saknar i flera fall standarder men de metoderna och standarder/beskrivningar som rekommenderades inledningsvis är:

Laborationsmetoder:

- Strömningsegenskaperna, som inledningsvis mäts med rheometer på laboratorium enligt Bighammodellen (DIN 53019).
- Inträngningsförmågan, som bestäms på laboratorium med filterpress, beskrivs i Eriksson och Stille (2005).
- Skjuvhållfastheten med fallkon (SS-027125).

Laborationsmetoderna görs före injekteringsarbetena startar men under fältmässiga förhållanden.

Fältmetoder:

- Yield-stick, beskrivs i Axelsson och Gustafson (2006).
- Marshkon, som beskrivs i Eriksson och Stille (2005).
- Mud-balance, densitetmätningar enligt (ISO 10414).
- Filterpumpsmätningar (SS-EN 14497:2004).

Fältmetoderna ska först göras parallellt och samtidigt med laborationsmetoderna för att få referensvärden på egenskaperna inför den löpande provningen. Därefter görs fältmetoderna under den löpande provningen, i olika omfattning.

Den tekniska egenskap som främst används vid injekteringsdesignen av kolloidal silica är geltiden. Geltiden, dvs när gelningen startar och inträngningen avstannar, beror av mängden tillsatsmedel som startar partikelbindningarna. Tillsatsmedlet är en saltlösning och ju mer saltlösning som tillsätts desto kortare geltid.

För injekteringsutförandet med kolloidal silica (silica sol) är det väsentligt att känna till att när gelningen börjar accelerera så sker en kraftig tillväxt av skjuvhållfasthet. Detta innebär att kvarvarande injekteringsmedel i utrustningen måste avlägsnas. I dagsläget görs en blandning för varje separat injekteringshål och mängden som blandas måste optimeras på plats så att inte för lite volym blandas eller att för mycket av blandningen går till spillo.

De tekniska egenskaper som ska förprovas inför injekteringen med silica sol är viskositeten, som bestäms genom mätning med rheometer. Värdet på viskositeten ska initialt vara i storleksordningen 5 mPas för att sedan accelerera upp vid den uppsatta gelinduktionstiden (Funehag 2011).

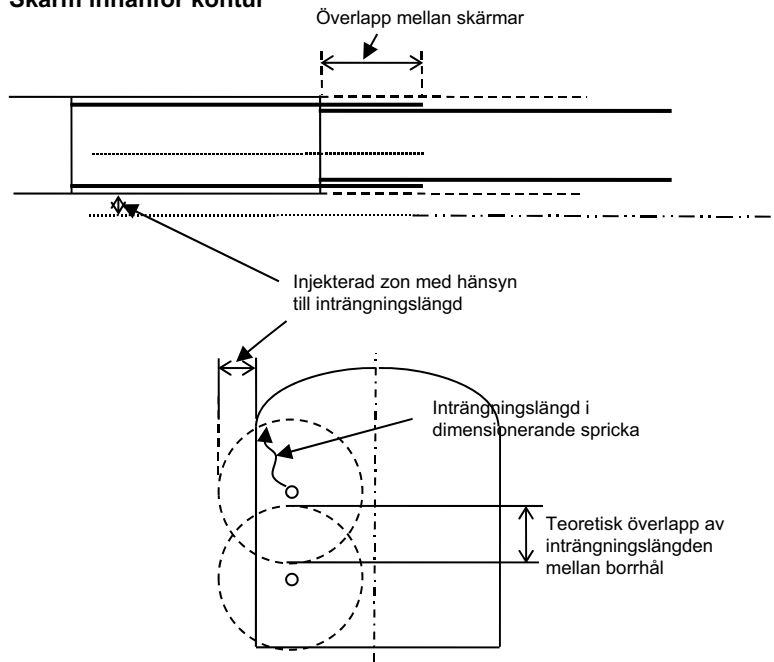
Under injekteringen görs löpande provning på geltiden genom kopprov, dvs blandningen hålls upp i en kopp och geltiden kontrolleras genom att blandningen ska vara kvar i koppen när den tippas 90 grader. Slutligen ska alltid temperaturen kontrolleras vid provningarna.

Beskrivning steg 8:

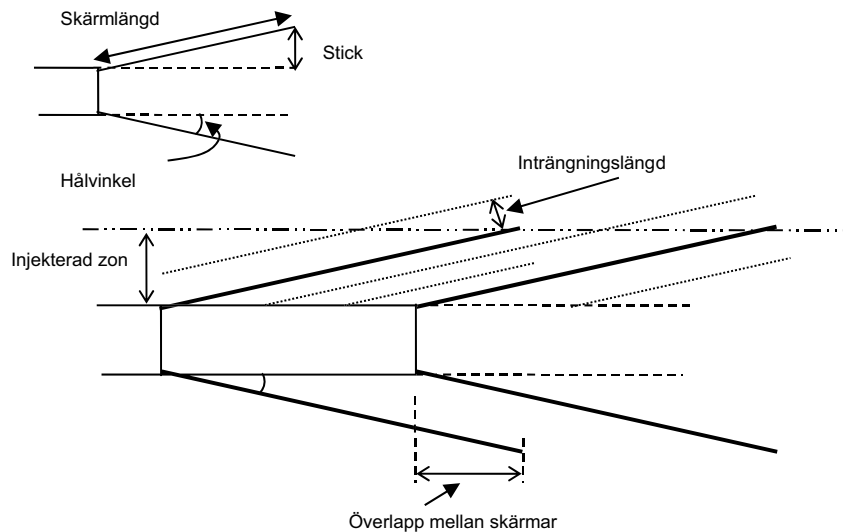
Design av skärmgeometrin är en del av arbetet för att ska skapa en injekterad zon runt tunneln där genomsläppligheten för grundvattnet är lägre än det omgivande berget. För detta behövs inträngningslängden i minsta hydrauliska sprickvidd som ska injekteras, se steg 6. Inträngningen ska nå ut en viss längd från borrhålet, dels ut från tunneln (injekterad zon) och dels överlappa mellan borrhål, se figur 5-10.

För att reducera inläckaget behövs en injekterad zon utanför tunneln. Vilken reduktion som uppnås beror dels på den injekterade zonen tjocklek och nödvändig reduceringsgrad, dvs förhållande mellan ursprunglig och injekterad genomsläpplighet. Zonen tjocklek påverkas av förstärkningens bultlängd. Bultarna kan tränga genom den injekterade zonen om zonen tjocklek är för liten i förhållande till bultlängd och en läckageväg skapas.

Skärm innanför kontur



Skärm utanför kontur

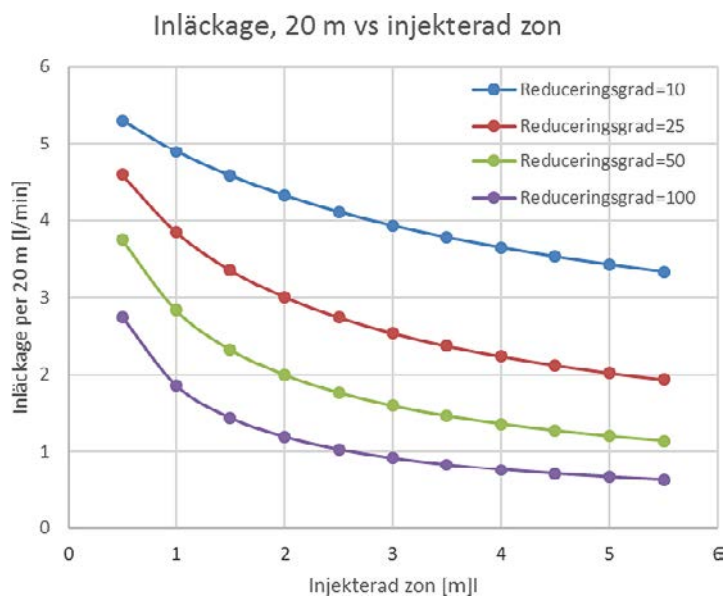


Figur 5-10. Definitioner av skärmgeometrin, modifierad från Funehag och Emmelin (2011).

I figur 5-11 redovisas inläckaget efter injekteringen beroende på den injekterade zonen tjocklek och reduceringsgrad vid det oinjekterade inflödet på ca 6 l/min, 20 m med en konduktivitet på 2×10^{-8} m/s vid ett vattentryck på 400 m.

Figur 5-11 visar att reduceringsgraden i deponeringstunneln bör vara minst 50 och att den injekterade zonen effekt "planar ut" efter 3–4 m utbredning. Bultförstärkningen som föreslagits i tunnelarna är i huvudsak selektiv bultning med bultlängd 3 m. Både reduceringsgraden och bultlängden ger ett designkriterium för den injekterade zonen i deponeringstunneln på minst 3 m. Motsvarande designkriterium för stam- och transportunnelar är 4 m då tunnelradien är större samt att den dimensionerande sprickvidden kommer vara större då högre totalinläckage accepteras i dessa tunnelar.

Vidare ska det säkerställas att överlappet av inträngningslängden mellan borrhål uppfylls. Överlappet mellan två injekteringshål ska vara minst 50 %.



Figur 5-11. Inläckage (l/min) per 20 m som funktion av tätad zon i deponeringstunnel. Det oinjekterade inläckaget är ca 6 l/min per 20 m tunnel.

För injekteringshål utanför tunnelkontur ska kriterier på injekterad zon (3 eller 4 m) uppfyllas med geometriska parametrar såsom skärmlängd, stick samt eventuellt överlapp mellan skärmar se figur 5-10 samt inträngning. Därmed blir kontrollen mot ”överlapp mellan borrhål” i huvudsak dimensionerande för injekteringshål utanför tunnelkontur beroende på skärmens geometrier. För injekteringshål eventuellt enbart innanför tunnelkontur blir däremot kontrollen att injekterad zon uppfylls normalt dimensionerande. Detta eftersom kriteriet ”överlapp mellan borrhål” blir normalt kortare än 3 eller 4 m.

Beslut om slutlig injektering görs från resultat i sonderingshål. Sonderingshål utförs inför en prognoserad typmiljö eller typzon, baserat på undersökningar i pilothål eller annan information såsom intilliggande tunnel. Antalet sonderingshål uppskattas med hjälp av en sannolikhetsbaserad metod (Engström et al. 2009). Metoden baseras på resultat från vattenförlustmätningar i sonderingshål och hur man statistiskt kan avgöra om förinjektering behövs eller ej.

Rekommendationen är att 4 till 6 st sonderingshål alltid borrar i stufv vid prognosticerade typmiljö II–V eller typzoner beroende på tunnelns storlek. Sonderingshålen kommer därefter att användas som injekteringshål i stufven, dvs så kallade stufvhål vid en eventuell injektering. För prognostiserad typmiljö I bestäms antalet sonderingshål beroende på synlig sprickstruktur.

En preliminär skärmgeometri per typmiljö och typzon har ansatts i tabell 5-2. Inledande skärm i stam- och transporttunnlar ska följas av minst två efterföljande skärmar för att säkerställa att flödet inte flyttas framåt i drivningsriktningen. Motsvarande krav i deponeringstunnlar får bedömas från fall till fall och mest aktuell för typmiljö IV och V.

Tabell 5-2. Preliminär skärmgeometri för respektive typmiljö och typzon.

Typ- miljö	Allmänt	Antal sonderingshål	Borrhåls- längd	Stick, avstånd mellan tunnel- kontur och hålspets	Slutligt hål- avstånd	Ca antal injekterings-hål	Överlapp mellan skärmar
I	Deponering: Anpassad skärm	Anpassade	20 m	Bestäms inför borrning	Bestäms inför borrning	Riktlinje: Omgång 1 13 st	4 m
	Stam- och transport: Anpassad skärm	Anpassade	20–25 m			Riktlinje: Transport: Omgång 1 18 st Stam: Omgång 1 19 st	5 m
II + zon typ A	Deponering: Gles skärm	4 (stuffhål)	20 m	5 m	ca 2,5 m	Omgång 1 12 + 4 st Omgång 2 12 st	4 m
	Stam- och transport: Gles skärm	4 (stuffhål) i transporttunnel) 6 (stuffhål i stamtunnel)	20–25 m	6 m		Transport: Omgång 1 18 + 4 st Omgång 2 18 st Stam: Omgång 1 19 + 6 st Omgång 2 19 st	5 m
III + zon typ B	Deponering: Tät skärm	6 (4 stuffhål)	20 m och 22 m	5 m och 8 m	ca 1 m	Omgång 1 23 + 4 st Omgång 2 23 st	4 m
	Stam- och transport: Tät skärm	4 (stuffhål) i transporttunnel) 6 (stuffhål i stamtunnel)	20–25 m	6 m		Transport: Omgång 1 34 + 4 st Omgång 2 34 st Stam: Omgång 1 36 + 6 Omgång 2 36	5 m
IV + V	Deponering: Anpassad skärm, koncentrerad i botten (IV) eller tak (V)	6 (2 stuffhål)	21	6–7 m	ca 2 m	Omgång 1 11 + 4 st Omgång 2 10 st	3 m
	Stam- och transport: Anpassad skärm, koncentrerad i botten (IV) eller tak (V)	4 i transport- tunnel 6 i stamtunnel	20–25 m			Transport: Omgång 1 17 + 4 st Omgång 2 16 st Stam: Omgång 1 18 + 6 st Omgång 2 17	5 m

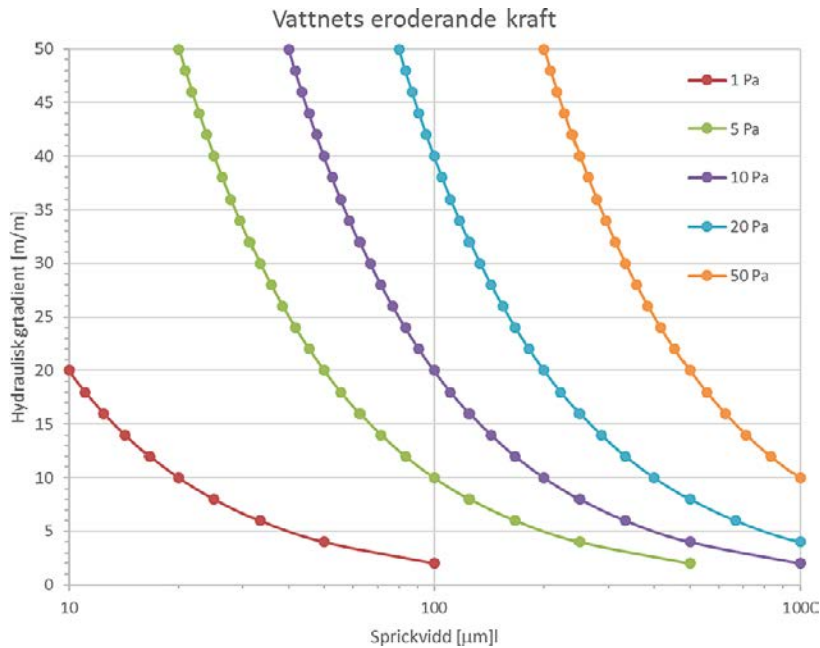
Beskrivning steg 9:

Steg 9 innebär att injekteringstid och -tryck ska matchas mot erforderlig inträngningslängd och valt injekteringsmedel samt att beakta risken för erosion. Val av injekteringsmedel framgår av steg 7 och erforderlig inträngningslängd i steg 8.

Injekteringsövertrycket (p) dimensioneras mot grundvattentrycket och risken för upplyftning av befintliga sprickor. Dimensioneringen mot grundvattentrycket beror på injekteringsmedlets egenskaper, sprickvidd samt inträngning och tryckpåverkan men ansätts inledningsvis till dubbla grundvattentrycket.

Grundvattentrycket antas till mellan 350 och 450 m, därmed fås ett injekteringsövertryck på 7,0 till 9,0 MPa och ett totalövertryck på 10,5 till 13,5 MPa. Ett högre injekteringsövertryck väljs vid cementinjektering jämfört med injektering av silica sol för att kunna optimera designen. Därför väljs inledningsvis det högre värdet (9,0 MPa) vid cementinjektering och det lägre (7,0 MPa) vid injektering med silica sol.

Sannolikheten för upplyftning beror på rådande spänningssituationer, bergets deformationsegenskaper och geometrier men även på tryckytan för injekteringsmedlets, dvs ytan av injekteringsmedlet som injekteringsövertrycket (spänningen) kan verka över. Med förhållandena som gäller, dvs stort djup och begränsad spridning av injekteringsmedlen, så blir sannolikheten för upplyftning liten vid förinjektering i Forsmark.



Figur 5-13. Vattnets eroderande kraft som funktion av grundvattengradient, modifierad från Axelsson (2009).

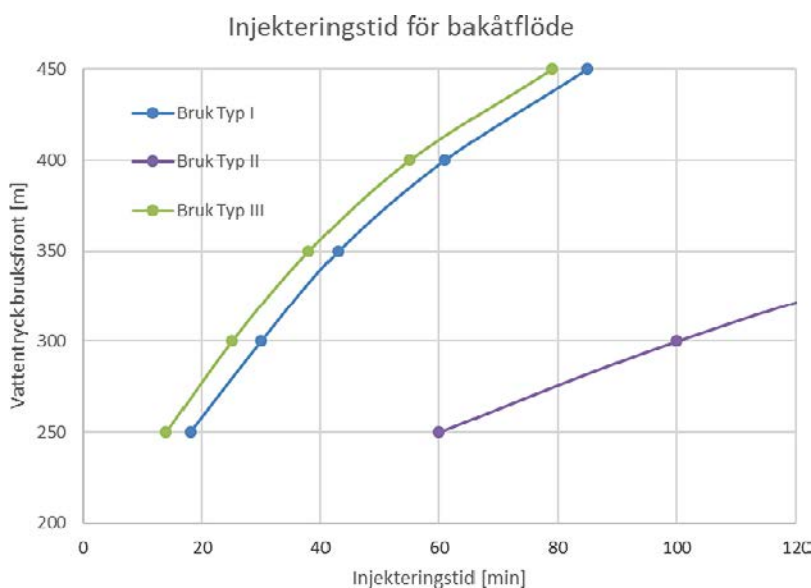
Vidare kan vattentrycket, p_w , orsaka ett bakåtlöde på injekteringen (Axelsson 2009). Detta förhindras genom en tillräcklig inträngning, I_D , och injekteringsövertryck, Δp , och uttrycks enligt sambandet:

$$I_D > p_w / \Delta p \quad (5-2)$$

Om inte en tillräcklig inträngning uppnås behöver exempelvis injekteringstiden ökas.

För de olika injekteringsmedlen, enligt Tabell 5-1, med injekteringsövertrycket 9,0 MPa och varierat grundvattentryck fås injekteringstider enligt figur 5-14.

Kriteriet "bakåtlöde" blir därmed dimensionerade för injekteringstiden vid injekteringen med cement-baserade injekteringsmedel. Av ovanstående ges att kännedom om grundvattentrycket inom området för injekteringen blir väsentlig för att optimera injekteringstiden.



Figur 5-14. Injekteringstider för villkoret bakåtlöde beroende av grundvattentrycket vid injekteringsmedlets front och dess egenskaper.

Injekteringsmedlet silica sol:

Inträngningen i sprickor med silica sol baseras på att blandningen endast har en viskositet och ingen flytgräns. Vid ett 2D-flöde fås inträngningslängden ($I_{\max, 2D}$) enligt Funehag (2011) följande:

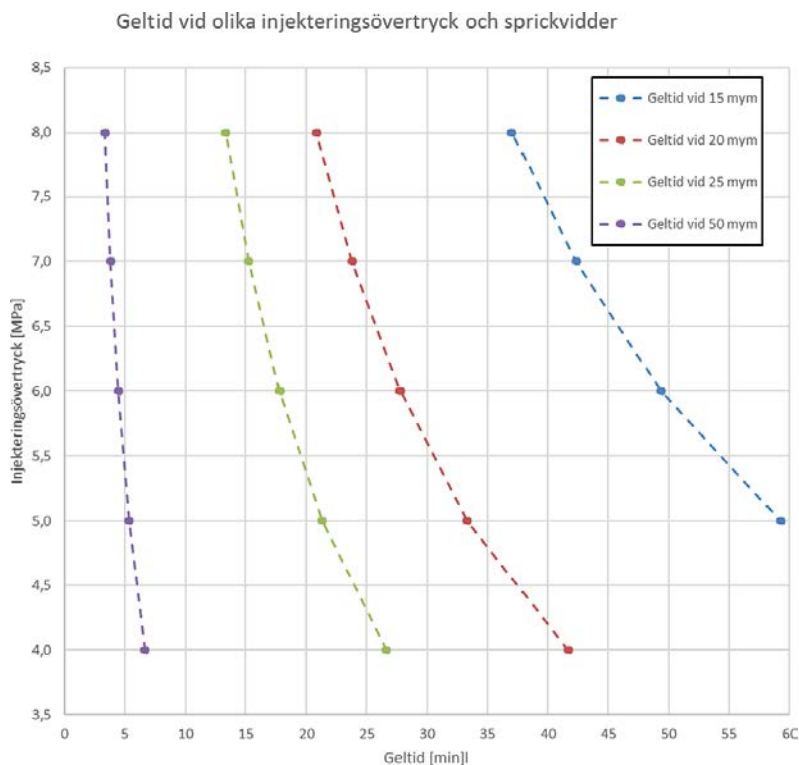
$$I_{\max, 2-D} = 0.45 \cdot b \cdot \sqrt{\frac{\Delta p t_G}{6\mu_0}} \quad (5-3)$$

Där b är kritiska sprickvidden, Δp injekteringsövertryck, t_G är gelinduktionstiden och μ_0 är silica solens initiala viskositet.

Den kritiska sprickvidden sätts till 20 μm och initiala viskositeten till 5 mPas, se steg (6) och (7). Ur sambandet kan därmed gelinduktionstiden och injekteringsövertrycket bestämmas för att uppfylla kriterierna för inträngningslängd.

Vid ytliga förhållanden, dvs djupet < 100–150 m, ska medlets geltid vara ca tre gånger längre än gelinduktionstiden (Funehag 2011). Injekteringstiden vid dessa förhållanden ska vara ca halva geltiden vid fullt injekteringsövertryck. Vid större djup än 150 m är risken större för erosion och injekteringstiden bör vara längre än halva geltiden (Funehag och Emmelin 2011). Därför väljs injekteringstiden till 4/5 av geltiden enligt erfarenhet från tidigare projekt. Om temperaturskillnaden mellan berget och blandningsmiljön (tunnel) skiljer mer än 2 grader ska antingen blandningstemperaturen anpassas till bergets temperatur eller förhållandet mellan injekteringstiden och geltiden utredas.

I figur 5-15 redovisas geltider som silica solen ska uppfylla vid injektering, med varierade injekteringsövertryck och kritiska sprickvidder, för att uppnå en inträngning på 3 m.



Figur 5-15. Geltider beroende av injekteringsövertrycket och sprickvidd för att uppnå en inträngning på 3 m.

Summering av basdesignen

Typmiljöernas och typzonernas preliminärt valda injekteringsparametrar, dvs injekteringsmedel, tryck och tid, samt förväntade läckage för tunneln summeras i tabell 5-3.

Tabell 5-3. Val av injekteringsparametrar i tunnlar inom försvarsområdet vid respektive typmiljö och zontyp.

Typmiljö och zontyp	Inläckage, före, l/min per typmiljö/zon	Skärm-typ	Injekteringsmedel	Tryck, MPa	Tid, min	Inläckage efter, l/min per typmiljö/zon
I	< 2	Selektiv	Silica sol	6	27	< 0,5
II och zon typ A	1–10	Gles skärm	Typ I (stuff) + silica sol	9 (cement) och 6 (silica)	43 och 27	< 0,5
III och zon typ B	5–20	Tät skärm	Typ I (stuff) + typ II (Omgång 1) Silica sol (Omgång 2)	9 (cement) och 6 (silica)	43, 26 och 27	< 8 (Omgång 1) < 1 (Omgång 2)
IV och V	15–30	Selektiv i botten eller tak	Typ I (stuff) + typ II	9	43 och 26	< 6
I eller II	> 20	Planeras specifikt				
II till V eller zon	> 30	Planeras specifikt				
Slumpmiljö	> 5	Planeras specifikt				

5.4 Verifiering av platsförhållandena och injekteringsdesignen

Injekteringsens basdesign för Forsmark försvarsområde är baserad på de platsförhållande som ges i den platsbeskrivande modellen (SKB 2008). Under utbyggnaden kommer platsförhållandena kontinuerligt att uppdateras med platsspecifika undersökningar och tester för olika ämnesområden såsom geologi, geofysisk, hydrogeologi och hydrokemi (SKB 2016) för att verifiera de platsspecifika förhållandena i försvarsområdet.

En av de undersökningsmetoder som kommer att tillämpas är pilothålsborrning, dvs långa kärnborrhål inför tunneldrivningen. I dessa borrhål ska även undersökningsmetoder göras för att identifiera och verifiera de preliminära typmiljöer och typzoner och förutsättningarna för injekteringen kan bekräftas, se avsnitt 5.4.1.

Resultaten från undersökningarna i pilothålen samt erfarenheterna och resultat från tidigare tunneldrivning används för prognostisering av typmiljöer och typzoner. Inför de prognostiserade typmiljöerna och typzonerna ska en förberedelse och planering påbörjas för sonderingsborrning och förinjektering (SKB 2016). Sonderingshålen ger slutligen ett beslut om förinjektering.

Då den upprättade injekteringsdesignen innehåller osäkerheter i underlag och samband behövs ett iterativt arbetssätt för att optimera den injekteringsdesign som används vid utförandet. Då bergmassans vattenförande förmåga och injekteringsens spridning i bergmassan är svår att förutsäga ska den så kallade Observationsmetoden användas, se Eurokod EN-1997-1:2004, kapitel 2.7. Observationsmetoden är en metodik som lämpligtvis kan användas för att verifiera injekteringsdesignen då informationen om förhållandena successivt uppdateras. Vid tillämpningen av Observationsmetoden för att verifiera injekteringsdesignen behöver ett antal frågeställningar ställas inför injekteringsutförandet för att verifiera och optimera injekteringsdesignen:

- Är bergets förutsättningar, dvs geologiska och hydrogeologiska, beteendet det förväntade?
- Uppfylls inläckagekraven?
- Är injekteringen väl genomförd, dvs uppfyller utförandet det förväntade?
- Är injekteringsdesignen den optimala, dvs är val av bruk, tryck, tider och stoppkriterier de mest lämpliga?

Detta ger ett antal observationer och uppföljningar som ska göras under och efter injekteringen, se avsnitt 5.4.2 respektive avsnitt 5.4.3.

Injekteringsutförandet och injekteringsdesignen kommer vartefter behöva uppdateras då ny information och kunskap av platsförhållandena samt erfarenhet och resultat utförda injekteringar fås. De olika stegen inför, under och efter injekteringsutförandet beskrivs i avsnitt 5.4.4.

5.4.1 Undersökningar pilothål

Inför drivning av tunnarna görs pilothålsborrning. Borrningen av pilothålen i deponeringstunnlar är ca 300 m långt och görs i grupper om ca fem och sekventiellt (SKB 2016). Borrning av pilothål i stam- och transporttunnlar görs mer varierat med längder mellan 100 och 300 m samt beroende av den etappvisa utbyggnaden.

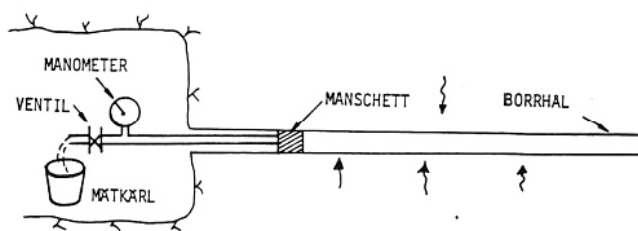
För pilotborrhål i deponeringsområden kommer standardiserade undersökningar göras för geologiska, geofysiska, hydrauliska och hydrokemiska tester (SKB 2016). De hydrauliska undersökningarna görs stegvis och med olika metoder och görs för att kunna uppskatta bergmassans hydrauliska egenskaper och konnektivitet samt ge underlag till den konceptuella hydrogeologiska modelleringen.

De hydrauliska undersökningarna påbörjas i samband med att pilothålet borrar då vattenflöde från borrhålet mäts i samband med kärnupptag. Vid uppehåll i borrningen, t ex över natten, ska hålet stängas och tryckuppbyggnad registreras med tryckgivare (manometer), se figur 5-16.

Då hela pilothålet är färdigställt (borrat) görs de standardiserade undersökningarna. Från de hydrauliska undersökningarna under borrningen och tidigare prognoser över typmiljöer och typzoner görs en uppdatering av typmiljöer och typzoner längs pilothålet. Därefter görs följande i pilothålen i samband med de standardiserade undersökningarna:

- Vid ett totalt pilothålsflöde på mindre än 2,5 l/min ska hydrauliska mätningar göras med en utrustning och metod som ger direkta resultat i form av transmissiviteten i intervallet 2×10^{-10} – 1×10^{-6} m²/s, i en mätsektioner mellan 3 till 6 meter. Vid mätsektioner med prognosticerade typmiljöer och typzoner ska även flöden inom en 0,2 meters sektion kunna identifieras.
- Vid ett totalt pilothålsflöde på större än 2,5 l/min ska hydrauliska mätningar göras med en utrustning och metod som ger direkta resultat i form av transmissiviteten i intervallet 1×10^{-9} – 1×10^{-4} m²/s, i en mätsektioner mellan 3 till 6 meter.

Förutom de hydrauliska undersökningarna behövs information om sprickegenskaper, såsom sprickfrekvensen av öppna sprickor längs borrhålen samt sprickorientering. Vidare ska kemiprovtagningen på kiselinnehåll och vattnets pH-värde tas i pilothålen. Kiselinnehållet och pH värdet behöver kontrolleras inför injekteringen.



Figur 5-16. Principillustration på mätning av inflödet och grundvattentrycket.

5.4.2 Observationer under injekteringen

Under injekteringsutförandet ska ett antal observationer, se tabell 5-4.

Tabell 5-4. Observationer under injekteringsutförandet.

Verifiera	Observation och kriterium	Möjlig orsak och eventuell åtgärd
Tillräcklig inträngning i kritisk spricka samt maximal spridning i största sprickan	Tryck-flödeskurva: – Långsamt flöde – Trycket erhålls inte inom X min Spridning närliggande tunnel	Berget, dvs högre hydraulisk konduktivitet än prognosticerats. Åtgärd: Upprepas detta ska de hydrogeologiska förutsättningarna uppdateras och därmed designen. Design, dvs för högt tryck och/eller medel med låga strömningsegenskaper i förhållande till sprickdimensioner. Åtgärd: Förutsättningarna i designen kollas (sprickvidder och grundvattentryck). Om det upprepas ska trycket sänkas och tiden ökas och/eller medel väljas med högre strömningsegenskaper. Utrustning, dvs kapaciteten (pump) är för låg. Åtgärd: Uppdatera utrustning inför nästa skärm. Beror av både förutsättningar och designval. Åtgärd: Sänka trycket och öka tiden.
Begränsad spridning/volym, dvs ansatt kriterium på ca X liter/hål innan tiden är uppnådd	Stor åtgång, dvs kriteriet överskridits.	För låga strömningsegenskaper på medlet i förhållande till sprickdimension. Åtgärd 1: Sänk trycket. Åtgärd 2: Ändra medlet vid nästa hål med motsvande flöden. Uppföljning: Om denna observation upprepas i flera hål ska medel med högre strömningsegenskaper väljas.
Medlets egenskaper	Löpande kontroller Avvikelse från specifikation	Dålig blandningsnoggrannhet. Åtgärd: Kontrollera utföranderutiner och manuell inmätning av tillsatser
Tillräcklig volym/spridning av bruk/medel i bergmassan för att uppnå ett reducerat inläckage	Olika läckage såsom: – Ytläckage (upphör inte efter x min) – Sambandshål (rena hål innan injektering) – Runt manschett i borrhål – Borrhålsansättningen	Läckage via spricksystem. Åtgärd 1: Täta ytläckaget och sänk trycket Åtgärd 2: Byt medel Åtgärd 3: Avsluta injekteringen efter dubbla injekteringstiden och borra ett kontrollhål intill. Samband mellan hål. Åtgärd: Injektera sambandshålen samtidigt. Kraftiga flöden, dvs utrustningen saknar kapacitet att injektera hålen samtidigt. Injektera ett hål i taget. Runt manschett. Åtgärd: justera manschettplacering och/eller byt manschetttyp Hålansättning. Åtgärd: Rutin för att flytta ansättningen om den träffar spricka
Effektivitet, dvs ingen injektering i sprickor utan endast hålfyllnad	Ingen åtgång har uppnåtts efter x min med fullt tryck	Kombination av olika faktorer, både förutsättningar och designval. Åtgärd: 1: Kontroll av stopp längs flödesvägen, klämd slang etc, Åtgärd 2: Avsluta injekteringen
Injekteringsmedlet eroderar och utfyllnad i sprickor ej uppnådd	Urspolning av bruket, efter demontering av manschett	Injekteringsmedlet har eroderats i spricka och injekteringen ej uppnådd pga vattnets tryckgradient. Åtgärd: Renspolning av hål, ny injektering av hål – justera teknik (tryck eller tid).
Avslut injektering – är injekteringen väl genomförd, dvs uppfyller utförandet det förväntade	– Uppnått tryck och/ eller tid – Varje borrhål ska uppnå minst teoretisk halvvolym och inte överskridit maxvolym – Pluggen i hålet ska inte ge något läckage – Resultat från löpande provningen inom gränskriteriet	Åtgärd: Punkterna "bockas av" i samband med injekteringsprotokoll eller avvikelser noteras. Underlag till uppföljningen, se avsnitt 5.4.3.

5.4.3 Observationer och uppföljning efter injekteringsutförandet

Injekteringsarbetena i tunnarna ska följas upp enligt följande:

- Droppkartering, inkl sprickriktningar och eventuella sprickzoner, samt observationer av injekteringsutförandet.
- Visuell kontroll av borrhål, såsom läckage och synlig plugg.
- Borring – tidsåtgång, raket, manschettmontage, hållrengöring och hållordning vid injektering.
- Följ upp hanteringen vid utförandet, dvs hur ser planering och uppföljning ut, onödiga väntetider pga organisations- och logistikstrul, utförs momenten enligt beskrivning (hydrauliska tester, blandning, löpande provning, håltömning före injektering, ytläckage, sambandshål), väntetider efter injektering, demontering.
- Utrustning – kvalitet, skötsel, kapacitet och noggrannhet.
- Utfall av ”väl genomförd injektering”, dvs att något stoppkriterium har uppnåtts, injekterad volym motsvarar minst hålfyllnadsvolym, resultat från löpande egenskapsprovning av injekteringsmedlen uppfyller kriterier och att registrering av tryck och flöden är utförd.
- Avvikelsehantering och löpande erfarenhetsuppföljning med personal som medverkat vid injekteringsutförandet.
- Presentera sammanställningarna för personal som medverkat vid injekteringarna.

Inläckaget till tunnarna kontrolleras i temporära mätvallar och genom kartering av synligt dropp längs tunneln.

5.4.4 Injekteringsutförande och uppdatering av injekteringsdesign

Nedan beskrivs de olika stegen från prognostisering av typmiljöer/zoner till uppdatering av injekteringsdesign:

1. Inledningsvis ska en bedömning göras av vilka typmiljöer och zontyper, inklusive antal, som kan prognosticeras för varje separat tunnel. Bedömningen baseras på geologiska- och hydrogeologiska beskrivningar och modeller samt erfarenhet av intilliggande tunnlar. Prognosticerade typmiljöer och zontyper ger en första indikation på omfattningen av kommande förinjektering.
2. Inför bergschakt av tunnlar görs undersökningar i långa pilothål. Minst fem deponeringstunnlar undersöks och analyseras åt gången. För stam- och transporttunnlarna görs motsvarande men med mindre antal pilothål. Från resultat av undersökningarna i pilothålen identifieras tunnelns typmiljöer och eventuella zontyper, inklusive förväntat inflöde.
3. Injekteringsdesignen uppdateras och därefter utförs en planering och förberedelse för sonderingsborring och förinjektering längs tunneln samt beslut om injekteringsklass (injekteringssskärmar och injekteringsmedel) som ska tillämpas vid respektive.
4. Då tunneldrivning står inför en prognostiserad typmiljö/zon så utförs sonderingshål vid stuf. Inför en identifierad typmiljö/zon ska resultat från sonderingshål, stufkartering samt tidigare resultat och erfarenheter från injekteringsutförande ge en injekteringsklass. Borring och injektering görs efter vald injekteringsklass. Om inte någon typmiljö/zon kunde identifieras fortsätter tunneldrivningen.
5. Under injekteringen och direkt därefter åtgärdas observationer, som inte uppfyller kriterierna, löpande.
6. Efter ett antal utförda tunnlar, lämpligtvis efter fem deponeringstunnlar eller ca 500 meter stam- och/eller transporttunnel, görs en systematisk uppföljning och analys av dokumenterade observationer, injekteringsresultat och uppföljningar. Inledningsvis av utbyggnaden av förvaret görs denna uppföljning tätare.
7. Uppdatering av injekteringsdesign och injekteringsklass kan bli aktuell beroende på resultat och slutsatser från uppföljningen.

5.5 Utrustning och utförande

Syftet med detta avsnitt är att beskriva utrustning/material och utförandet så att injekteringsdesignen kan utföras.

5.5.1 Allmänt

Inledningsvis och inför injekteringsarbetena ska en arbetsbeskrivning upprättas och uppdateras vartefter ny kunskap och nya erfarenheter erhålls.

Vidare upprättas även en arbetsmiljöplan för bergschaktens arbeten som innehåller aspekter på injekteringsarbetena. Arbetsmiljöplanen ska baseras på en riskbedömning av bergarbetena, för injekteringsarbeten är det främst injekteringsövertrycken och injekteringsmedlen som särskiljer sig mot övriga arbeten i berg. De önskvärda injekteringsövertrycken kommer att ställa krav på säkerhetsrutiner vid utförandet och på utrustning och material. För injekteringsmedlen och dess beståndsdelar, som ska vara godkända ur arbetsmiljösynpunkt, gäller att personlig skyddsutrustning används såsom handskar och skyddsglasögon eller annan specificerad utrustning.

Vid injekteringsarbetet, dvs från sonderingshål till avslut injektering, ska en ansvarig injekteringsledare vara på plats och som direkt kan kommunicera med beställarens ansvariga för injektering. I injekteringsledarens ansvar bör följande arbetsmoment ingå:

- Genomgång och presentation av handlingar och arbetsbeskrivning.
- Beslut på plats om injektering och dess tillvägagångssätt om fler alternativ finns.
- Kontroll av blandningsförfarande och löpande egenskapsprovning.
- Följa injekteringsförloppet och verifiera injekteringsdesignen.
- Tillsammans med entreprenören observera förväntade och oväntade händelser under och efter utförandet samt ta beslut om åtgärder.
- Slutligen efter utförandet följa upp injekteringsarbetet och analysera injekteringsresultaten för att eventuellt föreslå uppdateringar.

För att undvika oavsiktliga avvikelser eller egna tolkningar av handling och/eller arbetsbeskrivningen ska dessa uppdateras och gås igenom av injekteringsledaren med samtliga berörda regelbundet.

5.5.2 Utrustning

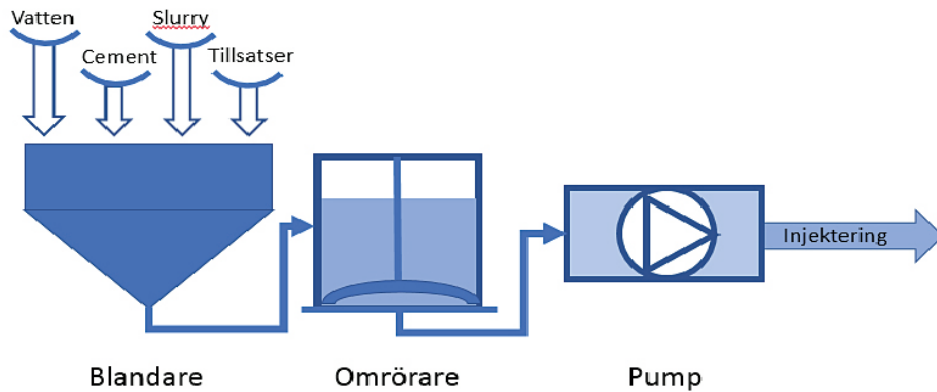
De önskvärda injekteringsövertrycken kommer att ställa höga krav på utrustning och material. De höga trycken ökar också arbetsmiljöriskerna vid utförandet och hantering av utrustningen.

Den konventionella utrustningen för injektering som används idag av branschen kommer inte klara slutförvarsanläggningens alla krav vid injektering med en och samma injekteringsrigg. De krav som kommer ställas på utrustningen och som i första hand är svår att uppfylla är kopplat till de stora djupen, vilket ger höga tryck, och i kombination med höga inläckagekrav, vilket innebär att små flöden ska kunna pumpas och registreras/kontrolleras med tillräcklig noggrannhet. Dessutom kommer stora flöden att förekomma och ska också kunna hanteras och registreras av utrustningen.

För att kunna hantera utrustningskraven bättre, föreslås användande av minst två oberoende utrustningsriggar med olika krav. En rigg med högre kapacitet (volym och tryck) men lägre krav på noggrannhet vid låga flöden och dess registrering och en rigg med lägre kapacitet men med högre krav på att kunna pumpa låga flöden samt med dess registrering och noggrannhet. Nedan beskrivs de specifika kraven som utrustning bör klara.

- Blandning- och pumputrustning.

Blandningsutrustningen vid varje injekteringsस्कärm ska innehålla minst två oberoende pumplinjer, dvs med uppvägningskärl, blandare, omrörare och pump. I figur 5-17 visas en principskiss på blandningsutrustning för cementbaserat injekteringsmedel.



Figur 5-17. Illustration på blandningsutrustning med uppvägningskärl för ingående komponenter, blandare, omrörare och pump för ett cementbaserat injektionsmedel.

Blandningskapaciteten för cementbaserade injektionsmedel beror av bergmassans genomsläpplighet, injektionsövertrycket, brukets egenskaper samt hål- och slangvolym och blandningstiden. Olika scenarier på kapacitetsbehov har studerats. För de större kapacitetsbehoven, dvs vid stora flöden såsom inledningsvis för typmiljö III–V och zon, behövs en kapacitet på minst 300 liter. Då en blandare fylls till ca 2/3 av sin maxvolym behövs en blandare på ca 450 liter för att klara de större kapacitetsbehoven. För de mindre kapacitetsbehoven, dvs vid mindre och normala flöden, är behovet ungefär hälften, dvs en blandare på ca 200 liter är tillräckligt.

Minst två omrörare krävs, med kapacitet på ca 600 liter för den ena och ca 400 liter för den andra. Detta krävs då flera medel ska användas i samma skärm (silica solen blandas i omrörare). Vidare ska omrörarna vara utrustade med lastgivare så att vikten samt flödet under injektionen kan kontrolleras mot flödesgivare. Slutligen ska varje omrörare kunna använda variabla omrörningshastigheter. Till omröraren ska fatpump finnas med minsta flödeskapacitet på 30 liter/min. Fatpump används vid blandning av silica sol i omröraren.

För den större kapaciteten behöver injektionspumpen klara tryck upp till 15 MPa (variation max 0,2 MPa) och ett flöde upp till 120 liter/min. Motsvarande för den mindre kapaciteten är tryck upp till 20 MPa (variation max 0,1 MPa) och ett flöde upp till 60 liter/min. Helst bör två pumpar finnas per omrörare.

Det minsta flödet som ska kunna registreras i slutskedet av pumpningen beror på vilken kritisk sprickvidd som behöver injekteras. Uppskattningar ger att det mätbara pumpflödet ska vara i storleksordningen 0,8–1,3 l/min för cementbruk. För silica sol i de finaste spricköppningarna kommer inte det teoretiska minsta flödet att kunna mätas men önskvärt är att flöden ner till 0,1 l/min kan registreras.

Vidare ska separat pump för silica sol och vakumpump för hålevakuering finnas tillgänglig.

Då tunnarna, speciellt deponeringstunnarna, är små i förhållande till ovanstående specificering och beskrivning av blandningsutrustning behövs en specialdesign av placering och form av utrustningens komponenter. Alternativt att utrustningen kan variera och plockas ihop på plats beroende på förväntad injektion och tunnel.

- Manschetttyp, en-, flergångs, samt slang.

För att bland annat klara de höga trycken ska borrhålsdiameter vara minst 63 mm. Flergångsmanschett förutsätts med de önskade trycken och ska dimensioneras för ett tryck på minst 20 MPa samt kunna säkras, med exempelvis stålkätting i tunnelstuff. Den inre manschett ska sättas minst 2 meter in i borrhålet. Inför injektionsarbetena ska varje manschett typ testas med avseende på angivet tryck och läckage.

För låga flöden bör slangdimensionen vara minst ½ tum.

- Registreringsutrustning.

Utrustning för kontinuerlig mätning och registrering av injekteringsövertryck och flöden ska användas vid all injektering. Pumpflöde på minst 0,8 liter/min ska kunna mätas med en noggrannhet på $\pm 0,1$ l/min. Vid högre flöden, > 5 l/min, är det accepterat att ha en sämre mätnoggrannhet runt $\pm 0,7$ l/min.

Registrering av mängden injekterat material i respektive hål ska utföras kontinuerligt. Utrustning för tryck- och flödesregistrering, med möjlighet till utskrift av tryck- och flödeskurvor, ska användas.

5.5.3 Blandning

- Blandning, tid, ordning.

Normalt ska blandning ta ca 4–5 minuter men exakt blandningstid och ordning ska bestämmas i samband med förprovningsen så att de olika egenskaperna på injekteringsbruket uppnås.

Blandningsförfarandet för det cementbaserade injekteringsmedlet med tre huvudkomponenter (vatten, cement och silica-slurry) kräver en stor noggrannhet i dosering och kontrollerat blandningsförfarande avseende invägning och blandningsstorlek, blandningsordning och -tid, blandningstyp och hastighet samt hantering av kvarvarande spill (bruk och vatten) i utrustningen samt blandningskontroll och yttre förutsättningar (fukt, temperatur etc). Detta då mindre avvikelse i dosering och/eller förfarande ger stora konsekvenser på blandningens tekniska egenskaper. Arbetsbeskrivning av dosering och blandningsförfarande för varje recept ska tas fram inför injekteringsarbetena.

- Omrörning.

Injekteringsbrukets tid i omröraren beror på brukets tidsrelaterade egenskaper. Exempelvis upphör effekten av flytmedeltillsatsen efter en tid, beror på leverantör och tillsatsmängd.

Blandningen av silica solen, dvs silica-slurry och salttillsatsen, görs normalt satsvis i omröraren och tar ca en halv minut. Vid tillsättande av saltet ska manuell flödesmätning med mätnoggrannhet på 1 % användas för att uppnå rätt noggrannhet.

- Injekteringsmedel.

De tekniska egenskaperna på injekteringsmedlen och provningar anges i avsnitt 5.3.3.

Varje separat teknisk egenskap som ingår i förutsättningarna vid det specifika injekteringsutförandet ska verifieras vid den löpande provningen.

5.5.4 Beredskap

Följande utrustning och material behöver lagerhållas så att de kan användas vid behov utan stillestånd:

- Manschett, exempelvis Blow-Out-Preventors (Chang et al. 2005).
- Alternativa injekteringsmedel för extrema flöden (upp till 300 l/min) och grundvattentryck på 450 m.
- Dubbelmanschetter (minst 3 m mellan manchetter).
- Hydrauliska manchetter för djupa hål (> 8 m).
- Vacuum pump inkl slang för avluftning i injekteringshål.
- Tillgång till extra acceleratortillsatser för injekteringscement, exempelvis Sika iAcc-1 (Sika), Groutaid eller likvärdigt.
- Manschett med förlängt rör in i borrhålet.
- Manschett för injektering i hål med ras, tube e manchette eller likvärdigt.

Utöver ovanstående utrustning och material kommer troligtvis oväntade situationer ge behov för ytterligare utrustning och material. För att hantera detta ska det finnas en förberedd organisation för oväntade händelser och observationer.

Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på www.skb.se/publikationer. SKBdoc-dokument lämnas ut vid förfrågan till dokument@skb.se.

Abelin H, Birgersson L, 1987. 3-D migration experiment – Report 1. Site preparation and documentation. SKB Stripa Project TR 87-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Abelin H, Birgersson L, Gidlund J, 1987a. 3-D migration experiment – Report 2. Instrumentation and tracers. SKB Stripa Project TR 87-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Abelin H, Birgersson L, Gidlund J, Moreno L, Neretnieks I, Widén H, Ågren T, 1987b. 3-D migration experiment – Report 3. Performed experiments, results and evaluation. SKB Stripa Project TR 87-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Andersson C, Eng A, 2005. Äspö Pillar Stability Experiment. Final experiment design, monitoring results and observations. SKB R-05-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Axelsson M, 2009. Prevention of erosion of fresh grout in hard rock. Doktorsavh. Chalmers tekniska högskola.

Axelsson M, Gustafson G, 2006. A robust method to determine the shear strength of cement-based injection grouts in the field. *Tunnelling and Underground Space Technology* 21, 499–503.

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

Bodén A (red), Eklund D, Eriksson M, Fransson Å, Hansson P, Lagerblad B, Lindblom U, Wilén P, 2001. Översikt av resultat från SKB:s FoU inom injekteringsteknik för bergtätning åren 1996–2000. SKB R-01-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Brantberger M, Janson T, 2009. Underground Design Forsmark, Layout D2. Grouting. SKB R-08-114, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Brantberger M, Zetterqvist A, Arnbjerg-Nielsen T, Olsson T, Outters N, Syrjänen P, 2006. Final repository for spent nuclear fuel. Underground design Forsmark, Layout D1. SKB R-06-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Butron C, 2012. Drip sealing grouting of tunnels in crystalline rock: conceptualisation and technical strategies. Doktorsavh. Chalmers tekniska högskola.

Börgesson L, Pusch R, Fredrikson A, Hökmark H, Karnland O, Sandén T, 1991. Final report of the rock sealing project – Sealing of the near field rock around deposition holes by use of bentonite grouts. SKB Stripa Project TR 91-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Chang Y, Swindell R, Bogdanoff I, Lindström B, Termén J, Starsec P, 2005. Study of tunnelling through water-bearing fracture zones. Baseline study on technical issues with NE-1 as reference. SKB R-05-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Creütz M, Eriksson M, Janson T, Zetterlund M, 2017. Enhetlig modell för projektering av berginjektering – Underlagsrapport. BeFo rapport 167, Stiftelsen Bergteknisk forskning.

Eklund D, 2005. Penetrability due to filtration tendency of cement based grouts. Doktorsavh. KTH.

Emmelin A, Eriksson M, Fransson Å, 2004. Characterization, design and execution of two grouting fans at 450 m level, Äspö HRL. SKB R-04-58, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Emmelin A, Brantberger M, Eriksson M, Gustafson G, Stille H 2007. Rock grouting. Current competence and development for the final repository. SKB R-07-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Engström A, Persson K, Gustafsson G, 2009. Nyttan av vattenförlustmätningar vid tätning av tunnlar. BeFo rapport 91, Stiftelsen Bergteknisk forskning.

Eriksson M, 2002. Prediction of grout spread and sealing effect: a probabilistic approach. Doktorsavh. KTH.

- 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.
- Eriksson M, Stille H, 2005.** Cementinjektering i hårt berg. SveBeFo rapport K22, Stiftelsen Bergteknisk forskning.
- Follin S, 2008.** Bedrock hydrogeology Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-95, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Fransson Å, 2001.** Characterization of fractured rock for grouting using hydrogeological methods. Doktorsavh. Chalmers tekniska högskola.
- Funehag J, 2007.** Grouting of fractured rock with silica sol. Grouting design based on penetration length. Doktorsavh. Chalmers tekniska högskola.
- Funehag J, 2011.**Handledning för injektering med silica sol – för tätning i hårt berg. BeFo rapport 106, Stiftelsen Bergteknisk forskning.
- Funehag J, 2016.** Efterinjektering av TASS-tunneln. Design, genomförande och resultat från efterinjektering. SKB R-11-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Funehag J, 2017.** Borrhål – hydraulisk gradient och erosion. BeFo rapport 172, Stiftelsen Bergteknisk forskning.
- Funehag J, Emmelin A, 2011.** Injekteringen av TASS-tunneln. Design genomförande och resultat från förinjekteringen. SKB R-10-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gothäll R, 2009.** Behaviour of rock fractures under grout pressure loadings: basic mechanisms and special cases Doktorsavh. KTH.
- Gray M, 1993.** Stripa Project Overview Report. Vol. III: Engineered barriers. OECD/NEA International Stripa Project 1980–1992, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gustafson G, 2009.** Hydrogeologi för bergbyggare. Stockholm: Formas.
- Gustafson G, Claesson J, Fransson Å, 2013.** Steering parameters for rock grouting. Journal of Applied Mathematics, 269594. doi:10.1155/2013/269594
- Hernqvist L, 2011.** Tunnel grouting: engineering methods for characterization of fracture systems in hard rock and implications for tunnel inflow. Doktorsavh. Chalmers tekniska högskola.
- Johansson E, Stenberg L, Olofsson I, Karlzén R, 2015.** Utbyggnaden av Äspölaboratoriet 2011-2012. Karakterisering, projektering och tunneldrivning. SKB R-13-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kobayashi S, Stille H, 2007.** Design for rock grouting based on analysis of grout penetration. Verification using Äspö HRL data and parameter analysis. SKB R-07-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kobayashi S, Stille H, Gustafson G, Stille B, 2008.** Real Time Grouting Control method. Development and application using Äspö HRL data. SKB R-08-133, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Koskinen V, 2017.** State-of-the-art, November 2014 – Water handling during backfill installation. SKB R-15-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Olofsson I, Christiansson R, Holmberg M, Carlsson A, Martin D, 2014.** Application of Observational Method in the Äspö Expansion Project. SKB R-13-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pusch R, Erlström M, Börgesson L, 1985.** Sealing of rock fractures. A survey of potential useful methods and substances. SKB TR 85-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pusch R, Börgesson L, Fredrikson A, Markström I, Erlström M, Ramqvist G, Gray M, Coons W, 1988.** Rock sealing – Interim report on the rock sealing project (Stage 1). SKB Stripa Project TR 88-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pusch R, Börgesson L, Karnland O, Hökmark H, 1991a.** Final report on test 4 – Sealing of natural fine-fracture zon. SKB Stripa Project TR 91-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Pusch R, Karnland O, Hökmark H, Sandén T, Börgesson L, 1991b.** Final report of the rock sealing project – Sealing properties and longevity of smectitic clays grouts. SKB Stripa Project TR 91-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sievänen U, Raivio P, Vuorinen U, Hansen J, Norokallio J, Syrjänen P, 2006.** Optimization of technical properties of low pH cementitious injection grout. Laboratory tests and pilot field test 3. Posiva Working Report 2006-85, Posiva Oy, Finland.
- SKB, 2008.** Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-Site Forsmark. SKB TR-08-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2009.** Site engineering report Forsmark. Guidelines for underground design Step D2. SKB R-08-83, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010.** Design, construction and initial state of the underground openings. SKB TR-10-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2016.** Detaljundersökningsprogram vid uppförande och drift av Kärnbränsleförvaret. SKB R-16-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stephens M B, Simeonov A, 2015.** Description of deformation zone model version 2.3, Forsmark. SKB R-14-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stephens M, Fox B, La Pointe A, Simeonov A, Isaksson H, Hermansson J, Öhman J, 2007.** Geology Forsmark. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. SKB R-07-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stille H, 2015.** Rock grouting: theories and applications. Stockholm: BeFo.
- Stille H (red), Gustafson G, Håkansson U, Olsson P, 1993.** Passage of water-bearing fracture zones. Experience from the grouting of section 1–1 400 m of the tunnel. SKB HRL PR 25-92-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stille H, Janson T, Olsson P, 1994.** Passage of water-bearing fracture zones. Experience from the grouting of section 1 340-2 565 m of the tunnel. SKB HRL PR 25-94-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Søgaard C, 2018.** On the stability and behavior of Silica gels. Lic-avh. Göteborgs universitet.
- Thörn J, 2015.** The impact of fracture geometry on the hydromechanical behavior of crystalline rock. Doktorsavh. Chalmers tekniska högskola.
- Trafikverket, 2014.** Projektering av bergkonstruktioner. Publikation 2014:144, Trafikverket.
- Tsang Y W, Tsang C F, Neretnieks I, 1987.** Some properties of a channeling model of fracture flow. SKB TR 87-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Inläckage efter injektering beroende på den injekterade zonen tjocklek

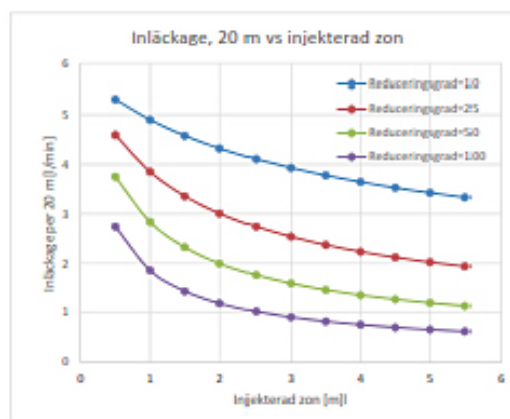
Inläckage beroende på den injekterade zonen tjocklek och reduceringsgrad, figur 5-12

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot H}{\ln\left(\frac{2 \cdot H}{r}\right) + \left(\frac{K}{K_{inj}} - 1\right) \cdot \ln\left(1 + \frac{t}{r}\right) + \xi}$$

$$\text{Reduceringsgrad} = \frac{K}{K_{inj}}$$

q	inläckage	m ³ /s
K	hydrauliska konduktivitet	m/s 2*10 ⁴
H	vattentrycket	m 400
r	ekvivalent tunnelradie	m 4
K _{inj}	injekterings konduktivitet	m/s varierande
t	injekterad zon	m varierande
ξ	skinfaktor	- 5

Injekterad zon, m	q (l/min)	q (l/min)	q (l/min)	q (l/min)
	Reducerings grad=10	Reducerings grad=25	Reducerings grad=50	Reducerings grad=100
0,5	5,31	4,59	3,75	2,75
1	4,90	3,85	2,84	1,86
1,5	4,58	3,36	2,33	1,44
2	4,32	3,01	2,00	1,20
2,5	4,11	2,75	1,77	1,03
3	3,93	2,54	1,60	0,92
3,5	3,78	2,37	1,47	0,83
4	3,65	2,24	1,36	0,76
4,5	3,53	2,12	1,28	0,71
5	3,43	2,03	1,20	0,67
5,5	3,33	1,94	1,14	0,63



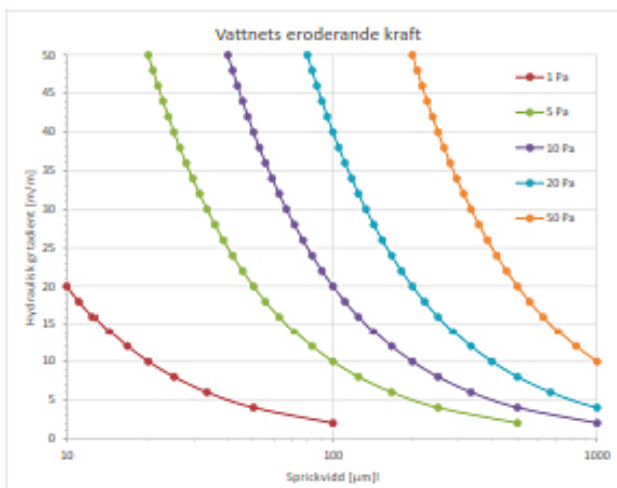
Vattnets eroderande kraft som funktion av grundvattengradient

Vattnets eroderande kraft som funktion av grundvattengradient, figur 5-14

$$b = \frac{2 \cdot \tau}{i \cdot \rho_w \cdot g}$$

- b sprickvidd m
- irjökleringsmedlets flytkräns när
- τ vattentrycket verkar Pa
- i hydraulisk gradient m/m
- ρ_w densitet vatten kg/m³
- g gravitationen m/2/s

i (m/m)	1 Pa	5 Pa	10 Pa	20 Pa	50 Pa
2	100,0	500,0	1000,0	2000,0	5000,0
4	50,0	250,0	500,0	1000,0	2500,0
6	33,3	166,7	333,3	666,7	1666,7
8	25,0	125,0	250,0	500,0	1250,0
10	20,0	100,0	200,0	400,0	1000,0
12	16,7	83,3	166,7	333,3	833,3
14	14,3	71,4	142,9	285,7	714,3
16	12,5	62,5	125,0	250,0	625,0
18	11,1	55,6	111,1	222,2	555,6
20	10,0	50,0	100,0	200,0	500,0
22	9,1	45,5	90,9	181,8	454,5
24	8,3	41,7	83,3	166,7	416,7
26	7,7	38,5	76,9	153,8	384,6
28	7,1	35,7	71,4	142,9	357,1
30	6,7	33,3	66,7	133,3	333,3
32	6,3	31,3	62,5	125,0	312,5
34	5,9	29,4	58,8	117,6	294,1
36	5,6	27,8	55,6	111,1	277,8
38	5,3	26,3	52,6	105,3	263,2
40	5,0	25,0	50,0	100,0	250,0
42	4,8	23,8	47,6	95,2	238,1
44	4,5	22,7	45,5	90,9	227,3
46	4,3	21,7	43,5	87,0	217,4
48	4,2	20,8	41,7	83,3	208,3
50	4,0	20,0	40,0	80,0	200,0



Injekteringstider för bakåtföde beroende av grundvattentrycket och injekteringsmedlets egenskaper

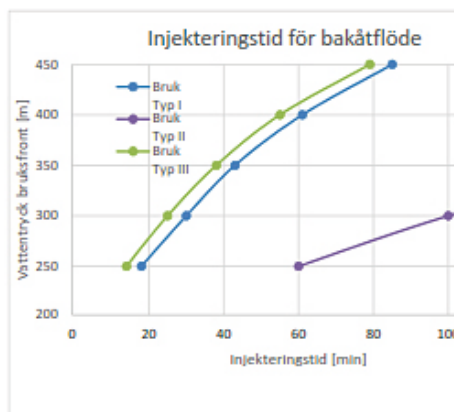
Injekteringstider för villkoret bakåtföde beroende på grundvattentryck och injekteringsmedlets egenskaper

$$I_D > p_w / \Delta p \quad I_D = \sqrt{\theta^2 + 4\theta} - \theta \quad \text{Egenskaperna enligt } t$$

$$\theta_{2D} = \frac{t_D}{2(3 + t_D + 0,23 \ln(t_D))} \quad \text{Injekteringstryck (dp):}$$

$$t = t_D \cdot t_0 \quad t_0 = \frac{6 \cdot \Delta p \cdot \mu_g}{\tau_0^2}$$

Vattentryck, p_w (m)	Tid (min)		
	Bruk Typ I	Bruk Typ II	Bruk Typ III
250	18	60	14
300	30	100	25
350	43	150	38
400	61	220	55
450	85	310	79



Geltider beroende av injekteringsövertryck och sprickvidd för att uppnå inträngning på 3 m

Geltider beroende av injekteringsövertryck och sprickvidd för inträngningen 3 m, figur 5-16

Inträngning silica sol
$$l = 0,45 \cdot b \sqrt{\frac{\Delta p \cdot t_c}{6 \cdot \mu_0}}$$

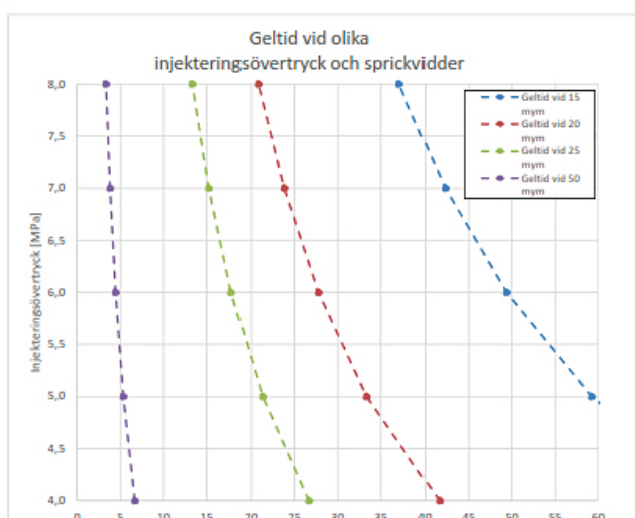
l (m) 3
tau o (Pas) 5,00E-03

Gelinduktionstid (min)

Tryck	Vidd					
	1,00E-05	1,50E-05	2,00E-05	2,50E-05	5,00E-05	1,00E-04
4,00E+06	55,56	24,69	13,89	8,89	2,22	0,56
5,00E+06	44,44	19,75	11,11	7,11	1,78	0,44
6,00E+06	37,04	16,46	9,26	5,93	1,48	0,37
7,00E+06	31,75	14,11	7,94	5,08	1,27	0,32
8,00E+06	27,78	12,35	6,94	4,44	1,11	0,28

Geltid (min)

Tryck		1,00E-05	1,50E-05	2,00E-05	2,50E-05	5,00E-05	1,00E-04
		Geltid vid 15 μm Geltid vid 20 μm Geltid vid 25 μm Geltid vid 50 μm					
4,00E+06	4,0	166,67	74,07	41,67	26,67	6,67	1,67
5,00E+06	5,0	133,33	59,26	33,33	21,33	5,33	1,33
6,00E+06	6,0	111,11	49,38	27,78	17,78	4,44	1,11
7,00E+06	7,0	95,24	42,33	23,81	15,24	3,81	0,95
8,00E+06	8,0	83,33	37,04	20,83	13,33	3,33	0,83



SKB:s uppdrag är att ta hand om använt kärnbränsle och radioaktivt avfall från de svenska kärnkraftverken så att människors hälsa och miljö skyddas på kort och lång sikt.

skb.se