

Översikt av resultat från SKB:s FoU inom injekteringsteknik för bergtätning åren 1996–2000

Anders Bodén (red.), Swedpower AB, Stockholm

Daniel Eklund, Vattenfall Utveckling AB, Älvkarleby

Magnus Eriksson, Avdelningen för jord- och bergmekanik,
KTH, Stockholm

Åsa Fransson, Geologiska Institutionen, CTH, Göteborg

Pär Hansson, Vattenfall Utveckling AB, Älvkarleby

Björn Lagerblad, Cement och Betong Institutet, Stockholm

Ulf Lindblom, Institutionen för geoteknik, CTH, Göteborg

Peter Wilén, Swedpower AB, Göteborg

Maj 2001

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co
Box 5864

SE-102 40 Stockholm Sweden

Tel 08-459 84 00
+46 8 459 84 00

Fax 08-661 57 19
+46 8 661 57 19



Översikt av resultat från SKB:s FoU inom injekteringsteknik för bergtätning åren 1996–2000

Anders Bodén (red.), Swedpower AB, Stockholm

Daniel Eklund, Vattenfall Utveckling AB, Älvkarleby

Magnus Eriksson, Avdelningen för jord- och bergmekanik,
KTH, Stockholm

Åsa Fransson, Geologiska Institutionen, CTH, Göteborg

Pär Hansson, Vattenfall Utveckling AB, Älvkarleby

Björn Lagerblad, Cement och Betong Institutet, Stockholm

Ulf Lindblom, Institutionen för geoteknik, CTH, Göteborg

Peter Wilén, Swedpower AB, Göteborg

Maj 2001

Nyckelord: berg, beständighet, cement, djupförvar, filtrering, filtreringsstabilitet, injektering, injekteringsmedel, karakterisering, spridningsmekanism.

Denna rapport har gjorts på uppdrag av SKB. Slutsatser och framförda åsikter i rapporten är författarens(nas) egna och behöver nödvändigtvis inte sammanfalla med SKB:s.

Summary

A deep repository for radioactive waste puts high demands on the tightening of the rock against leakage of water by grouting. It must be possible to verify and quantify the results of the grouting operation.

When driving the ramp in the Äspö Hard Rock Laboratory, it was found that proved solutions not could be found for all possible situations. Especially problems with high water pressure in transmissive discontinuities were found. In one case, when the ramp passed the discontinuity NE-1, the problems had to be solved ad hoc, as they occurred when passing the discontinuity. Such an approach has to be avoided as far as possible in the deep repository.

In order to identify the current state of the art and development needs, SKB assembled a group of experts from universities and other research organisations. A number of research areas were identified in SKB's compilation of the current state of the art and development needs /Bodén *et al.*, 1997/. Internal plans were written for the subprojects "Characterisation of rock for grouting purposes", "Mechanisms that control the spreading of grout in jointed rock" and "Cement based grouting material". The first two ones were run as postgraduate research studies at CTH, and KTH respectively, while the later was run on a consultancy basis at CBI and Vattenfall Utveckling. Later internal plans for the subprojects "Demands on grouting" (Vattenfall Hydropower), and "Stabilising and sealing effect of pre-grouting" (CTH) were written.

The subprojects will, according to the original plans, be carried out in three stages. Stage 1 was reported in /Bodén, 1998/. Stage 2 is summarised in this report, while stage 1 is summarised in brief.

The aims, which were set for the different subprojects, were in short, to summarise the technological advances (literature surveys), establish a method for rock characterisation from a grouting point of view, develop conceptual and numerical models for simulation of the grouting course, characterise grout in a relevant way, develop understanding and theoretical know-how of durability and chemical influence, identify and develop a number of grouting materials for different situations, develop a specification of requirements for grouting and to verify the theories in laboratory.

In the subproject "Demands on grouting" a literature review was carried out. One important conclusion from the study is that the concept is not very well dealt with in the literature. SKB are currently investigating the prerequisites for the construction of the deep repository. One part of that work is to further specify demands on maximum allowed volume of leakage water for the repository as a whole and also for each part of the deep repository.

In the subproject "Characterisation of rock for grouting purposes", the possibilities of using hydraulic tests for predictions and design have been studied. Comparison of grout take and results from water-loss measurements have been carried out in earlier studies. The idea of this study was to investigate correspondences and deviations to increase the understanding of what is measured in a water-loss measurement. One can draw the conclusion that hydraulic tests are useful when describing the fracture geometry.

Numerical modelling and experiments indicate that the specific capacity, $Q/\Delta h$, (flow/head) is a robust parameter and that the distribution of specific capacities and calculated apertures pictures the geometric variations within the fracture. This distribution may, together with the area, also give an estimate of the fracture volume. The distribution of specific capacities and apertures within a fracture may help when choosing grouting strategy like choice of grout and order of grouting.

The work in the subproject "Mechanisms that control the spreading of grout in jointed rock" has dealt with laboratory tests, numerical modelling and a summarising conceptual model. The results of the laboratory tests are a number of phenomenological studies of the spreading mechanisms. Filtration is judged to influence the grouting result, partly directly through its influence on the course of penetration and partly indirectly through altering grout characteristics which may influence separation and durability. Separation may result in a limited tightness but its significance is judged to depend on present rock conditions. Dilution of the front has not proved to be of importance to the grouting result. Preliminary attempts to take care of filtration and separation while grouting are incorporated in a numerical model. Software that generates fracture geometry, calculates penetration with respect to filtration and separation and evaluates the effect of grouting has been developed. A conceptual model has been developed, describing how to calculate the sealing efficiency and how a prediction of the leakage into a tunnel can be done.

The subprojects "Characterisation of rock for grouting purposes" and "Mechanisms that control the spreading of grout in jointed rock" have led to licentiate thesis for Åsa Fransson, CTH, and Magnus Eriksson, KTH. They are both planning to defend their doctor's theses in 2001.

The subproject "Stabilising and sealing effect of pre-grouting" has aimed to create a theoretical base for the modelling of the behaviour of weakness zones under the influence of different reinforcement systems in combination with pre-grouting of the zone. Freezing of a zone weathered down to gravel has also been studied. By, analytically or graphically, putting the ground reaction curve (GRC) together with the reaction curve of the reinforcement, the tunnel wall deformation is obtained in the current case. The studies show that, when using modern software for rock mechanical analyses, it is possible to create the necessary theoretical base for a decision on driving through a weakness zone in good bedrock. When driving, the great difficulty is probably to, fast enough, obtain relevant material parameters as input in the model. Therefore field investigations and rock mechanical analyses should be carried through already at the planning stage.

The subproject "Cement based grouting material" is divided into three parts. The part "Inventory and characterisation of material" has mainly dealt with finely ground cements and different types of super plasticizers. There are no cement-based grouts that fit into all geological conditions. Especially, it is not possible at the same time to have a mobile and rapid hardening grout. The selection of material has to be based on geological information of the fractures, water flow, pressure etc. and one has to optimise for best result. This calls for a careful evaluation of type, formula and testing of the grouts, both in laboratory and the field. The investigations have identified many of the steering variables and shown on equipment and laboratory methods necessary to develop adjusted grouts. However, one has to optimise for all conditions including temperature, mixer and time before grouting.

The part “Durability and chemical stability” has had a relatively low activity, as the basic problems are dealt with in other SKB projects, see e.g. /Lagerblad och Trägårdh, 1995/ and /Trägårdh och Lagerblad, 1998/. The biggest durability problem regarding cement-based grouts is that they contain water-soluble components. Durability will mainly be a function water penetration through the grouted zone. This will, in turn, depend on the coefficient of fullness in the fracture system and the permeability of the stiffened grout. Therefore, a valuation of leaching and durability has to be based on studies of grout in fractures in the rock and calcium content of the penetrating water. Grout based on granulated blast-furnace slag and/or silica fume contains less calcium hydroxide, which decreases the leaching. These cements are, however, very slow if they aren't accelerated.

The part “Filtration stability” has mainly dealt with the development of a measuring method and model for characterisation and quantification of important material parameters concerning the filtration stability of cement based grouting materials. A three-dimensional Bingham model and its connection to the grouting process have been presented. The newly developed rheological measuring method has made it possible to numerically compute the material constants included in the model. The proposal of how to measure and characterise the cement based grouting material is judged as successful.

Sammanfattning

Djupförvaring av radioaktivt avfall ställer vid tätning av berg mot inläckande vatten krav på att injekteringen lyckas och att resultatet kan verifieras och kvantifieras.

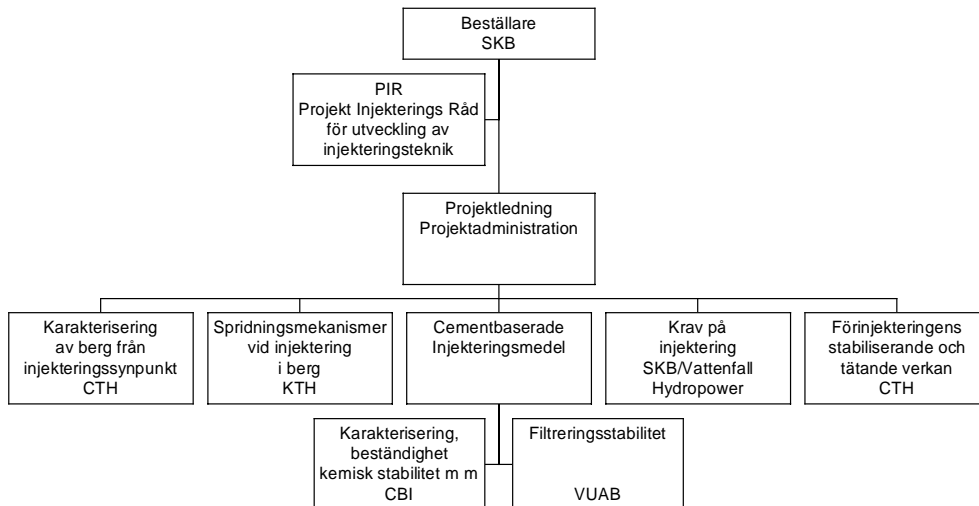
I samband med drivningen av rampen i Äspölaboratoriet konstaterades att beprövade lösningar ej finns för alla situationer. I Äspölaboratoriets ramp uppdagades framför allt problemet med högt vattentryck i transmissiva diskontinuiteter. I speciellt ett fall, när rampen passerade NE-1 diskontinuiteten, blev man tvungen att lösa problemen under hand som diskontinuiteten passerades. Ett sådant förfarande måste så långt som möjligt undvikas i djupförvaret.

SKB sammankallade därför en grupp experter från högskolor och forskningsinstitutioner för att identifiera kunskapsläge och utvecklingsbehov. Ett antal forskningsområden identifierades i SKB:s sammanställning av kunskapsläge och utvecklingsbehov /Bodén m fl, 1997/. Interna delprojektplaner har skrivits för delprojekten "Karakterisering av berg från injekteringssynpunkt", "Spridningsmekanismer vid injektering i berg", "Cementbaserade injekteringsmedel", "Krav på injektering" och "Förinjekteringens stabiliserande och tätande verkan". De två förstnämnda delprojekten påbörjades som forskarutbildningsuppdrag vid CTH respektive KTH. Delprojektet Cementbaserade injekteringsmedel har däremot bedrivits som konsultuppdrag vid CBI och Vattenfall Utveckling AB. Senare har även interna delprojektplaner för "Krav på injektering" (Vattenfall Hydropower AB) och "Förinjekteringens stabiliserande och tätande verkan" (CTH) tagits fram. Organisationen för Projekt Injektering framgår av figur 0-1.

Enligt de ursprungliga planerna skulle delprojekten genomföras i tre etapper. Etapp 1 avrapporterades i /Bodén, 1998/. I denna rapport ges i första hand en översikt över resultaten från etapp 2, medan etapp 1 redovisas översiktligt.

De mål som sattes för de olika delprojekten var kortfattat att sammanfatta teknikläget (litteraturstudier), etablera en karakteriseringsmetodik för berg ur injekteringssynpunkt, utveckla konceptuella och numeriska modeller för simulering av injekteringsförloppet, karakterisera injekteringsmaterial på ett relevant sätt, utveckla förståelse och teoretiskt kunnande av beständighet, kemisk påverkan och påverkan på den kemiska miljön i förvaret, identifiera och ta fram ett antal injekteringsmaterial för olika situationer, uppätta kravspecifikation för injektering samt att verifiera teorierna i laboratorium. Målen var högt satta och har, som framgår av denna rapport, till viss del uppnåtts. Delmålet att sammanfatta teknikläget (litteraturstudier) har uppnåtts av samtliga delprojekt.

I delprojektet "Krav på injektering" har en litteraturstudie genomförts. En viktig slutsats från studien är att begreppet "krav på injektering" inte är speciellt väl belyst i litteraturen. SKB utreder för närvarande konstruktionsförutsättningarna för djupförvaret. En del i det pågående arbetet är att närmare precisera krav på maximalt inläckande volym grundvatten för förvaret totalt och också för respektive anläggningsdel i djupförvaret.



Figur 0-1. Organisation av Projekt Injekttering.

I delprojektet "Karakterisering av berg från injektteringssynpunkt" har möjligheten att använda hydrauliska tester för prediktioner och design vid injektteringsarbeten studerats. Bruksåtgång och resultat ifrån vattenförlustmätningar har tidigare jämförts i andra arbeten. Tanken med denna studie var att undersöka överensstämmelser och avvikelser för att öka förståelsen för vad som mäts vid en vattenförlustmätning. Den slutsats man kan dra utifrån studien är att hydrauliska tester är användbara för att beskriva geometrin hos en spricka. Numerisk modellering och experiment indikerar att den specifika kapaciteten, $Q/\Delta h$, (flödet/tryckhöjden) är en robust parameter och att fördelningen av specifika kapaciteter och sprickvidder beräknade utifrån dessa ger en bild av de geometriska variationerna inom sprickplanet. Denna fördelning kan, tillsammans med arean, även ge ett uppskattat värde av sprickans volym. Fördelningen av specifika kapaciteter och sprickvidder inom en spricka bör vara till hjälp för att bestämma injektteringsstrategi såsom exempelvis val av injektteringsbruk och injektteringsordning.

Arbetet i delprojektet "Spridningsmekanismer vid injekttering i berg" har avsett laborationsförsök, numerisk modellering och sammanfattande av en konceptuell modell. Resultaten av laborationsförsöken är flera fenomenologiska studier av spridningsmekanismerna. Filtreringen bedöms vara av betydelse för injektteringsresultat, dels direkt genom dess påverkan på inträngningsförloppet och dels indirekt genom de förändrade bruksegenskaper som kan påverka separation och beständighet. Separationen kan ge en begränsad täthet men dess betydelse bedöms bero av rådande bergförhållanden. Utspädning av fronten har inte kunnat påvisas vara av betydelse för injektteringsresultatet. I en numerisk modell har preliminära ansatser inkommerats som omhändertar filtrering och separation under injektteringen. Ett programpaket som genererar en sprickgeometri, beräknar inträngning med hänsyn till filtrering och separation samt utvärderar effekten av injekttering har tagits fram. En konceptuell modell beskriver hur tätningseffektiviteten kan beräknas och hur en prediktion av inläckage till en tunnel kan göras.

Delprojekten "Karakterisering av berg från injektteringssynpunkt" och "Spridningsmekanismer vid injekttering i berg" har lett till tekn. lic. examen för Åsa Fransson, CTH, och Magnus Eriksson, KTH. Båda syftar till att disputera under år 2001.

Delprojektet "Förinjekteringens stabiliserande och tätande verkan" har haft som mål att skapa ett teoretiskt underlag för modellering av svaghetszoners uppträdande under inverkan av olika förstärkningssystem i kombination med förinjektering i zonen. Alternativet med frysning har också studerats för en grusvittrad zon. Genom att sammanställa bergmassans responskurva (Ground Reaction Curve, GRC) och förstärkningens responskurva analytiskt eller grafiskt erhålls tunnelväggens deformation och belastningen på förstärkningen i det aktuella fallet. Studierna visar att man med hjälp av moderna programvaror för bergmekanisk analys kan skapa det nödvändiga teoretiska underlaget för beslut om drivningssätt genom påträffade svaghetszoner i bra berggrund. Den stora svårigheten torde emellertid vara att under drivningsskedet snabbt få fram relevanta materialparametrar att sätta in i modellen, varför fältundersökningar och bergmekanisk analys bör genomföras redan under projekteringsfasen.

Delprojektet "Cementbaserade injekteringsmedel" är delat i tre delar. Delen "Inventering och karakterisering av material" har huvudsakligen berört finmalda cement och olika typer av superplasticerare. Det finns inget cementbaserat injekteringsmedel som klarar alla geologiska situationer. Speciellt har det visat sig att man inte kan få ett lätt-rörligt och snabbt bindande injekteringsbruk samtidigt. Valet av medel måste baseras på geologisk information om sprickorna, vattenflöde, tryck etc. och man måste optimera för bästa resultat. Detta fordrar en noggrann utvärdering av typ, receptur och utprovning av bruken, både i laboratorium och i fält. Undersökningarna har gett många av de styrande variablerna och visat på utrustning och laborativa metoder för att ta fram anpassade injekteringsbruk. Man måste dock optimera för alla villkor inklusive temperatur, blandare och tid till injektering.

Delen "Beständighet och kemisk stabilitet" har haft en relativt låg aktivitet beroende på att de grundläggande problemställningarna behandlas i andra SKB projekt, se t ex /Lagerblad och Trägårdh, 1995/ och /Trägårdh och Lagerblad, 1998/. Det största beständighetsproblemet med cementbaserade injekteringsmedel är att de innehåller vattenlösliga komponenter. Beständigheten kommer främst att bli en funktion av hur vatten tränger igenom den injekterade zonen. Detta i sin tur beror på fyllnadsgrad i spricksystemet och permeabilitet hos den stelade cementpastan. En värdering av lakning och beständighet måste därför baseras på studier av cementpasta i sprickor i berget och av hur hög kalciumhalt det penetrerande vattnet har. Bruk baserade på granulerad masugnsslagg och/eller med silikastoft innehåller mindre kalciumhydroxid, vilket minskar urlakningshastigheten. Dessa cement är dock mycket långsamma om de inte accelereras.

Delen "Filtreringsstabilitet" har främst omfattat framtagande av mätmetodik och materialmodell för karakterisering och kvantifiering av viktiga materialparametrar för filtreringsstabiliteten hos cementbaserade injekteringsmedel. En materialmodell (tredimensionell Bingham-modell) och dess koppling till injekteringsprocessen har presenterats. Den nyutvecklade reologiska mätmetodiken har gjort det möjligt att numeriskt beräkna de i materialmodellen ingående materialkonstanterna. Förslaget till mätkoncept för karakterisering av det cementbaserade injekteringsmedlets inträngningsförmåga kan hittills ses som framgångsrikt.

Innehållsförteckning

	Sida
1 Bakgrund	11
1.1 Etapp 1	11
1.1.1 Karakterisering av berg från injekteringssynpunkt	12
1.1.2 Spridningsmekanismer vid injektering i berg	13
1.1.3 Cementbaserade injekteringsmedel	14
1.1.4 Förinjekteringens stabiliserande och tätande verkan	16
1.2 Etapp 2	16
2 Krav på injektering	19
3 Karakterisering av berg från injekteringssynpunkt	25
3.1 Allmänt	25
3.2 Bruksåtgång och transmissivitet	25
3.3 Analytisk studie	26
3.4 Numerisk modellering	26
3.5 Experiment, hydrauliska tester	27
3.6 Analys	27
4 Spridningsmekanismer vid injektering i berg	31
4.1 Allmänt	31
4.2 Laborationsförsök	31
4.2.1 Allmänt	31
4.2.2 Försöksserie 1: Filtringens påverkan på flöde och inträngningslängd	31
4.2.3 Försöksserie 2: Injektering mot ett vattentryck	32
4.2.4 Försöksserie 3: Injektering i en sprickreplik	32
4.3 Beräkningsverktyg för beräkning av bruksspridningen	32
4.4 Konceptuell modell avseende tätningseffektivitet och prediktion av inläckage	33
5 Förinjekteringens stabiliserande och tätande verkan	35
5.1 Allmänt	35
5.2 Litteraturstudier	35
5.3 Konceptualisering	36
5.4 Numerisk modellering	37
5.5 Analytiska och numeriska beräkningar	37
6 Cementbaserade injekteringsmedel	41
6.1 Inventering och karakterisering av material	41
6.1.1 Allmänt	41
6.1.2 Reologi och superplasticerare	41
6.1.3 Bindetid och acceleratorer	42
6.2 Beständighet och kemisk stabilitet	43
6.3 Filtringsstabilitet	45

	Sida
7 Diskussion och slutsatser	49
7.1 Karakterisering av berg från injekteringssynpunkt	49
7.2 Spridningsmekanismer vid injektering i berg	50
7.3 Förinjekteringens stabiliserande och tätande verkan	50
7.4 Cementbaserade injekteringsmedel	52
7.4.1 Inventering och karakterisering av material	52
7.4.2 Beständighet och kemisk stabilitet	52
7.4.3 Filtreringsstabilitet	52
7.4.4 Beskrivning av injekteringsmedel	53
8 Referenser	55

1 Bakgrund

Djupförvaring av radioaktivt avfall ställer vid tätning av berg mot inläckande vatten krav på att injekteringen lyckas och att resultatet kan verifieras och kvantifieras. Detta kräver i sin tur att berget kan karakteriseras och beskrivas på ett sådant sätt att man kan välja injekteringsteknik som ger nödvändig utfyllnadsgrad och fysisk stabilitet. Dessutom måste beständighet och kemisk interaktion mellan injekteringsmaterial, grundvatten och övrigt material i djupförvaret kunna beskrivas och kvantifieras på ett sådant sätt att det kan beaktas vid säkerhetsanalysen.

I samband med drivningen av rampen i Äspölaboratoriet konstaterades att beprövade lösningar ej finns för alla situationer. I Äspölaboratoriets ramp uppdagades framför allt problemet med högt vattentryck i transmissiva diskontinuiteter. I speciellt ett fall, när rampen passerade NE-1 diskontinuiteten, blev man tvungen att lösa problemen under hand som diskontinuiteten passerades.

Oavsett vilka diskontinuiteter som ska åtgärdas, stora transmissiva diskontinuiteter eller finare sprickor, måste lämpliga insatser baseras på kunskaper om sprickor och material-egenskaper samt på val av utrustning med tillfredsställande prestanda.

En närmare redogörelse för bakgrund finns i SKB:s sammanställning av kunskapsläge och utvecklingsbehov /Bodén m fl, 1997/. I den identifierades ett antal forskningsområden som senare utmynnade i ett antal prioriterade delprojekt. Interna delprojektplaner togs då fram för delprojekten ”Karakterisering av berg från injekteringssynpunkt”, ”Spridningsmekanismer vid injektering i berg” och ”Cementbaserade injekteringsmedel”. De två förstnämnda delprojekten påbörjades som forskarutbildningsuppdrag vid CTH respektive KTH. Delprojektet Cementbaserade injekteringsmedel har däremot bedrivits som konsultuppdrag vid CBI och Vattenfall Utveckling AB.

Senare har även interna delprojektplaner för ”Krav på injektering” och ”Förinjekteringens stabiliserande och tätande verkan” tagits fram.

Delprojekten planeras att genomföras i tre etapper. De två första etapperna planerades till 18 månader vardera och den tredje och avslutande etappen till 24 månader. Denna rapport sammanfattar i första hand etapp 2, medan etapp 1 endast behandlas översiktligt nedan.

1.1 Etapp 1

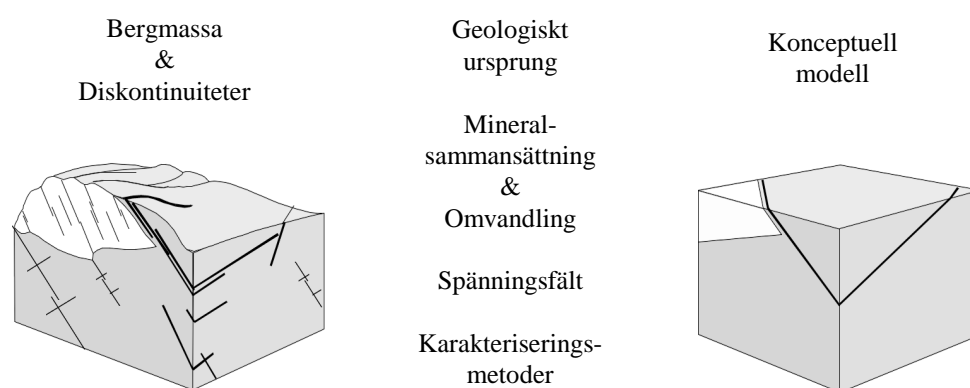
Etapp 1 påbörjades sommaren 1996 och avrapporterades sommaren 1998 /Bodén, 1998/. De mål för etapp 1 som sattes för de olika delprojekten var att sammanfatta teknikläget (litteraturstudier), utveckla konceptuella och numeriska modeller för simulering av injekteringsförloppet, sammanställa och kompilera tillgängliga data, utveckla förståelse och teoretiskt kunnande av spridningsmekanismer i berg, filtreringsstabilitet samt beständighet och kemisk påverkan, identifiera ett antal användbara injekteringsmaterial samt att upprätta kravspecifikation för injektering.

1.1.1 Karakterisering av berg från injekteringssynpunkt

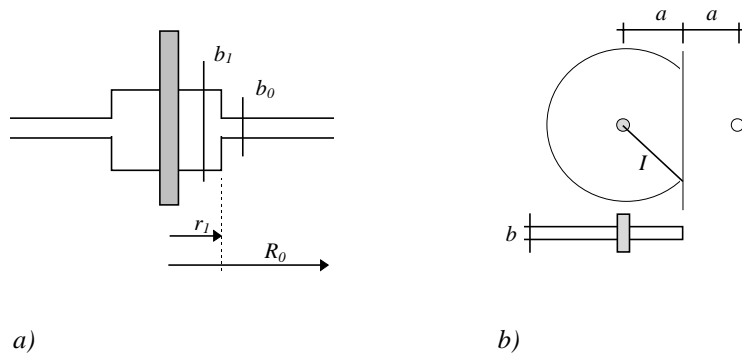
Genom geologisk kartering kan kunskapen om bergmassan successivt byggas upp, men eftersom det inte är möjligt att direkt bestämma bergets egenskaper på den andra sidan av t ex tunnelfronten bör den geologiska karakteriseringen kombineras med någon indirekt metod. Om exempelvis hydrauliska tester används kan en beskrivning av sprickor och spricksystem ske både hydrauliskt och geometriskt.

I litteraturstudien /Fransson, 1999/ behandlades ett antal rubriker av betydelse för injektering och karakterisering av bergmassan, se figur 1-1. Denna information används för att bygga upp en konceptuell modell av bergmassan. En önskan om ett komplement till den successivt uppbyggda kunskapsbank som fås av bergmassan under tunneldrivingen resulterade i att studierna efter litteratursammanställningen i stor utsträckning har behandlat hydrauliska tester. Denna undersökning inleddes med en analytisk studie där transmissivitet och bruksåtgång vid olika geometrier jämfördes, figur 1-2. En överensstämmelse mellan dessa parametrar vid förändringar av geometrin samt förståelse för eventuella avvikelser skulle öka värdet av prediktioner med hjälp av vattenförlustmätningar. Studien visade en god korrelation mellan de två parametrarna där normaliserad bruksåtgång (V/V_0) dividerad med normaliserad transmissivitet (T_{Test}/T_0) i många fall har ett värde runt eller under två, se figur 1-3. Utifrån den analytiska studien bör transmissiviteten alltså betraktas som en viktig och användbar parameter vid karakterisering av berg från injekteringssynpunkt.

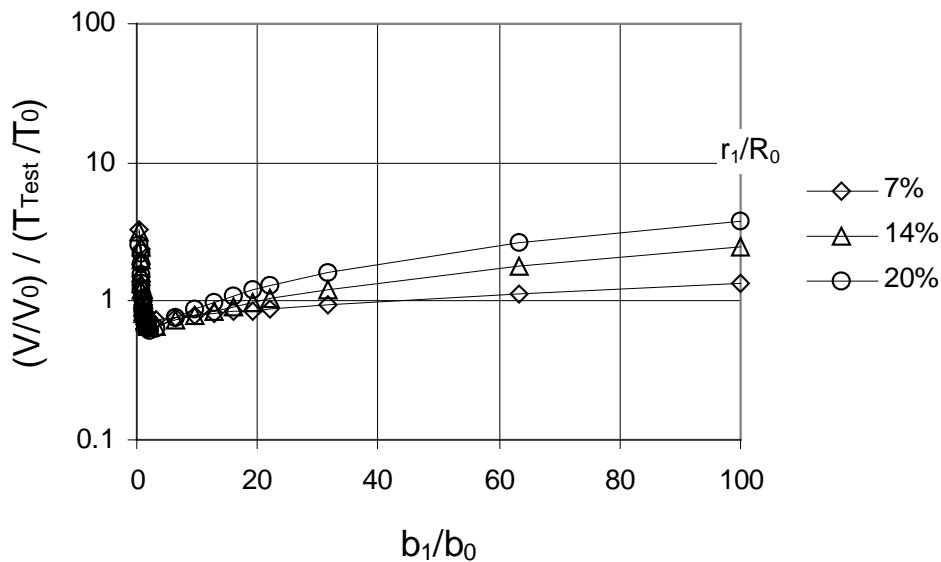
Parallellt med ovannämnda arbete gjordes viss datainsamling av främst vattenförlustmätningar, injekteringsdata samt geologiska karteringsdata från Äspölaboratoriet.



Figur 1-1. Konceptualisering av bergmassan.



Figur 1-2. Modeller för beräkning av transmissivitet och bruksåtgång, a) och b) spricka vinkelrätt mot respektive parallellt med papperets plan..



Figur 1-3. Normaliserad bruksåtgång, V/V_0 , dividerad med normaliserad transmissivitet, T_{Test}/T_0 , vid ökande kvot b_1/b_0 , se figur 1-2.

1.1.2 Spridningsmekanismer vid injektering i berg

Delprojektet spridningsmekanismer vid injektering i berg har påvisat behovet av en geometrisk konceptuell modell som dels kan kopplas till en relevant geometrisk karakterisering, dels kan användas för att efterlikna de brukseffekter som uppträder. Ett program som beräknar inträngningen i cirkulära rörkanaler av varierande radie utvecklades. Även ett kanalnätverksprogram användes. Programmen verifierades i laboratorieförsök och ett antal simulerade försök gjordes sedan. För att bättre simulera en verklig injektering kopplades därefter ett antal villkor till den numeriska modellen. Villkoren kompletterar modellen i de fall där speciella omständigheter stör inträngningen. De faktorer som lades till som villkor i beräkningarna är förändring av flytgräns och viskositet, filtreringsstabilitet och separation. Dessa villkor påverkas i olika grad av vattencementtal (vct), specifik yta, tryck och tid, se tabell 1-1. Modellens giltighet verifierades under laboratorieförsök i etapp 2.

Tabell 1-1. Egenskaper som påverkar inträngningsförmåga och reologi.

	Tid	Vct	Specifik yta	Tryck
Filtreringsstabilitet	Minskar med tiden	Ökar med ökat vct	Minskar med ökad yta	Minskar med ökat tryck
Flytgräns	Ökar med tiden	Minskar med ökat vct	Ökar med ökad specifik yta	–
Viskositet	Ökar med tiden	Minskar med ökat vct	Ökar med ökad specifik yta	–
Separation	–	Ökar med ökat vct	Minskar med ökad yta	Ökar med ökat tryck

1.1.3 Cementbaserade injekteringsmedel

Cementbaserade injekteringsmedel studeras med avseende på inventering och karakterisering av material, beständighet och kemisk stabilitet samt filtreringsstabilitet.

Inventering och karakterisering av material

För cementbaserade injekteringsmaterial gäller ett komplicerat samspel mellan typ av cement, kornstorlek, tillsatsmedel och tillsatsmaterial. Olika typer av injektering och geologisk situation kräver olika typer av injekteringsmedel med olika egenskaper. För att kunna göra en lyckad injektering måste dessa egenskaper kvantifieras så att injekteringsmaterialet kan optimeras för situationen. Detta arbete påbörjades i etapp 1 och en del styrande variabler togs fram. Största delen av arbetet var en litteraturstudie. Den låg till grund för det fortsatta arbetet. Några av nyckelparametrarna som identifierades var sambanden mellan flyttillsatsmedel, cementtyp och finmalningsgrad. Inledningsvis har en del preliminära undersökningar gjorts av hur olika typer av cement samverkar med flyttillsatsmedlen och här fått fram en del intressanta samband och mekanismer, ett arbete som fortsatte under etapp 2.

Beständighet och kemisk stabilitet

Ett injekteringsbruks beständighet och kemiska stabilitet styrs av cementpastans struktur och sammansättning i berg, dess permeabilitet, vattenkemin och vattenflödet.

För att få fram information om hur en cementpasta ser ut i berg togs borrhärdar från Äspölaboratoriet och injekteringsmaterialets struktur in situ studerades. Resultaten visade att pastan hade utsatts både för filtrering, sedimentation och kanalbildning och därför var mycket inhomogen. Förutom partikelseparation hade pastan utsatts för kemisk filtrering vilket givit den en annan kemi än den skulle ha haft om den fick hydratisera i lugn och ro.

Cementpastan blir allt porösare när man går ut från injekteringshålet. Detta gör att cementpastan blir relativt löslig i sitt ytterområde. I de finare sprickorna hade ofta cementpastan blandats med sprickmineraliseringar i form av leror. I en del fall var det en cementstabiliserad lera.

Detta gör att man från laboratedata inte korrekt kan beräkna beständigheten och den kemiska stabiliteten. Man måste utgå från laboratedata i kombination med fältdata om vattenförhållanden, injekteringsbrukets struktur och fyllnadsgrad. Cementpastas löslighet och effekt på omgivande berg har behandlats i andra SKB projekt, se t ex /Lagerblad och Trägårdh, 1995/ och /Trägårdh och Lagerblad, 1998/.

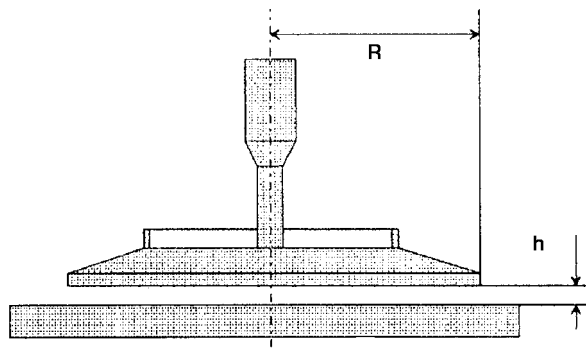
Filtreringsstabilitet

Filtreringsstabilitet studerades med avseende på vilka parametrar som bestämmer inträngningsförmågan hos cementbaserade injekteringsmedel. I undersökningar med inert material identifierades ett tydligt samband mellan kornstorleksfördelning och filtreringsstabilitet respektive reologi. Detta, visserligen förväntade, samband kunde inte etableras vid provningar med kommersiellt tillgänglig cement.

Behovet av enhetliga förfaranden vid karakterisering av ett injekteringsbruks flödesegenskaper påvisades.

Undersökning av filtreringsstabilitet, som görs i speciella filterpumpar, visade att de gamla tumreglerna, som endast tar hänsyn till kornstorleken, inte kan användas för stabila bruk. Utöver inverkan av materialparametrar har man även att ta hänsyn till bland annat hur effektiv blandning/dispergering bruket blivit utsatt för.

Genomförd litteraturgenomgång gav ingen information som direkt kan tillämpas på problemområdet. Dock har vissa angreppssätt presenterats vilka kan tillämpas för att utreda injekteringsbruks funktion. En metod att mäta flödesegenskaper som ska utprovas är rotationsreometri där suspensionen befinner sig mellan planparallella cirkulära plattor och där gapet dem emellan kan varieras, s k "plate-plate"-geometri, se figur 1-4.



Figur 1-4. Så kallad "plate-plate"-geometri.

1.1.4 Förinjekteringens stabiliserande och tätande verkan

Etapp 1, som i detta delprojekt påbörjades senare än de övriga delprojekten, innebar en relativt omfattande genomgång av kunskapsläget i internationell litteratur, speciellt med avseende på passage av svaghetszoner. Litteraturen innehåller dock mycket lite information vad avser det beskrivna teknikområdet. Kunskap får i princip sökas i den allmänna injekterings- och bergförstärkningslitteraturen. Syntesen, metodiken som kopplar ihop injektering och förstärkning, beskrivs mycket sparsamt.

Bland slutsatserna från genomgången av litteraturen och kunskapsläget kan nämnas:

- Injekterbarheten är ett stort problem i lervittrade svaghetszoner och kräver metodutveckling.
- Den tätande verkan av injektering är beprövad och effektiv vid zoner av typen krossat, icke kohesivt bergmaterial i zonen.
- Den stabiliserande verkan av injektering är intuitivt bra i bergmassor och zoner med öppen porositet, vilket visats i storskaliga tester.
- Tunneldrivning genom den relativt sett svagare zonen leder till stora bergrörelser vilka kan skada tätningsverkan.

För förståelse av deformations-, hållfasthets- och tätningsfenomenen, för framtagning av mekaniska materialegenskaper samt för numerisk analys av svaghetszonerna före och efter injektering krävs fortsatt forskning.

1.2 Etapp 2

Etapp 2 påbörjades våren 1998 och avrapporteras i denna delprojektgemensamma rapport.

De mål som sattes upp för de olika delprojekten under etapp 2 var

- att sammanfatta teknikläget (litteraturstudier),
- att etablera en karakteriseringsmetodik för berg,
- att genom modellering och experiment i en sprickreplik undersöka om hydrauliska tester är användbara för prediktioner och design vid injekteringsarbeten,
- att utveckla konceptuella och numeriska modeller för simulering av injekteringsförloppet,
- att sammanställa och kompilera tillgängliga data,
- att utveckla förståelse och teoretiskt kunnande av spridningsmekanismer i berg,
- att utveckla förståelse och teoretiskt kunnande av filtreringsstabilitet,
- att utveckla förståelse och teoretiskt kunnande av beständighet och kemisk påverkan,

- att identifiera ett antal användbara injekteringsmaterial och
- att upprätta kravspecifikation för injektering.

Som ett resultat av forskningen har Åsa Fransson, CTH, och Magnus Eriksson, KTH, avlagt tekn. lic. examen i syfte att disputerat under år 2001.

I tabell 1-2 redovisas en översikt över delprojekt och medverkande forskare och institutioner.

Tabell 1-2. Översikt över delprojekt samt medverkande forskare och institutioner.

Delprojekt	Forskare	Institution/företag
Krav på injektering	Delprojektledare: Stig Pettersson/Anders Bodén	SKB/Vattenfall Hydropower AB
Karakterisering av berg från injekteringssynpunkt	Civ.ing. Åsa Fransson Handledare: Prof. Gunnar Gustafson	Chalmers Tekniska Högskola, Geologiska inst.
Spridningsmekanismer vid injektering i berg	Civ.ing. Magnus Eriksson Handledare: Prof. Håkan Stille	Kungl. Tekniska Högskolan Avd. för jord- och bergmekanik
Cementbaserade injekteringsmedel		
– Inventering och karakterisering av material	Docent Björn Lagerblad	Cement och Betong Institutet
– Beständighet och kemisk stabilitet	Docent Björn Lagerblad	Cement och Betong Institutet
– Filtreringsstabilitet	Civ.ing. Pär Hansson Handledare: Prof. Jan Alemo	Vattenfall Utveckling AB, Betongteknik
Förinjekteringens stabiliserande och tätande verkan	Prof. Ulf Lindblom	Chalmers Tekniska Högskola, Inst. för geoteknik

2 Krav på injektering

I delprojekt ”Krav på injektering” genomfördes en litteraturstudie av Peter Wilén och Anders Bodén, Vattenfall Hydropower AB (nuvarande Swedpower AB).

Enligt de ursprungliga planerna för delprojektet skulle de krav/önskemål på injekteringen som SKB ska ställa gällande berganläggningar att, med undantag för tätning av finare sprickor i själva förvarsområdet, preciseras i etapp 3.

Frågeställningen krav på injektering är inte särskilt väl dokumenterad i litteraturen, bland annat på grund av att:

1. Injekteringen har kommit in relativt sent i bergbygget och har därför en kort historik, förutom ridåinjektering för dammar som utförts i cirka 100 år.
2. Traditionellt har injektering tillgripits först när akuta problem ur byggtreprenadsynpunkt, (inläckage/stabilitet/berguttag) uppstått, huvudsakligen arbetsplatskrav. Under senare år har även funktionskrav initierat krav på tätningsåtgärder.
3. Injektering har under flera decennier varit ett område med mycket tyckande om metoder och material. Målinriktad forskning och utveckling påbörjades huvudsakligen under 1980-talet.

En stor del av den studerade litteraturen avser forskning och utveckling. Artiklarna innehåller vanligen inget konkret krav på injektering, däremot finns det nästan alltid någon form av krav som initierat projektet eller undersökningen. Det är i enskilda projekt under de senaste 10–15 åren där uttalade krav på tätningsinsatser vid undermarksbyggande finns. Kraven gäller vanligen antingen begränsning av inläckande vatten (funktionskrav) eller krav på bibehållen grundvattennivå (miljökrav). Dessa krav på resultat medför i sin tur krav på injekterings utförande, utrustning, material etc. Dessa krav gäller inte tekniska parametrar som inträngning eller skärmutbredning.

Övergripande krav ställs av samhället när det gäller vilken påverkan som en undermarksanläggning kan tillåtas orsaka omgivningen ur miljösynpunkt inklusive grundvattensynpunkt. Kraven identifieras och ställs av t ex kommuner och länsstyrelse men även direkt eller indirekt av ägare av olika anläggningar och fastigheter som kan tänkas påverkas.

Krav på injektering ställs vanligen i projektens förfrågningsunderlag och bygghandlingar och gäller då de krav som ställs på injekteringsmedel (typ, egenskaper m m), utrustning (blandare, omrörare, pumpar), utförande (borrning, renspolning, injekteringstryck, volymkriterier etc.) och kontroll. Det utgör ett regelverk för entreprenadens genomförande.

För undermarksarbeten i Stockholm har bergtekniska anvisningar för injekteringsarbeten, BTA, tagits fram /Stockholms gatukontor, 1982/. Anvisningarna ställer krav på hela injekteringsprocessen, projektering och utförande.

I Göteborg finns ingen motsvarande handling, istället är kommunen mycket restriktiv när det gäller påverkan på grundvattennivåer i staden. Gränsvärden för tillåtna inläckage tas fram i geohydrologiska utredningar som föregår projekteringen.

I Norge, där det under de senare decennierna har byggts relativt många tunnlar för väg och järnväg, finns mycket begränsade generella eller allmänna krav på injektering. Ett övergripande krav bestäms av kapaciteten hos pumpar för att uppföra inläckande vattenvolymer (arbetsplatskrav). Gränsen är 300 l/minut och km tunnel. I tätorter är det andra krav som gäller och erfarenheter från flera tunnlar i Osloområdet visar att, för att undvika omgivningspåverkan, sättningsskador på bebyggelse m m, bör inläckagen vara mindre än 2–4 l/min och 100 m tunnel. Det innebär att det i stort sett inte finns några synliga dropp eller rinnande läckage i tunneln /Karlsrud, 1998/. Metodiken som beskrivs stämmer väl överens med hur tunnelprojekt med höga täthetskrav genomförs i Sverige.

SKB utreder för närvarande konstruktionsförutsättningarna för djupförvaret. En del i det pågående arbetet är att närmare precisera krav på maximalt inläckande volym grundvatten för förvaret totalt och också för respektive anläggningsdel i djupförvaret.

Flera undermarksbyggen i Sverige under senare år har byggts under relativt stränga täthetskrav. Lundbytunneln i Göteborg, är ett projekt som byggts med mycket högt ställda krav på liten inläckning. För tunneldrivningen innebär det att tätningarbetet, med två injekteringsomgångar samt täthetskontroller, till mycket stor del styr berguttaget och framdriften. Injekteringsarbetena har beskrivits på bergmekanikdagen 1997 /Eriksson och Palmqvist, 1997/) och i ett examensarbete /Lédel och Thorild, 1995/. I projektet anges byggherrens täthetskrav med tätningsskikt (1–3) och entreprenörens utförandemetoder kallas injekteringsklasser, se tabell 2-1. Varje injekteringsomgång omfattar injekteringsborrning, vattenförlustmätning samt injektering.

Tabell 2-1. Inläckagekrav och injektering av Lundbytunneln.

Täthetsklass	Inläckagekrav	Injekteringsklass	Hålspetsavstånd
1a	< 0,5 l/min. 100 m	1	1 m
1b	< 1,0	1	1 m
2	< 2,0	2	Botten 1 m Tak och vägg 2 m
3	< 2,5	3	2 m

Täthetskraven har bestämts av geohydrologiska förundersökningar och avgörande har varit grad av bebyggelse, typ av jordmassor samt bergtäckning.

För Götatunneln kommer på motsvarande sätt som för Lundbytunneln mycket hårda krav att ställas på begränsade inläckage, <1 l/min och 100 m tunnel. De båda tunnelrören och tillhörande arbetstunnlar passerar centrala delar av Göteborg.

Exempel på tunnlar i Stockholm som byggts med relativt stränga täthetskrav är Saltsjötunneln och Ormen (två tunnlar som är TBM-borrade) och tunnelbanan vid Skarpnäck.

Den sistnämnda redovisades i Bergsprängningskommitténs diskussionsmöte BK -92 i "Tunnelbanan till Skarpnäck, tätnings- och förstärkningsarbeten" /Bruce, 1992/. På stora delar av sträckan ligger banan under lera där en grundvattensänkning skulle ge stora och kostsamma sättningar. Som ett av de första större underjordsarbetena var kraven fastställda i en vattendom. I vattendomen föreskrivs bland annat vilka grundvattennivåer som inte får underskridas, mätförfarande av dessa m m.

Erfarenheter från injekteringsarbetena för Ormen presenterades vid Bergmekanikdagen 1993, "Ormen – en fullborrad bergtunnel för magasinering avloppsvatten. Erfarenheter från injekteringsarbetet" /Morfeldt och Flodin, 1993/. Eftersom avloppstunneln periodvis kommer att gå tom och läget i centrala Stockholm med sättningkänslig bebyggelse var det mycket restriktiva krav på inläckning.

Arlandabanans bergtunnlar och stationer vid flygplatsen har injekterats med kontinuerlig förinjektering. Injekteringsarbetena har bland annat beskrivits vid Bergmekanikdagen 1997 av /Hässler och Forhaug, 1997/. Krav i vattendomen var att grundvattennivåerna i området vid landningsbanorna inte fick påverkas. Vid utförandet har kontrollen av injekteringsarbetena inriktats på en materialkontroll och en noggrann dokumentation av injekteringsarbetena. Borrningsprecisionen har kontrollerats och ett fåtal vattenförlustmätningar har utförts som kontroll. Injekteringsmetodiken utvecklades successivt under tunneldrivningen.

I Stockholm byggs för närvarande Södra länken. I förundersökningarna har relativt omfattande geohydrologiska undersökningar utförts. Tunneln är indelad i olika delsträckor beroende på omgivningens känslighet för grundvattensänkning. Bygghandlingarna innehåller detaljerade uppgifter om olika täthetsklasser, dess utförande samt kontroll.

Det har även byggts ett antal järnvägstunnlar under senare år utanför tätortsområden. Kraven på inläckage styrs huvudsakligen av drift och underhåll av anläggningen. Krav utifrån påverkan av grundvattennivåer finns vanligen också, men det är inte så hårda krav som i tätorter.

SKB:s anläggning kommer inte att placeras i berg under djupa lerlager med sättningkänslig bebyggelse. Det innebär att extremt låga inläckagekrav med hänsyn till omgivande grundvattennivåer inte kommer att vara styrande för täthetskraven. I stället är det snarare de krav som idag ställs på väg- eller järnvägstunnlar utanför våra tätortsområden som närmast är jämförbara (driftkostnader, underhåll, beständighet).

För tätning av berggrum på stora djup, speciellt gaslager diskuteras krav utifrån lagrets utförande, inklätt med dräneringsgalleri eller oinklätt med vattenridå i "Injektering i berg. Hydrogeologiska förutsättningar och genomförande" /Carlsson m fl, 1987/. Krav på injekteringsresultat är i rapporten uppdelat på täthet respektive beständighet och stabilitet. I djupförvaret kan emellertid svällningen hos återfyllnadsmaterialet försämrats av inläckage av salta vatten.

I "Styrande faktorer för tätheten kring en förinjekterad tunnel" /Brantberger m fl, 1998/ beskrivs faktorer som påverkar tätheten runt en förinjekterad tunnel och behandlar egenskaper relaterade till geologi, geohydrologi och injekteringsmedel men behandlar inte miljö eller arbetsmiljö. Rapporten är huvudsakligen en litteraturstudie men innehåller även beräkningsexempel. Normala krav på inläckage i Sverige idag är 1–10 l/min och 100 m tunnel. Utförda beräkningar visar att det innebär krav på

tätningseffektivitet¹ på över 90 % i vissa fall nära 100 %, innebärande att även de minsta vattenförande sprickorna tätas. Det innebär att en tätning ned till $1 \cdot 10^{-8}$ m/s av en läckande zon kan krävas och att sprickvidder ned till 0,05 mm eller mindre helt eller delvis måste tätas.

Ett bra injekteringsmedel kan ur tätningssynpunkt karakteriseras av att det har god inträngningsförmåga, god sprickfyllnad samt att det härdar snabbt och utan krympning.

Beräkningarna visar att den viktigaste egenskapen är vilken hydraulisk konduktivitet som kan uppnås hos den injekterade zonen och att zonens tjocklek har mindre betydelse. Även grundvattentrycket har stor inverkan på vatteninläckaget efter injektering. Bergmassans ursprungliga konduktivitet har en viss inverkan, men vid en minskande konduktivitet hos den injekterade zonen avtar betydelsen av bergets ursprungliga konduktivitet. I rapporten finns även beräkningsexempel på inverkan av olika sprickfördelningar, sprickfrekvens och bergmassans porositet.

I rapporten redovisas även olika cementbaserade injekteringsmedel och egenskaper som påverkar egenskaper inträngning, utfyllnad och tätning. Den utgör en teoretisk beskrivning av vilka krav som är rimliga att ställa på olika cementbruk ur tätningssynpunkt.

Kemisk injektering har studerats i "Chemical rock grouting" /Andersson, 1998/. Arbetet gäller polyuretaner som injekteringsmedel och omfattar huvudsakligen laborietester men även verifieringar i fält. Arbetet är mycket aktuellt eftersom det visat sig i flera projekt att det är svårt att erhålla önskvärda tätningsnivåer med enbart cementinjektering, t ex Hallandsås, Lundbytunneln och Romeriksporten. Det är därför viktigt att kunskapen om olika alternativ eller kompletteringar till cement och mikrocement ökar. Inte minst eftersom användning av kemiska injekteringsmedel ur miljösynpunkt (arbetsmiljö och omgivning) är en kontroversiell fråga.

"Practical guide to grouting of underground structures" /Henn, 1996/, är en handbok i injektering och i flera av bokens kapitel finns kravspecifikationer för injekteringsarbeten beskrivet. I kapitel 3 "Geotechnical considerations in grouting program planning" diskuteras geoteknisk förundersökning och projektering samt injektering för att begränsa infiltration av grundvatten. Här understryks betydelsen av ett genomarbetat geotekniskt underlag som bas för injekteringsarbetena. Förundersökningarna bör sammanställas i ett "geotechnical design summary report" för varje specifikt projekt. För injekteringsarbetena understryks vikten av permeabilitetstester och borrhålsdata. Även betydelsen av en övergripande förståelse för de geologiska förhållandena poängteras, för att erhålla en helhetssyn på hur injekteringsarbetena bör bedrivas.

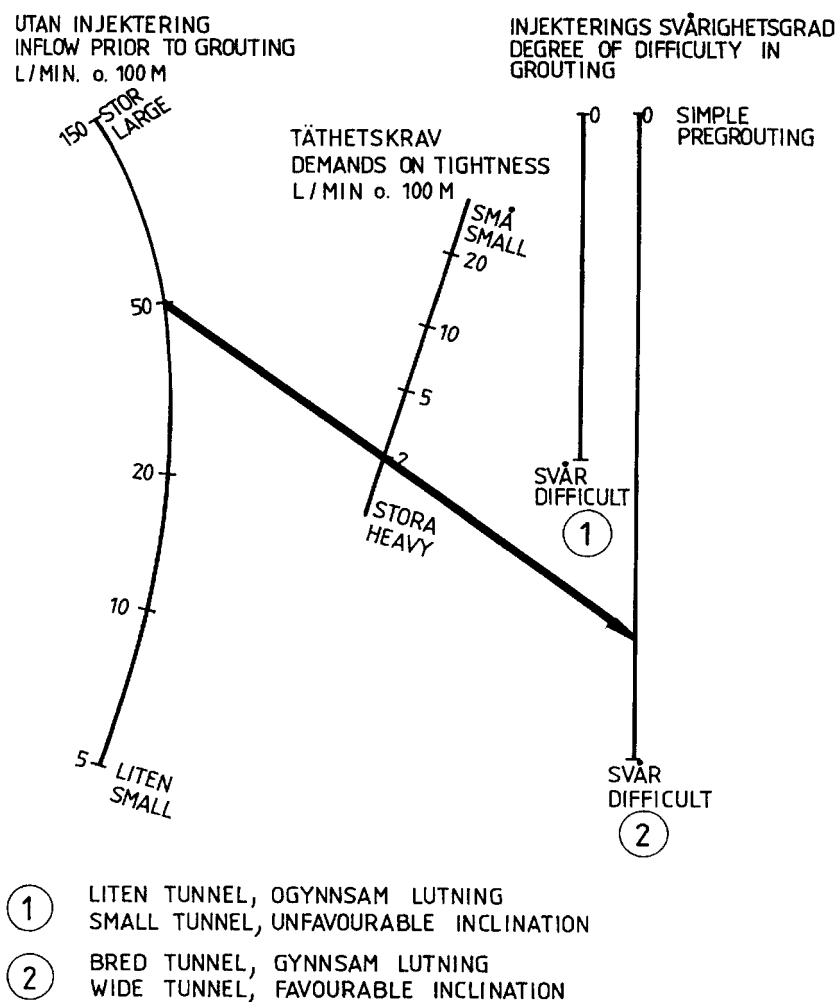
I kapitel 6, "Specifications" beskrivs två typer av specifikationer för anläggningsprojekt, "methods specifications" och "performance specifications". Vid "methods specification" ska entreprenören utföra arbetena enligt en detaljerad beskrivning och anläggningsägaren är ansvarig för det slutliga resultatet. Vid "performance specification" ställs krav på slutresultatet och entreprenören, inte anläggningsägaren, är ansvarig för slutresultatet. Vidare understryks vikten av att den som beskriver krav och utförande av injekteringsarbeten har en god kunskap inom alla aspekter på berginjektering. Det som gör injekteringsarbeten lite speciella är att de, till skillnad från andra specifika-

¹ Krav på tätningseffektivitet [%] = $1 - \frac{(\text{krav på täthet efter injektering})}{(\text{inläckage utan injektering})}$

tioner, måste skrivas så att en maximal flexibilitet finns för modifieringar för att möta aktuella geologiska förhållanden.

I rapporten "Täta tunnlar lagom" /Bergman och Nord, 1982/ behandlas frågeställningar som uppkom vid ett injekteringsseminarium 1978. Kraven kan uppdelas i arbetsplatskrav, funktionskrav och miljökrav. På de ca 20 år som gått sedan rapporten skrevs har täthetskraven successivt ökat varför, kravnivåer baserade på pumpkapaciteter idag i praktiken inte kan sägas vara relevanta, möjligen med undantag för vattentunnlar. Idag är miljökrav och funktionskrav styrande.

Rapporten innehåller även ett linjenomogram som redovisar det principalsamband som råder mellan vatteninläckage utan injektering, täthetskrav och injekterings svårighetsgrad, se figur 2-1. Siffrorna i figuren avser endast att visa storleksordningar.



Figur 2-1. Principalsamband mellan vatteninläckning, täthetskrav och injekteringsproblem. Observera att siffrorna endast avser att illustrera storleksordningar. (Efter Bergman och Nord /1982/.)

Summering av litteraturstudien

För SKB:s del kommer förmodligen pågående bergbyggnadsprojekt och dokumentation från dessa tillsammans med den forskning som pågår, främst i Sverige, att under de närmaste åren ge bättre beslutsunderlag för att ställa relevanta krav på injektering. Ett första steg är att identifiera olika delar av tätningsprocessen för en undermarksanläggning. En ansats till detta uppställd punktvis redovisas nedan:

IDENTIFIERING AV INJEKTERINGSBEHOV

1. Typ av anläggning (funktionskrav).
2. Användningsområde (funktionskrav).
3. Lokalisering (omgivningspåverkan) (miljökrav).
4. Livslängd (funktionskrav).

KRAVNIVÅER PÅ INLÄCKAGE (TÄTHET)

1. Pumpkapacitet för uppfordring av vatten (pumpkapacitet eller driftkostnad) (arbetsplatskrav).
2. Arbetsmiljö i tunnlar, kan tillgodoses genom injektering och/eller inklädnad (arbetsplatskrav).
3. Krav för drift och underhåll av anläggningen (funktionskrav).
4. Omgivningspåverkan av grundvattennivåer (miljökrav).

INJEKTERINGSARBETEN

1. För- eller efterinjektering, kriterium, geometri på skärmar m m (metodik).
2. Injekteringsmedel, cementbaserade, kemisk injektering, kombinationer (inträngningsförmåga, sprickfyllnad, beständighet mm) (materialkrav).
3. Krav på utförande, utrustning, kontroll, dokumentation m m(utrustning).
4. Krav på organisation, bemanning, utbildning, erfarenhet (utförande).

RESULTAT

1. Inläckande vattenmängder (funktionskrav).
2. Påverkan på grundvattennivåer (miljökrav).
3. Drift, underhåll, beständighet (funktionskrav).
4. Kontroll (funktionskrav, miljökrav).

Lokaliseringen av slutförvaret att kunna göras på en plats med goda geologiska förutsättningar. Erfarenheter av hantering av höga grundvattentryck bör finnas i Norge och i Alpländerna. Detta bör undersökas i det fortsatta arbetet med kravspecifikationen.

3 Karakterisering av berg från injekteringssynpunkt

3.1 Allmänt

Delprojektet ”Karakterisering av berg från injekteringssynpunkt” bedrivs vid Geologiska Institutionen, Chalmers Tekniska Högskola sedan april 1996. Delprojektet genomförs av doktorand Åsa Fransson med professor Gunnar Gustafson som handledare.

Diskontinuiteternas geometri och deras fördelning i bergmassan är faktorer av betydelse vid val av injekteringsstrategi. För att öka kunskapen om dessa och om bergmassan i stort kan en mängd karakteriseringsmetoder kombineras och arbetet inom delprojektet ”Karakterisering av berg från injekteringssynpunkt” har främst fokuserat på en av dessa nämligen hydrauliska test eller vattenförlustmätningar. Skälet till att just denna metod valts är att den möjliggör en undersökning av bergmassan bortom tunnelfronten, den är relativt enkel och inte särskilt tidskrävande. Den relativt sett korta tidsåtgången gör att man kan genomföra flera tester vilket är lämpligt med tanke på de stora variationer i exempelvis sprickighet som kan finnas i en bergmassa. Avsikten är naturligtvis att de hydrauliska testerna ska kombineras med andra karakteriseringsmetoder. Målet med arbetet har varit att undersöka om hydrauliska tester är användbara för prediktioner och design vid injekteringsarbeten. Bruksåtgång och resultat ifrån vattenförlustmätningar har jämförts tidigare i andra arbeten och tanken med denna studie var därför att undersöka överensstämmelser och avvikelser för att öka förståelsen för vad som mäts vid en vattenförlustmätning. Nedan följer en kort sammanfattning men hela arbetet återfinns i licentiatuppsatsen ”Grouting Predictions Based on Hydraulic Tests Of Short Duration: Analytical, Numerical and Experimental Approaches” /Fransson, 1999/.

3.2 Bruksåtgång och transmissivitet

Bruksåtgången, V , i en spricka med sprickvidden, b , kan enkelt uttryckas som

$$V = I^2 \pi b = \left[\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right]^2 \pi b^3 \quad (3.1)$$

se exempelvis /Kutzner, 1996/ och /Hässler, 1991/. Ekvationen beskriver att den mängd bruk som sprids radiellt i en spricka är beroende av sprickvidden, b , i kubik, skillnaden mellan injekteringstrycket och grundvattentrycket, Δp , och flytgränsen hos bruket, τ_0 . Även transmissiviteten, T , för en spricka kan uttryckas med hjälp av sprickvidden och uttrycket vilket också kallas ”cubic law” (t ex de Marsily /1986/) visar att även transmissiviteten är beroende av sprickvidden i kubik

$$T = \frac{\rho g b^3}{12\mu} \quad (3.2)$$

I uttrycket ingår också gravitationen, g , och de två parametrarna densitet, ρ , och viskositet, μ , som är vätske- och temperaturberoende. Transmissiviteten kan bestämmas genom Thiems brunnsekvation

$$T = \frac{Q}{2\pi\Delta h} \ln \frac{R_0}{r_w} \quad (3.3)$$

Vid sidan av transmissiviteten, T , och flödet, Q , ingår tryckhöjden, Δh , influensradien, R_0 , och borrhålsradien, r_w , i uttrycket. $Q/\Delta h$ kallas specifik kapacitet.

Inledningsvis gjordes jämförelser mellan bruksåtgång och specifik kapacitet eller transmissivitet genom analytiska och numeriska metoder för att studera hur dessa uttryck följs åt. Dessutom undersöktes geometrin hos en sprickreplik med hjälp av hydrauliska tester. De antaganden som gjordes för samtliga studier var att sprickan saknade fyllnadsmaterial, att den var icke-deformerbar och att vattenflödet var mättat och stationärt. Då sprickan betraktades som en sluten akvifer användes Thiems brunns-ekvation, ekv. 3.3 ovan. Spridningen av bruket behandlades enbart analytiskt och numeriskt utan hänsyn tagen till faktorer såsom filtrering och separation. Arbetet under etapp 1 och 2 kan delas in i fyra delar där en litteraturstudie och en analytisk studie genomfördes under etapp 1 vilka följdes av numerisk modellering och laboratorieexperiment under etapp 2. Den analytiska studien beskrivs här i korthet eftersom den ingår som en del vid analysen av arbetet under etapp 2.

3.3 Analytisk studie

I den analytiska studien beräknades transmissivitet och bruksåtgång för olika geometrier för att kunna jämföra dem och se om de var väl korrelerade. Om en förändrad geometri ger liknande respons både för transmissivitet och bruksåtgång bör vattenförlustmätningar kunna vara till hjälp vid prediktioner av bruksåtgång. Genom att studera hur transmissiviteten förändras vid olika geometrier fås också en ökad förståelse för vad som mäts vid en vattenförlustmätning.

3.4 Numerisk modellering

För den numeriska modelleringen användes en finit-differensmodell med vilken tryckfallet för bruk och vatten beräknades vid simulerad injektering eller vattenförlustmätning i 34 punkter. Som komplement till den analytiska studien möjliggjorde den numeriska modelleringen en undersökning av hur interferens och injekteringsordning påverkade överensstämmelsen mellan specifik kapacitet eller transmissivitet och bruksåtgång. Vid sidan av detta jämfördes även den verkliga geometrin hos modellen med en beskrivning som utgick ifrån de modellerade hydrauliska testerna. De geometriska data som användes i modellen kommer ursprungligen ifrån en verklig spricka men har av Hakami och Larsson /1996/ behandlats statistiskt och fördelats i 5400 punkter över en yta av 445×295 mm. Bruksåtgången modellerades genom att addera ett injekteringstryck, p_g , i en specifik punkt och de hydrauliska testen simulerades genom att i en punkt addera ett flöde, Q , vilket resulterade i en tryckhöjd, h . Tryckets förändring med avstån-

det ifrån den testade punkten beror både för bruket och för vattnet på den omgivande geometrin. Transmissiviteten för hela repliken, T_e , vilken också kallas den effektiva transmissiviteten modellerades också för att få ett värde för jämförelser.

3.5 Experiment, hydrauliska tester

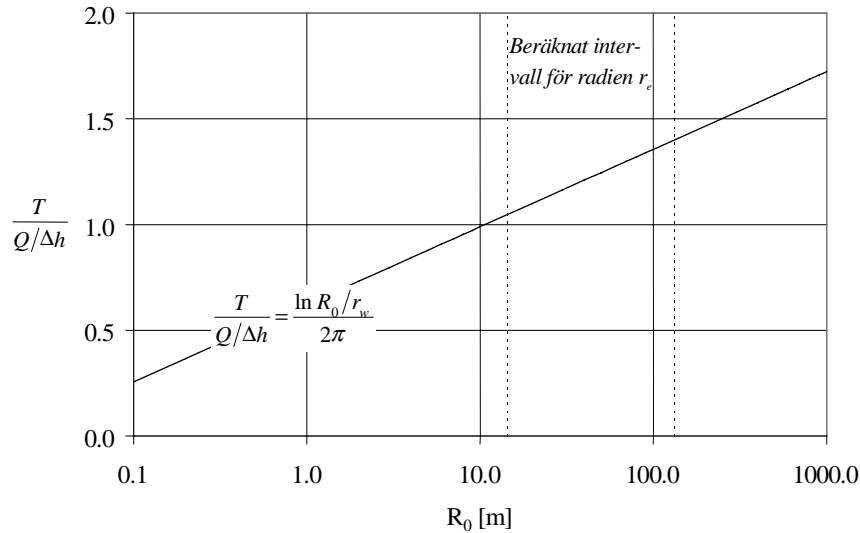
Under experimenten genomfördes hydrauliska tester i en sprickreplik för att se hur väl den hydrauliska beskrivningen överensstämmer med dess verkliga geometri. Tillverkningen av sprickreplik gjordes utifrån samma sprickviddsfördelning som modellen och består av en plan plexiglasskiva fäst på en fräst aluminiumskiva där djupet i varje punkt motsvarar sprickvidden i den punkten. I plexiglasskivan borrades 14 hål för anslutning av slangar för mätning av inflöde och stigrör för mätning av tryckhöjd. Den numeriska modelleringen var användbar både för att underlätta designen av repliken men främst användes dessa resultat för att kunna göra jämförelser med laboratorieresultaten. Under experimenten uppmättes flödet, Q , för tre olika tryckhöjder i de 14 hålen för att kunna kontrollera huruvida flödet var laminärt eller turbulent. Vid experimenten såväl som vid modelleringen utvärderades transmissiviteten för hela sprickreplik, T_e .

3.6 Analys

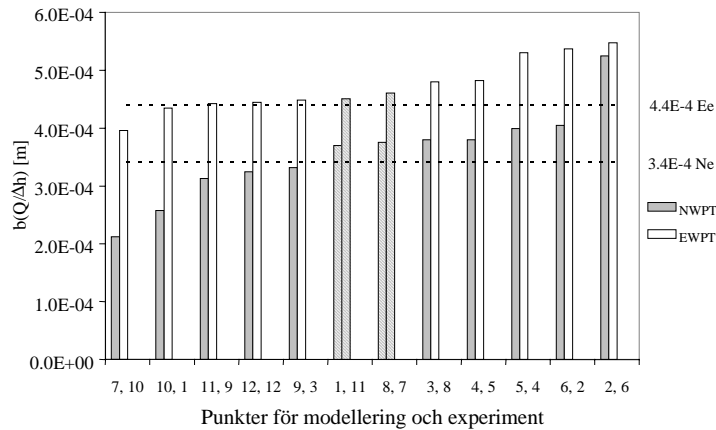
Enligt den analytiska studien och den numeriska modelleringen var bruksåtgång och transmissivitet ofta väl korrelerade. För den analytiska studien förhöll det sig på detta sätt för relativt stora skillnader i sprickvidd, för olika randvillkor och för varierande avstånd till den förändrade sprickvidden eller randen. Den största avvikelser återfanns när borrhålet träffade sprickan där vidden var *lokalt* extremt stor eller extremt liten relativt omgivningen. Ordet *lokalt* måste i det här fallet relateras till inträngningslängden för bruket då en liten sprickvidd kombinerat med en kort inträngningslängd kan ge en god korrelation mellan bruksåtgång och transmissivitet alltmedan denna blir sämre för en ökad inträngningslängd bortom denna mindre sprickvidd.

Vanligtvis är en mindre del av bergmassan av intresse vid injekteringsarbeten vilket bör vara förenligt med ett korttidstest. En nackdel med en utvärdering av transmissiviteten enligt Thiems brunnsekvation, ekv. 3.3, är att influensradien, R_0 , är en okänd parameter. För att undersöka om enbart den specifika kapaciteten, $Q/\Delta h$, som också ingår i uttrycket, är tillräckligt robust för att beräkna en sprickvidd, b , beräknades uttrycket, $\ln(R_0/r_w)/2\pi$, för olika värden på influensradien, se figur 3-1.

Borrhålsradien är för beräkningen 0,02 m och influensradien, R_0 , är mellan 0,1 och 1000 m. Detta förutsätter stationärt tillstånd men även om detta inte uppnås så bör tiden för testet vara tillräcklig för att uppnå pseudo-stationärt tillstånd (t ex Carlsson och Gustafson /1991/). Vid en sådan approximation kan radien, r_e , betraktas som en influensradie (egentligen avståndet för skärningen mellan en extrapolerad avsänkingskurva och avståndssaxeln i halvlogaritmisk presentation). Den streckade linjen i figur 3-1 visar intervallet för r_e för en transmissivitet mellan 10^{-10} – 10^{-1} m²/s och en pumptid på 120 s. Beräkningen av r_e gjordes i det här fallet utifrån en regressionsanalys för transmissivitet, T , och magasincoefficients, S som presenteras i /Rhén m fl, 1997/. Som figuren visar



Figur 3-1. Kvoten mellan transmissivitet, T , och specifik kapacitet, $Q\Delta h$, (egentligen $\ln(R_0/r_w)/2\pi$) enligt Thiems brunnsekvation). Den streckade linjen visar ett beräknat intervall för radien, r_e , vid pseudo-stationärt tillstånd för en transmissivitet av 10^{-10} – $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$. Brunnradie, r_w , 0,02 m; pumptid, 120 s.



Figur 3-2. Sprickvidder beräknade utifrån specifika kapaciteten vid den numeriska modelleringen, NWPT, och vid experimenten, EWPT. Numreringen av borrhålen för modell respektive experiment visas på x-axeln, de ljusare staplarna visar sprickviddens medianvärden och de streckade linjerna de effektiva sprickvidderna.

får kvoten $T/(Q/\Delta h)$ enligt beräkningen ett värde mellan 1,0 och 1,5 för det intervall som presenteras i figuren ($r_e \approx 10\text{--}100\text{ m}$) vilket innebär att den specifika kapaciteten har ett värde nära transmissiviteten. Motsvarande analys med borrhålsradien för experimenten, $r_w = 0,002\text{ m}$, ger även den en specifik kapacitet nära transmissiviteten.

Vid en jämförelse mellan den specifika kapaciteten ifrån experimenten och ifrån den numeriska modelleringen är de experimentella värdena ungefär två gånger större än de modellerade. Värdena är dock relativt väl korrelerade och variationerna i sprickvidd inom repliken identifieras. Detta innebär att det kan röra sig om ett systematiskt fel såsom skillnader i tortuositet eller mindre avvikelser i sprickvidd mellan modellen och repliken. Figur 3-2 visar de sprickvidder som beräknats utifrån den specifika kapaciteten för den numeriska modellen, NWPT (Numerical Water Pressure Test), och experimenten, EWPT. Dessa värden jämförs i figuren med de sprickvidder (streckade linjer i figuren) som beräknats med de effektiva transmissivitetsvärdena dvs transmissiviteten för hela modellen, b_{Ne} , och för hela sprickrepliken, b_{Ee} .

Överensstämmelsen mellan mediansprickvidden och den effektiva hydrauliska sprickvidden för både modelleringen och experimenten ger en indikation om att median-sprickvidden kan användas för att säga något om den effektiva hydrauliska sprickvidden. I figuren presenteras de beräknade sprickvidderna för att visa skillnaderna i vidd mellan modell och experiment, men det ursprungliga medianvärdet för den specifika kapaciteten skulle på motsvarande sätt säga något om den effektiva transmissiviteten.

4 Spridningsmekanismer vid injektering i berg

4.1 Allmänt

Delprojektet ”Spridningsmekanismer vid injektering i berg” bedrivs vid Avdelningen för jord- och bergmekanik, Kungliga Tekniska Högskolan sedan hösten 1996. Delprojektet genomförs av doktorand Magnus Eriksson med professor Håkan Stille som handledare.

Arbetet inom detta delprojekt har i oktober 1999 presenterats i en licentiatavhandling vid Avdelning för jord- och bergmekanik vid KTH. För en mer detaljerad beskrivning av arbetet hänvisas till licentiatavhandlingen /Eriksson, 1999/.

Arbetet under etapp 2 har huvudsakligen varit laborationsförsök samt utveckling av ett beräkningsverktyg för att beskriva bruksspridningen. Arbetet har också innefattat att sammanfatta erhållna kunskaper i en konceptuell modell avseende beskrivningen av tätningseffektivitet och prediktion av injekteringsresultatet.

Arbetet med laborationsförsöken, den numeriska modellen och den konceptuella modell beskrivs i de följande avsnitten.

4.2 Laborationsförsök

4.2.1 Allmänt

Tre serier med laborationsförsök har utförts. Det första avsåg filtreringens påverkan på flöde och inträngningslängd. Det andra försöket var liknande men med ett mothållande vattentryck och syftade till att studera filtrering, separation och utspädning av bruksfronten. I det tredje utfördes injekteringsförsök på en sprickreplik.

4.2.2 Försöksserie 1: Filtreringens påverkan på flöde och inträngningslängd

I försöksserien, som innehöll 6 enskilda försök med i princip samma laborationsuppställning, pressades bruket genom ett plaströr till en förträngning med tre tunna slangar. Slangarna var av diametrarna 0,58 mm, 0,86 mm och 1,77 mm. Efter att bruket härdat togs prover av rör och slangar och bruket i dessa densitetsmättes. Resultaten visar att en filtrering ägt rum genom att en förhöjd densitet kunde noteras i röret och en minskad i slangarna /Eriksson, 1998/.

Registreringen av inträngning mot tiden visade generellt ett snabbare inträngningsförlopp än vad en ren Bingham modell ger. Tillika erhöles generellt en ökad inträngningslängd. Den tolkning som gjorts är att filtrering ändrar brukets reologiska egenskaper i enlighet med den densitetsförändring som redovisats ovan. Vid analysen av försöken kunde påvisas att om de reologiska egenskaperna ändrades i enlighet med densitetsmätningarna erhöles en bättre simulering av inträngningen än då initellt uppmätta egen-

skaper användes. Försöket gav ett underlag för en prediktiv modell avseende filtreringens påverkan vilken presenteras i avsnitt 4.3.

4.2.3 Försöksserie 2: Injektering mot ett vattentryck

I detta försök injekterades en uppställning som var lik den som användes i den första försöksserien. Injekteringsbruket pressades genom ett rör till en förträngning med samma typ av slangar som beskrivits ovan. Innan försöket startade vattenfylldes systemet och injektering utfördes mot ett vattentryck. Försöket syftade till att studera filtrering, separation och utspädning av fronten. Det kunde dock inte påvisas att någon filtrering ägt rum vilket bedöms bero på att ett mer finmalt bruk än i försöksserie 1 användes.

Avseende resultaten rörande separation och utspädning bedöms inte att någon betydande skillnad på inträngningsförloppet ägt rum. Ett oväntat resultat erhöles i det att så kallad ”slip” kunde påvisas vid inträngningen i de fina slangarna. Slip är när brukspelaren glider längs begränsningsytorna, och det grundläggande randvillkoret med noll hastighet därmed ej gäller.

4.2.4 Försöksserie 3: Injektering i en sprickreplik

Försöksserie 3 utfördes i den sprickreplik som tagits fram och använts av delprojektet ”Karakterisering av berg från injekteringssynpunkt”. Försöket syftade till att verifiera den numeriska modellens beskrivning av flöde och inträngningslängd i en sprickgeometri.

Försök utfördes i fyra punkter på repliken och inträngningen av bruk registrerades med en videokamera. Vid analysen av försöken beräknades först flöde av vatten vilket kunde jämföras med de försök som gjorts av ”Karakterisering av berg från injekteringssynpunkt”. Beskrivningen av bruksinträngningen med den numeriska modellen gav som resultat att, med hänsyn tagen till den osäkerhet som finns avseende sprickreplikens viddfördelning, erhöles en god överensstämmelse mellan laborationsförsöken och simuleringarna.

4.3 Beräkningsverktyg för beräkning av bruksspridningen

Arbetet med att utveckla ett beräkningsverktyg för att beskriva bruksspridning och beräkna tätningseffektivitet har utförts parallellt med laborationsförsöken. Den grundläggande matematiken baseras på /Hässler, 1991/ men har kompletterats med villkor för separation och filtrering av bruket. Vidare har en rutin som genererar ett kanalnätverk där vidden på de individuella kanalerna representerar en sprickas aperturfördelning.

Spridningen av bruk beräknas i ett kanalnätverk som representerar en spricka eller ett mindre system av sammanhängande sprickor. Genereringen av kanalnätverket baseras på statistiska indata rörande sprickvidd och korrelation. Indata består även av rådande grundvattentryck och stupning på sprickytan.

Filtreringen beräknas baserad på två mätbara egenskaper hos bruket, kritisk vidd (b_{cr}) och en filtrerings faktor (F_f). Dessa parametrar kan bestämmas med mätningar med exempelvis filterpumpen med olika maskvidder och vid olika tider.

Ekvation 4.1 ger en prediktion av förändrade bruksegenskaper baserat på vidden hos en enskild kanal. Baserat på de förändrade bruksegenskaperna kan även brukets förändrade reologiska egenskaper uppskattas vilket ger en bättre beskrivning av inträngning av bruket. Det av /Hansson, 1998/ angivna volymkriteriet används för att förutsäga om flödet stoppas på grund av pluggbildning.

$$\rho = \rho_{ini} \cdot \left(\frac{b}{b_{cr}} \right)^{F_f} \quad b_{min} < b < b_{cr} \quad (4.1)$$

Separationen betraktas framför allt ha betydelse för tätheten i ett injekterat sprickplan. I beräkningarna tas hänsyn till den separation som kan uppträda i olika geometrier och den resulterande konduktivitet detta kan ge. I /Eriksson m fl, 1999/ beskrevs hur separationen dels är volymberoende och dels geometriskt beroende. Volymberoendet gör att separation bör mätas i mindre provkroppar än vad standarden anger. Det geometriska beroendet hos separationen kan betraktas med ekvation 4.2 som anger att separationen beror av lutningen (α) på kanalen.

$$Sep = Sep_{ini} - Sep_{ini} \cdot \left(\frac{\tan(\alpha)}{2} \right) \quad (4.2)$$

Då spridningen av bruk i geometrin beräknats kan injekteringens resultat utvärderas i programmet. Detta görs med en särskild rutin som beräknar antingen reduktion av inflöde till ett eller flera borrhål eller flödet från en rand till en annan. Denna utvärdering avseende tätningseffektivitet beskrivs vidare i den konceptuella modellen.

4.4 Konceptuell modell avseende tätningseffektivitet och prediktion av inläckage

De kunskaper som erhållits under arbetet under den andra etappen har sammanfattats i en konceptuell modell för beräkning av tätningseffektivitet och prediktion av inläckage till en tunnel. Bakgrunden till modellen är de beskrivningar av sprickgeometrin, filtreringsstabiliteten och separationen som tagits fram.

Tätningseffektiviteten, dvs den reduktion av permeabilitet eller konduktivitet som erhålls vid injekteringen, betraktas som en fiktiv parameter för att avgöra rätt bruksval i en given injekteringssituation. Tätningseffektiviteten anges i procent och resultatet av en beräkning avseende tätningseffektivitet för två olika bruk kan exempelvis ge att Bruk A visar en tätningseffektivitet om 90 % och att Bruk B visar 70 %. Baserat på detta kan Bruk A anses vara ett bättre bruksval i den aktuella geometrin. Beräkningen av tätningseffektivitet baseras på de beskrivningar av filtrering och separation som presenterats under avsnitt 4.3. Bruk och vatten beskrivs ha olika flödesareor i sprickplanet och filtreringens och separationens inverkan på den erhållna tätheten beräknas med ekvation 4.1 och 4.2.

Ett exempel på beräkning av tätningseffektiviteten visas nedan. Spridningen har beräknats för tre olika bruk i samma geometri. Bruken skiljer sig framför allt avseende filtreringsstabilitet men även något i de reologiska egenskaperna. Tabell 4-1 visar indata avseende bruksegenskaperna och figur 4-1 spridningen. I tabell 4-2 redovisas beräknad tätningseffektivitet för de olika bruken.

Tabell 4-1. Indata avseende bruksegenskaper till beräkningsexemplet.

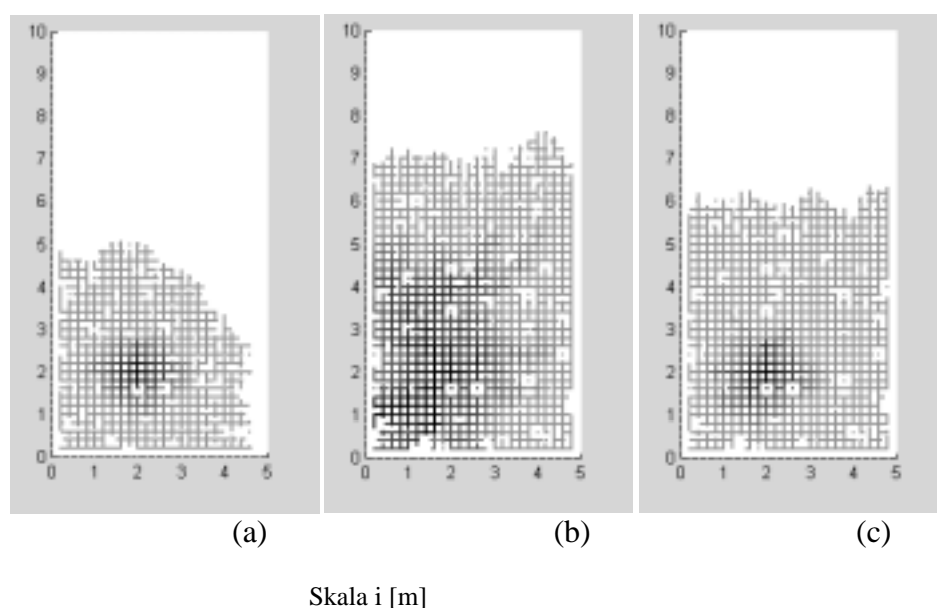
Bruk	Flytgräns (Pa)	Viskositet (Pas)	b_{cr} (mm)	Separation (%)
1	1,4	0,11	0,16	0
2	0,6	0,02	0,10	0
3	0,1	0,02	0,14	2,5

Tabell 4-2. Resultat avseende tätningseffektivitet. Bruk 2 uppvisar bäst resultat.

Bruk	Tätningseffektivitet (%)
1	71
2	96
3	83

Mot bakgrund av tätningseffektiviteten kan en prediktion av inläckage till en tunnel göras om bergmassans sprickfördelning och sprickfrekvenser betraktas. Exempelvis kan en dylik prediktion av inläckage rörande en tunnelsträcka resultera i att ett inläckage på 10 liter/min förväntas på en 100 m sträcka.

Den konceptuella modellen beskrivs mer detaljerat i /Eriksson, 1999/.



Figur 4-1. Grafiska bilder som visar spridningen vid stoppläget (2400 s) för (a) Bruk 1, (b) Bruk 2 och (c) Bruk 3. Svart "bruk" visar bruk opåverkat av filtrering och bruk i gråskala är i olika grad påverkat av filtrering.

5 Förinjekteringens stabiliserande och tätande verkan

5.1 Allmänt

Delprojektet ”Förinjekteringens stabiliserande och tätande verkan” har bedrivits vid Chalmers Tekniska Högskola.

Målet för arbetet i etapp 2 har varit att skapa ett teoretiskt underlag för modellering av svaghetszoners uppträdande under inverkan av olika förstärkningssystem i kombination med förinjektering av zonen. Alternativet frysning har också studerats för en grusvittrad zon.

Tre typer av svaghetszoner studerats:

- Zon med blockigt berg och med relativt hög transmissivitet.
- Leromvandlad zon med svälltryck.
- Grusvittrad zon med hög transmissivitet och utan kohesion.

De två senare materialen påträffas sällan i verkligheten i renodlad form. Anledningen till att dessa ändå har studerats är att de kan betraktas som två ytterlighetsfall för de problem man kan stöta på vid tunneldrivning genom svaghetszoner. Det första fallet är tänkt att illustrera en mer verklighetsbaserad svaghetszon med block av varierande storlek och sprickplan däremellan.

Endast förstärkningar i drivningsskedet har studerats. Det har förutsatts att en betong-inkludnad eller dylikt installeras som permanentförstärkning genom zonen.

Vid passage av svaghetszoner måste tätnings- och stabiliseringsåtgärderna integreras med varandra. En i och för sig lyckad förinjektering av zonen skulle vid otillräckligt förstärkt drivning kunna skadas av alltför stora deformationer. Även den ”naturliga” (oinjekterade) transmissiviteten hos bergmassan i zonen ökar på grund av dilatans i materialet. Dilatans är volymökning på grund av rörelse i bergmassan.

5.2 Litteraturstudier

Etapp 1 innebar en relativt omfattande genomgång av kunskapsläget i internationell litteratur, speciellt med avseende på passage av svaghetszoner.

Som en bakgrund till arbetet under etapp 2 gjordes en ytterligare genomgång av litteraturen avseende analytiska och numeriska beräkningsmetoder för mekaniskt uppträdande av hålrum i elastiska och elastoplastiska media, GRC-metodik (Ground Reaction Curve) m m.

5.3 Konceptualisering

En tankemodell har upprättats för hur en svaghetszon i hård berggrund fungerar mekaniskt och hydrauliskt. Ett antal förenklade antaganden har gjorts:

- Cirkulärt tunneltvårsnitt.
- Isotropt in situ-spänningsfält i omgivande bergmassa.
- Svaghetszonen brantstående och vinkelrät mot tunneln.
- Homogen och isotrop bergmassa i svaghetszonen.

Beräkningsmodellerna är baserade på Mohr-Coulombs brottvillkor. Plant spänningstillstånd antas råda i det tvärsnitt som analyseras. Ingen stabiliserande verkan på tvärsnittet förutsätts av närliggande tunnelgavel eller av fast sidoberg utanför svaghetszonen. Brottillstånd antas inträffa samtidigt överallt i den plasticerade zonen.

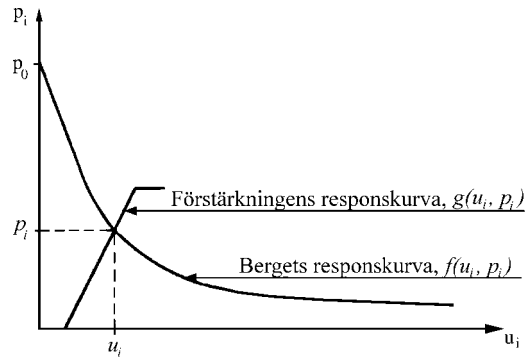
I en zon med blockigt berg med hög transmissivitet förväntas problem med såväl inläckage av vatten som stabilitet. Injektering utförs för att stoppa inläckage av vatten och dess mekaniska effekt beaktas i beräkningarna.

Det är troligen inte möjligt att utföra injektering i en leromvandlad zon med svälltryck eftersom materialet har låg porositet och är lågpermeabelt, vilket förhindrar inträngning av injekteringsmaterial.

Även om det kanske är möjligt att skapa en injekteringsskärm runt tunneln i en grusvittrad zon med hög transmissivitet och utan kohesion för att åstadkomma dels en tätning, dels en förstärkning, är det däremot praktiskt svårt att kontrollera genomförandet. Risken är stor att fickor bildas dit injekteringsmaterialet inte når. Därmed skulle såväl valvverkan som tätande verkan kunna gå förlorad. Frysning fungerar både som förstärkning och tätning mot vattenläckage. Om det finns ett vattenflöde i zonen är det nödvändigt att injektera materialet före frysning för att minska risken för så kallad termisk erosion, vilken bryter ner eller förhindrar utbredning av den frysta zonen. Denna injektering tillgodoses inte i fryszonens stabiliserande inverkan.

Bergmassans responskurva (GRC) beskriver hur tunnelväggen deformeras vid olika tryck mot densamma, utan hänsyn till installerad förstärkning. Förstärkningens responskurva beskriver hur lasten på förstärkningen, räknad per ytenhet, påverkas av tunnelväggens rörelser. Genom att sammanställa dessa två samband analytiskt eller grafiskt erhålls tunnelväggens deformation och belastningen på förstärkningen i det aktuella fallet, se figur 5-1.

Förstärkning av tunnlar i svaghetszoner kan ske med stålbågar, sprutbetong, sprutbetongbågar, rörspiling och bultar (t ex ändförankrade, ingjutna eller friktionsbultar). Även kombinationer av olika förstärkningsmetoder har studerats.



Figur 5-1. Bergmassans responskurva $f(u_i, p_i)$ och förstärkningens responskurva $g(u_i, p_i)$. (Reviderad efter Stille, /1984/.)

5.4 Numerisk modellering

Numeriska beräkningar har utförts i det finita differens-programmet FLAC 3.4.

Bultar har simulerats med sk kabelement medan stålågar och sprutbetong simulerats genom användning av sk balkelement. Beräkningar med injektering har gjorts genom att tilldela en del av elementnätet materialparametrar för den injekterade bergmassan.

Beräkningarna utfördes genom att skapa ett inre tryck i hålrummet och successivt minska detta, från det yttre bergtryckets värde till noll. Detta har gjorts genom att ansätta reaktionskrafter mot tunnelväggen och gradvis minska dessa. Bergförstärkningarna har installerats efter att en del av spänningsrelaxationen har skett. Valet av tidpunkt för installation av förstärkning har baserats på studier av responskurvor och uppkomna spänningar i förstärkningen. Vid en viss storlek på de inre reaktionskrafterna accelererar tunnelväggens deformation hastigt, varför förstärkningen måste installeras innan detta skede uppnås. Det är också nödvändigt att optimera insättningen med avseende på spänningar så att inte förstärkningens hållfasthet överskrids.

Genom att utföra beräkningarna på det här sättet har responskurvor (GRC) för de olika beräkningsfallen skapats. Dessa har sedan jämförts med responskurvor beräknade med analytiska samband.

5.5 Analytiska och numeriska beräkningar

Beräkningar utfördes för en cirkulär tunnel med radien 2,5 meter på ett ungefärligt djup av 500 meter under markytan och utsatt för en gravitationsbetingad spänning på 13 MPa.

Svaghetszonerna antogs brantstående med en strykning ungefär vinkelrätt tunnelns axel. Beräkningarna utfördes på tvärsnitt genom tunneln utan hänsyn till svaghetszonens utsträckning.

Inför de analytiska och numeriska beräkningarna gjordes en rimlig uppskattning av de olika svaghetszonernas och förstärkningarnas materialparametrar. Dessa framgår av tabell 5-1 sist i avsnittet.

I zonen med blockigt berg motsvarar bergmassans elasticitetsmodul ungefär ett RMR-värde på 55–60, vilket innebär relativt dåligt berg. Vid injektering av en blockig bergmassa är förbättringen av materialet generellt sett större ju sämre utgångsmaterialet är. Kohesionen och friktionsvinkeln i sprickplanen sänks eller, i bästa fall, förblir oförändrade som en följd av injekteringen. På basis av erfarenheter från pågående forskning vid CTH har värdena på dessa parametrar antagits vara oförändrade medan styvheten, uttryckt som elasticitetsmodul, har höjts något. Utförda beräkningar visar att injekteringen i princip inte påverkar deformationerna och spänningarna i bergmassan jämfört med en tunnel förstärkt med endast sprutbetong och bultar. Tunnelväggens totala deformation sänks endast marginellt vid ökande elasticitetsmodul, kohesion eller friktionsvinkel. Responskurvorna för de olika parametervärdena på elasticitetsmodul och kohesion sammanfaller i princip. Intressant att notera är att en ökande friktionsvinkel emellertid sänker responskurvan i högre grad efter utbildad elastisk deformation. Skillnader i friktionsvinkel påverkar den injekterade zonen mekaniska beteende mer än vad skillnader i elasticitetsmodul och kohesion gör.

För den leromvandlade zonen antogs en bergmassem modul på 2,5 GPa, vilket motsvarar $RMR \cong 25$ och $Q \cong 0,05$. I detta fall anger RMR-systemet dåligt berg med krav på korta indrifter på ca 1 m och förstärkning samtidigt med eller innan bergtagget (förbultning med bågar, eller dylikt). Q-systemet anger berget som mycket dåligt med stora driftförstärkningskrav. På grund av lervittringen är friktionsvinkeln kraftigt nedsatt. Beräkningsresultaten visar att vid sekventiellt tunneluttag uppträder förstärkningen i galleriet slakt (ej sluten ring) och utsätts för stora spänningar och moment vid uttag av inverten. Deformationerna blir också relativt stora och icke-kontinuerliga. Om tunneln istället tas ut med fullortsdrivning uppträder förstärkningen betydligt styvare eftersom den omedelbart sluts längs tunnelperiferin och stufområdet uppträder därmed styvare. Påkänningarna i liningen blir trots detta endast marginellt större och deformationerna betydligt lägre än vid sekventiellt uttag.

Den grusvittrade zonen representerar ett fall där mekanisk påverkan gett ytterligare nedbrytning av blocken till mindre fragment. Modulen 10 GPa motsvarar $RMR \cong 50$ och $Q \cong 2$ eller relativt dåligt till dåligt berg. Teoretiskt sett är det möjligt att skapa en injekteringsskärm runt tunneln för att åstadkomma dels en tätning dels en förstärkning. Praktiskt sett är det däremot svårt att kontrollera genomförandet. Risken är stor att fickor bildas dit injekteringsmaterialet inte når. Därmed går både valvverkan och den tätande verkan förlorad. Tunnelldrivning genom den här typen av svaghetszon bedöms, både med avseende på stabilitet och täthet, som mycket komplicerad varför frysning har betraktats som ett möjligt alternativ. Frysningen fungerar både som förstärkning och tätning mot vattenläckage i drivningsskedet.

Genomförda beräkningar utfördes för en tunnel belägen betydligt grundare än övriga beräkningsfall.

Enligt teorin /Berggren, 1983/ är det inte möjligt att tillämpa metoden med frysning på så stora djup som 500 meter under markytan under antagandet att de rådande in situ-spänningarna i bergmassan ansätts som last på den frysta konstruktionen. Spänningarna blir i ett sådant fall alltför stora, vilket kräver orimligt låga temperaturnivåer vid frysningen för att erhålla en fryst zon med tillräcklig mäktighet. Beräkningar har utförts på

djupet 100 meter under markytan där in situ-spänningarnas storlek antagits vara 3 MPa. I ett verkligt fall är det nödvändigt att utföra laboratorieförsök på det frysta materialet för att bestämma deformations- och hållfasthetsegenskaperna. Beräkningsresultaten visar tydligt att töjningarna minskar med lägre temperatur. Detta beror på att hållfastheten hos den frysta konstruktionen ökar med minskande temperatur för samma ständig och omgivande tryck.

Tabell 5-1. Materialparametrar i oförstärkt berg för de olika svaghetszonerna.

Parameter	Zon med blockigt berg	Injekterad zon med blockigt berg	Leromvandlad zon	Grusvittrad zon
E (Gpa)	15	20	2,5	10
v (-)	0,20	0,20	0,30	0,35
c (Mpa)	0,2	0,2	0,2	0
c _r (Mpa)	0,15	0,15	0,15	0
φ (Grader)	35	35	10	35
φ _r (Grader)	30	30	8	30
ψ (Grader)	15	15	10	15
Psväll (Mpa)	–	–	2	–

6 Cementbaserade injekteringsmedel

Delprojektet ”Cementbaserade injekteringsmedel” är delat i tre delar. Delprojekten ”Inventering och karakterisering av material” och ”Beständighet och kemisk stabilitet” har bedrivits av Björn Lagerblad vid Cement och Betong Institutet, CBI. Delprojektet ”Filtreringsstabilitet” har bedrivits av Pär Hansson, senare Daniel Eklund, vid Vattenfall Utveckling AB.

6.1 Inventering och karakterisering av material

6.1.1 Allmänt

Under etapp 2 har vi huvudsakligen arbetat med att undersöka finmalda cement med olika typer av superplasticerare och acceleratorer. Undersökningarna har begränsats till finmalda cement då dessa ger bäst inträngningsförmåga i tunna sprickor. Vi har också koncentrerat oss på stabila bruk, dvs. bruk med ett så lågt vct att man får en tät pasta och slipper separation i sprickorna.

Undersökningarna har skett i laboratorium. Syftet har varit att undersöka de styrande variablerna och kvantifiera egenskaperna hos injekteringsbruket med avseende på rörlighet, tillstyvnad och bindetid.

I den första omgången försök använde vi ett finmalet cement från CEMENTA. Detta cement får en bra rörlighet men bindetiden blir lång, över 10 timmar, vilket kan ge problem med utspolning i transmissiva zoner. Med hjälp av acceleratorer kan man få ned bindetiden till ca 5 timmar men bruket tillstyvnar då snabbt vilket kan ge problem med inträngningen. Därför har vi i en andra omgång fortsatt med snabba cement och testat deras egenskaper. Arbetet visar att de snabba finmalda cementen har problem med sulfat/aluminat-systemet. Man får då lätt en sk falsk bindning genom att ett överskott på aluminatjoner relativt sulfatjoner medför att det faller ut kalciumaluminathydrater som får massan att stelna utan att binda på riktigt. Den falska bindningen kan emellertid användas för att tillfälligt stoppa flödet så att själva cementet hinner binda. Tillstyvnad och bindetid är svårstyrd varför dessa cement kräver noggrann kvalitetskontroll. Vid korrekt användning och formulering av recept skulle de emellertid bättre klara de transmissiva zonerna än långsamma cement med acceleratorer. Arbetet med de snabba cementen är ännu inte klart men resultaten hittills tyder på att dessa bättre skulle klara de transmissiva zonerna än de långsamma med acceleratorer.

Dessa cement tillhör två olika kategorier av cement och erfarenheterna är därför generella för andra kommersiella produkter än de vi testat.

6.1.2 Reologi och superplasticerare

Superplasticerare/flytmedel är ytaktiva medel som håller cementpartiklarna isär. Det finns en stor mängd olika typer av superplasticerare på marknaden. Utvecklingen för att ta fram nya alltmer sofistikerade produkter med speciella egenskaper går snabbt och nya produkter introduceras hela tiden. Generellt tas de dock fram för att fylla behov inom

byggnadsindustrin och man måste därför noga överväga vilka egenskaper som kan utnyttjas för att styra injekteringsmedlen.

Superplasticerarnas uppbyggnad, dvs. kemiska beståndsdelar, molekylvikt, kedjelängd, förgreningar av sidokedjor och typ av aktiv substans påverkar deras verkningsätt. De verkar bland annat genom kombinationer av olika stabiliseringsmekanismer, varav de två viktigaste är elektrostatiske och steriska stabilisering. De äldre typerna är huvudsakligen baserade på melaminer och naftalener som adsorberas på cementkornen och fungerar elektrostatiske, dvs. alla cementpartiklarna får negativt laddade joner vilket repellerar dem. Försöken visar att dessa relativt snabbt tappar effekt då de byggs in i cementets tidiga reaktionsprodukter. De nyare typerna av superplasticerare, som är baserade på polymerer med mycket längre kedjor, verkar främst genom sterisk stabilisering. Dessa produkter adsorberas inte lika mycket utan fungerar mera genom att lägga sig mellan partiklarna och trycka dem isär genom osmotiska processer. Detta medför att dessa medel fungerar bäst vid låga vct eller med finmalda partiklar som vid samma vct ligger tätare. Generellt gäller att längre kedjor möjliggör en tätare partikelpackning. En annan effekt är att de nyare medlen inte tappar sin dispergerande effekt lika snabbt antagligen beroende på att de inte i lika hög grad sitter bundna på ytorna.

Alla de olika superplasticerarna har en optimal halt för rörlighet och överdosering ger ingen extra effekt förutom att de förlänger bindetiden. Man kan ofta få samma flytbarhet med de äldre elektrostatiske verkande medlen men det kräver mycket större doseringar men bindetiden förlängs avsevärt. Flytförmågan och även bindetiden påverkas olika av olika superplasticerare då man går ner i temperatur. De nyare steriska medlen påverkades mera än de äldre elektrostatiske av sänkt temperatur.

De snabbhärdande portlandcementen har högre alkali-, C_3A och SO_3^- -halt. Detta ger andra typer av ytor och en annan porvattenkemi. Det är svårt att uppnå samma flytbarhet med detta cement speciellt vid låga vct. De steriskt verkande nyare superplasticerarna hade betydligt sämre effekt och förlängde bindetiden markant. De med de längsta polymerkedjorna som var bäst för de äldre medlen när det gällde de långsamma cementen var här sämst. Antagligen beror det på den ändrade jonstyrkan och att C_3A -komponenten adsorberar för mycket av de steriska medlen.

6.1.3 Bindetid och acceleratorer

Med bindetid menas normalt den tid som det dröjer tills cementets huvudbeståndsdel, kalciumsilikaterna, börjar reagera på allvar. Man kan här mäta en temperaturstegring som är kopplad till en hållfasthetstillväxt. Perioden innan bindning kallas öppethållandetid och är viktig för att betong inte ska stelna innan gjutning. Injekteringsmedlen består av vanlig cement som malts finare. De följer alltså samma egenskapsförändringar som cement i betong. Finmalningen och den större ytan påverkar öppethållandetiden mycket lite men den ger en snabbare styrketillväxt när väl bindningen startat. Öppet-hållandetiden beror på att det bildats en tunn hinna av hydratprodukter på ytan som måste brytas upp innan huvudreaktionen sker.

Det sker emellertid reaktioner innan den verkliga bindningen. Framför allt så reagerar aluminaterna (C_3A) betydligt snabbare än de kalciumsilikater som står för huvudbindningen. Skillnaden mellan de långsamma och snabba cementen ligger därför främst i halten C_3A . För att betong inte ska tillstyvna för snabbt tillsätter man sulfater i form av gips så det bildas ettringit i stället för kalciumaluminiumhydrat. Dessa reaktioner påverkar inte den verkliga bindningen. Utan gips/sulfat ger C_3A en tidig s k falsk bindning.

Tillstyvnad och bindning går något snabbare vid lägre vct. Lägre vct kräver emellertid större mängd superplasticerare varför deras retarderade effekt måste vägas in. Bindetiden förlängs vid lägre temperatur.

Försök har visat att bindetiden vid bergtemperatur normalt är över 10 timmar för de långsamma och över 5 timmar för de snabba finmalda cementen. Försök med acceleratörer visar att man kan sänka bindetiden för de långsamma cementen till ca 5 timmar men att detta ger en förstyvning som klart försämrar rörligheten. De snabba cementen har en klart bättre rörlighet fram till bindning. Vi har ännu inte testat effekten av acceleratörer på de snabba cementen men man kan anta att de även här ger en förstyvning.

När vi undersökte de kommersiella snabba bindemedlen visade det sig att de i sina produktblad blandat samman bindetid och förstyvning. Vad de kallar bindetid är aluminatreaktionen som givit en förstyvning medan den verkliga bindningen dröjt ytterligare ett antal timmar. Med tillräcklig mängd C_3A kan dock bruket bli relativt styvt och starkt. Vid undersökning av ett cement, Rheocem 800 från Blue Circle, så gav olika cementomgångar olika resultat vilket visar att systemet är känsligt. I vanliga snabba cement har man inte detta problem vilket indikerar att det är själva den extra malningen som ändrat de kemiska villkoren.

I ett annat cement, Rock-U från Dyckerhoff, utnyttjas C_3A reaktionen (den falska bindningen) fullt ut. Den innehåller två komponenter där den ena är ett sulfatfritt cement som ger en falsk tillstyvnad (aluminatreaktionen) nästan direkt. Den andra komponenten innehåller förutom cement även sulfat, superplasticerare och citronsyra (en retarder). Genom att tillsätta olika mängd av komponent B kan man tidsstyra den falska bindningen. Den verkliga bindningen tar emellertid relativt lång tid. Detta injekteringsmedel borde kunna fungera i transmissiva zoner där risken för utspolning är stor.

6.2 Beständighet och kemisk stabilitet

Under etapp 2 har arbetet haft en relativt låg aktivitet. Beständigheten styrs främst av hur bra injekteringen lyckats och av de kemiska reaktioner som med tiden kan ske i cementpasta i kontakt med grundvatten. Detta har vi studerat i andra projekt helt eller delvis finansierade av SKB. En del av detta är publicerat men mycket är pågående projektarbete.

Vi har sökt efter objekt där vi kunnat studera stelning cementpasta i berg, men inte kunnat identifiera något bra objekt hittills.

I tunnlar kommer det stelnade injekteringsmedlet att ligga under permanent vattentryck, dvs. det kommer alltid att vara vattenmättat. Detta gör att man inte behöver oroa sig för uttorkningskrympning.

Det kan finnas problem med omkristallisation. Undersökningar har emellertid visat att cementpastakomponenterna är stabila under mycket lång tid utan att omkristallisera /Smellie, 2000/. Andra undersökningar av gammal betong, t ex /Trägårdh och Lagerblad, 1998/, har visat att vanlig cementpasta i vatten inte omkristalliserar eller förändras på något sätt så att det krymper på åtminstone hundra år.

Cementpastan kan emellertid reagera med bergarterna eller med grundvattnet. Dessa reaktioner, exempelvis alkalisilikareaktionen eller sulfatreaktionen ger en expansion. De snabba cementen med hög halt av både alkalier och C_3A kan ge upphov till dessa reaktioner. I vanliga konstruktioner ger detta upphov till uppsprickning som försämrar konstruktionens egenskaper. Man måste här emellertid betänka att vid injektering har man förhållandevis små mängder cementpasta i sprickor. Kraften i reaktionen är för svag för att spränga berg då mothållet blir för stort. Det är endast en liten del av cementpastan som reagerar och de nya produkterna kommer att bildas i de befintliga hålrummen (kapillärsystemet och luftblåsor) och svällningen ger endast upphov till en förtätning. De expanderande reaktionerna kan dock ge problem vid injektering av stora sprickor parallellt med orten eller stora ytliga utfyllnader.

Karbonatjoner i grundvattnet kan ge en karbonatisering av cementpastan. Denna reaktion är dock relativt volymsneutral varför det inte ger något större problem. Dessutom är djupt grundvatten normalt fattigt på kolsyra. Spricköppningen mot tunnarna är så liten i förhållande till injekteringsomfånget att luftens koldioxid inte kan påverka till något större djup.

Det främsta problemet med cementbaserade injekteringsmedel är att de, även om det går långsamt, är vattenlösliga. Problemet gäller framför allt kalciumhydroxiden (CH) som är den mest lösliga komponenten. Om vatten kan passera genom cementpastan kommer den att först förlora sin CH vilket ökar porositeten och därmed permeabiliteten. Efter att CH förlorats kommer cementgelen (kalciumsilikathydrat) att börja brytas ned genom att den förlorar kalciumjoner. Under det första stadiet minskar dock inte volymen vilket gör att permeabiliteten inte ökar. Restprodukten efter urlakning är en olöslig gel av silika och hydroxider av järn och aluminium. Den tätande effekten kan därför inte helt förloras. Urlakningen ger upphov till en förhöjning av pH i omgivningarna.

För att förhindra urlakning som är det främsta problemet bör pastan vara tät vilket i sin tur kräver ett lågt vct där pastan stelnat. Om vattnet inte kan passera genom pastan blir det lösande angreppet styrt från ytan och jonrörelserna/upplösningen sker genom diffusion. Detta är en mycket långsam process då det bildas ett allt tjockare skikt med olösliga produkter genom vilka diffusionen sker. Undersökningar av gammal betong, t ex /Trägårdh och Lagerblad, 1998/, har visat att man på hundra år endast lakar till ett djup av någon eller några cm om angreppet är diffusionsstyrt.

Beständigheten kommer främst att styras av hur väl injekteringen lyckats. Det beror på hur mycket vatten som passerar det injekterade området och detta vattens kontaktyta mot cementpasta. Om mycket vatten passerar kan man förmoda att flödet ökar med urlakad mängd pasta.

Vi har undersökt lakningsegenskaperna hos injekteringsbruk med kalciumklorid som accelerator då vi vet att detta bildar nya typer av cementshydratprodukter. Röntgen-diffraktion visade att det bildades en produkt kallad "Friedels salt". Vid lakning tappade pastan snabbt sina klorider vilket gav en viktförlust men ingen struktorkollaps. Man kan därför anta att den enda effekten för beständigheten är en ökning av porositet vilket ger en högre permeabilitet. Viktförlusten ökar med inblandad mängd kalciumklorid. Man vet dock från andra undersökningar att en ökad kloridhalt ger en ökad lakningsbenägenhet hos cementpasta.

Superplasticerarna ändrar inte cementpastans struktur vilket gör att de inte har någon effekt på beständigheten. De polymerbaserade superplasticerarnas nedbrytning och

toxicitet utreds av SKB i annat sammanhang. De kommer att brytas ned i kortare kedje-fragment varav ingen har någon signifikant toxicitet.

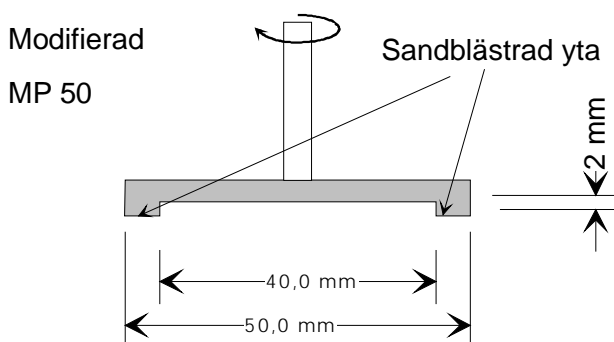
6.3 Filtreringsstabilitet

Delprojektet "Filtreringsstabilitet" syftar till att utreda vilka parametrar som bestämmer cementbaserade injekteringsmedels skiftande inträngningsförmåga. Dessa skillnader uppträder dels som variationer mellan cementleveranser, dels som ett icke definierat samband mellan det ingående cementets idag mätbara parametrar, såsom kornstorleksfördelning och kemisk sammansättning, och brukets inträngningsförmåga.

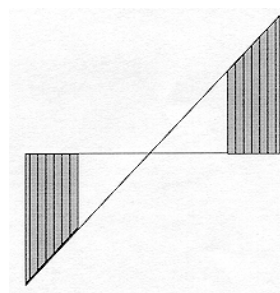
Arbetet under etapp 2 har inriktats på framtagande av mätmetodik och utvecklande av materialmodell, för karaktärisering av viktiga materialparametrar för injekteringsbrukets filtreringsstabilitet. Reologiska mätningar har genomförts vid olika spaltvidder som ligger inom, eller strax utanför, samma storleksordning som cementkornets karaktäristiska storlek.

Vid de första reometermätningarna användes traditionell platta-platta mätning. Mätresultaten påvisar att det på ett systematiskt sätt kan kartläggas ett antal viktiga materialegenskaper som har betydelse för injekteringsbrukets filtreringsstabilitet. Mätningarna utfördes med både inert material (Myanit) och cementbaserat material (Injekteringscement 30 och Ultrafint cement 12). De spaltvidder som användes var 50, 100, 200 och 400 μm . Mätresultaten implementerades sedan i den tredimensionella materialmodellen som framtagits av /Hansson, 1998/.

För att bättre kunna karaktärisera materialegenskaperna hos injekteringsbruket har en modifierad mätgeometri framtagits enligt figur 6-1. Spaltvidderna och de använda materialen vid försöken med den modifierade mätgeometrin är desamma som vid mätserien med den traditionella mätgeometrin platta-platta. Användandet av den modifierade mätgeometrin medför att man erhåller en mer homogen skjuvspänningsfördelning på provmaterialet under provningen, jämfört med den traditionella platta-platta geometrin. Den mer homogona skjuvspänningsfördelningen medger att man på bättre grunder kan utvärdera materialets flödesegenskaper under en viss skjuvhastighet, se figur 6-2.



Figur 6-1. Modifierad mätgeometri.



Figur 6-2. Skjuvhastighetsprofil.

$$\tau = \frac{k_{d\tau}}{d - d_{cr}} + \tau_{0\infty} + \left(1 + \frac{k_{d\mu}}{d - d_{cr}}\right) \cdot \mu_{p\infty} \cdot \dot{\gamma}$$

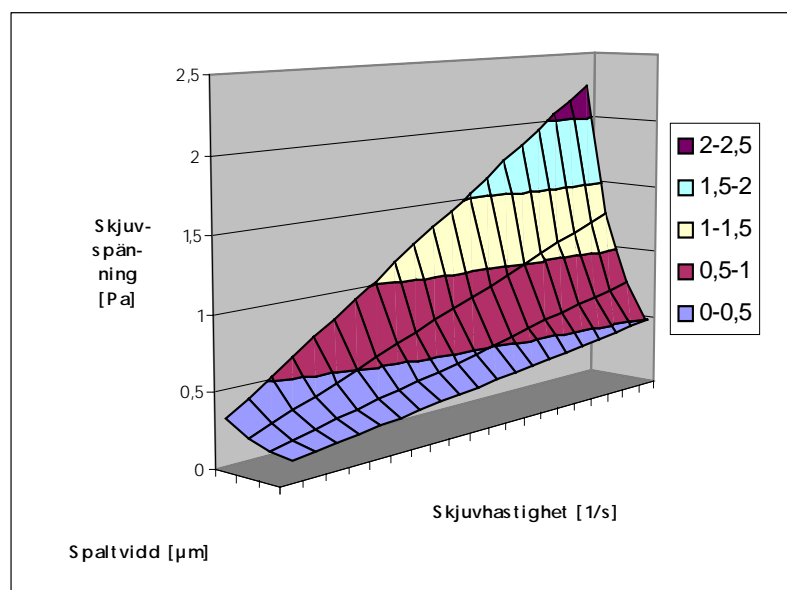
Där :

d = Spaltvidd [m]
 d_{cr} = Kritisk spaltvidd (asymptotvärde) [m]
 $k_{d\tau}$ = Faktor för flytgränsens beroende av spaltvidden [Pa · m]
 $k_{d\mu}$ = Faktor för viskositetens beroende av spaltvidden [m]

Figur 6-3. Ekvation för tredimensionell Bingham-modell.

Den tredimensionella materialmodellen kan ses som en modifiering av den traditionella Bingham-modellen. Den modifierade Bingham-modellen hanterar storleksberoendet mellan materialets kornstorlek och den injekterade kanalvidden enligt formeln i figur 6-3.

Konstanterna $k_{d\tau}$ samt $k_{d\mu}$ har beräknats genom att med en numerisk iterationsmetod minimera de summerade, kvadrerade avvikelserna mellan mätvärdet för vid mätning erhållen skjuvspänning och den beräknade skjuvspänningen enligt materialmodellen. Den numeriska iterationen är utförd i datorprogrammet Excel 97. τ_{∞} (Skjuvspänning vid oändlig spaltvidd) samt μ_{∞} (plastisk viskositet vid oändlig spaltvidd) har beräknats med den traditionella tvådimensionella Bingham-modellen ur de mätvärden som härrör från mätning med spaltvidden 400 μm , d är den injekterade sprickans spaltvidd, d_{cr} är den sprickvidd som kommer att orsaka ett ökat flödesmotstånd vid injektering och $\dot{\gamma}$ är den skjuvhastighet som materialet utsätts för under injektering. För en djupare förklaring av materialmodellen, se /Hansson, 1998/.



Figur 6-4. Karakterisering av material enligt den tredimensionella Bingham-modellen.

Diagrammet i figur 6-4 visar en utvärdering av en blandning av inert material (Myanit 0–30 μm) och vatten, vct 0,7. Denna typ av utvärdering har gjorts för samtliga i undersökningen ingående material. Ur denna typ av samband kan det utläsas hur skjuvspänningen i injekteringsbruket påverkas av pålagd skjuvhastighet och den injekterade kanalvidden. Erhållen skjuvspänning i materialet under injektering, bedöms vara en mycket viktig materialparameter för injekteringsbrukets inträngningsförmåga i tunna flödeskanaler.

7 Diskussion och slutsatser

De mål som hade satts upp för de olika delprojekten i etapperna 1 och 2 redovisas i avsnitt 1, Bakgrund. Målen var högt satta och har, som framgår av denna rapport, till viss del uppnåtts. Delmålet att sammanfatta teknikläget (litteraturstudier) har uppnåtts av samtliga delprojekt.

7.1 Karakterisering av berg från injekteringssynpunkt

Arbetet under etapperna 1 och 2 presenteras i sin helhet i licentiatuppsatsen "Grouting Predictions Based on Hydraulic Tests of Short Duration: Analytical, Numerical and Experimental Approaches" /Fransson, 1999/. Som titeln beskriver är uppsatsen indelad i en analytisk, en numerisk och en experimentell studie där experimentet utfördes i en sprickreplik med arean 445×295 mm (2D). Den slutsats man kan dra utifrån studien är att hydrauliska tester är användbara för att beskriva geometrin hos en spricka. Den numeriska modelleringen och experimenten indikerar att specifika kapaciteten, $Q/\Delta h$, är en robust parameter och att fördelningen av specifika kapaciteter och sprickvidder beräknade utifrån dessa ger en bild av de geometriska variationerna inom sprickplanet. Denna fördelning kan tillsammans med arean även ge ett uppskattat värde av sprickans volym. Den analytiska studien visar att när borrhålet träffar sprickan där sprickvidden lokalt är stor jämfört med omgivningen fås ett mindre värde på den specifika kapaciteten eftersom den begränsas av den mindre vidden. Möjligen kan dessa underskattade värden justeras genom att relatera dem till medianvärdet. För att få en bättre bild av de mer konduktiva delarna av sprickan är det lämpligt att även genomföra vattenförlustmätningar med omgivande hål öppna. Vid sidan av användningen av hydrauliska test för en geometrisk beskrivning så visade både den analytiska och numeriska studien en generellt god korrelation mellan transmissivitet och bruksåtgång vid varierad geometri med störst avvikelse när borrhålet träffar en lokalt extrem sprickvidd. Vid utvärdering av vattenförlustmätningar och injekteringsdata ifrån borrhål som träffar samma spricka bör man dock ha i åtanke att interferens och injekteringsordning är av betydelse. Kommenteras ska att beräkningarna inte tog hänsyn till faktorer såsom filtrering och separation.

Fördelningen av specifika kapaciteter och sprickvidder inom en spricka bör vara till hjälp för att bestämma injekteringsstrategi såsom exempelvis val av injekteringsbruk och injekteringsordning. Detta arbete har främst varit inriktat på att utifrån hydrauliska tester beskriva en spricka (2D). Tanken är att dessa tester ska kombineras med andra karakteriseringsmetoder, exempelvis geologisk kartering, och att en beskrivning i nästa etapp även ska påbörjas för bergmassan i tre dimensioner.

7.2 Spridningsmekanismer vid injektering i berg

Arbetet under etapp 2 har avsett laborationsförsök, numerisk modellering och sammanfattande av en konceptuell modell.

Resultaten av laborationsförsöken är flera fenomenologiska studier av spridningsmekanismerna, framför allt filtrering, separation och utspädning av fronten. Filtreringen bedöms vara av betydelse för injekteringsresultat dels direkt genom dess påverkan på inträngningsförloppet och dels indirekt genom de förändrade bruksegenskaper som kan påverka separationen och beständigheten. Separationen kan ge en begränsad täthet men dess betydelse bedöms bero av rådande bergförhållanden. Utspädning av fronten har inte i laborationsförsöken kunnat påvisas vara av betydelse för injekteringsresultatet.

I den numeriska modellen har preliminära ansatser inkorporerats som omhändertar filtrering och separation under injekteringen. Dessa baseras på laborationsförsöken. Ett programpaket som genererar en sprickgeometri, beräknar inträngning med hänsyn till filtrering och separation samt utvärderar effekten av injektering har tagits fram.

Den konceptuella modellen beskriver hur tätningseffektiviteten kan beräknas och hur en prediktion av inläckage till en tunnel kan göras. Tätningseffektiviteten avser lämpligt bruksval i en injekteringssituation och prediktionen av inläckage avser att bedöma om erforderlig täthet uppnås med förelagt bruksval och teknik.

Det övergripande målet med förutsäga spridningen av bruk vid en injektering är att kunna uppskatta den tätningseffektivitet som erhålls. Tätningseffektiviteten kan beskrivas som ett mått på den reducering av bergmassans konduktivitet som erhålls vid injekteringen. Med denna definition kan även en predicering av inläckaget till en berganläggning göras.

I den licentiatavhandling som presenterats /Eriksson, 1999/ beskrivs en metod för att beräkna tätningseffektivitet och förutsäga inläckage till anläggningen. Denna är kortfattat beskriven i avsnitt 4.4.

Det som komplicerar begreppet tätningseffektivitet något och som gör det i viss mån olämpligt som värderingsinstrument är svårigheten att mäta. Vid en borrhålsundersökning i stufv kan en lokal tätningseffektivitet mätas eller uppskattas. Dock, på grund av antingen lokalt vältätade partier eller partier med begränsad tätning kan en felaktig tätningseffektivitet för bergmassan uppskattas. Man kan jämföra detta med de svårigheter som vanligen föreligger vid flöde ur observationshål kontra kontrollhål. Av denna anledning har i licentiatavhandlingen begreppet tätningseffektivitet föreslagits avse ett injekteringsbruks tätningsförmåga i en given geometri. Baserat på den tätningseffektivitet som beräknas för olika sprickor i bergmassan kan en genomsnittlig sänkning av bergmassans konduktivitet beräknas, vilken används för att förutsäga inläckaget till anläggningen.

7.3 Förinjekteringens stabiliserande och tätande verkan

Den tillämpade metodiken i detta arbete var att jämföra analytiska och numeriska beräkningar, genomförda vid lika – och starkt förenklade – antaganden om geometri och material, för att söka ”verifiera” en numerisk beräkningsmodell. Denna modell skulle

sedan kunna göras mycket mer generell och användbar på verkliga förhållanden, såsom tillfartstunneln till ett djupförvar.

Utförda beräkningar avseende en zon som enbart är injekterad, under antagande att injekteringen medför en ökad E-modul, tyder på att injekteringen endast försumbart påverkar deformationerna. Det är emellertid viktigt att notera att ju sämre utgångsmaterialet är, ju större hållfasthets- och styvhetsförbättring är möjlig att uppnå. Det är dock svårt att förutsäga hur bergmassans deformationsstyrande parametrar påverkas av injektering.

En utförd parameterstudie påvisar betydelsen av en rimlig uppskattning av de materialparametrar som styr bergmassans deformationsegenskaper. Studien visar också att beräkningarna är känsligare för variationer i friktionsvinkel än i elasticitetsmodul.

Vid beräkningar av kombinationer av olika förstärkningar i en blockig förkastningszon erhöles en femfaldig minskning av deformationerna jämfört med oförstärkt bergmassa. Om deformationerna måste begränsas är sprutbetong att föredra framför relativt tät bultning.

Vid tunneldrivning genom en helt leromvandlad zon sker stora plastiska deformationer. Detta kräver en kraftig förstärkning i ett tidigt skede, jämfört med en blockig förkastningszon. I en sådan zon handlar det i första hand om att säkerställa stabiliteten eftersom lerans vattengenomsläpplighet kan antas vara låg. Fullortsdrivning är att föredra då det leder till att en slutna förstärkningsring kan installeras direkt. Vid ett relativt isotropt spänningsfält medför detta små momentbelastningar på leringen och relativt små deformationer hos tunnelväggen.

Stabilitets- och vattenproblem är att förvänta vid en grusvittrad zon. Ett sätt att klara detta är att i förväg frysa materialet i en ring närmast tunneln.

Studierna visar att man med hjälp av moderna programvaror för bergmekanisk analys kan skapa det nödvändiga teoretiska underlaget för beslut om drivningssätt genom påträffade svaghetszoner i bra berggrund. Den stora svårigheten torde emellertid vara att under drivningsskedet snabbt få fram relevanta materialparametrar att sätta in i modellen, varför fältundersökningar och bergmekanisk analys bör genomföras redan under projekteringsfasen.

Nästa steg i arbetet bör vara att på basis av de teoretiska resultaten från den aktuella studien utarbeta praktiskt användbara beräkningsmodeller, att användas för passager av svaghetszoner. Lämpliga kombinationer av injekterings- och förstärkningsmetoder bör kunna identifieras för olika typer av zoner, liksom laster på förstärkningarna och deformationer. Om förhållandena under drivningen avviker från prognos ska beräkningsmodellen kunna användas för att ta fram alternativa lösningar baserade på nya parametervärden.

Ett viktigt steg vid implementeringen av den nya beräkningsmodellen blir att söka verifiera den mot praktiska mätningar i fält vid pågående tunnelprojekt.

7.4 Cementbaserade injekteringsmedel

7.4.1 Inventering och karakterisering av material

Cementbaserade injekteringsmedel har klara begränsningar. Det finns inget injekteringsmedel som klarar alla geologiska situationer. Speciellt har det visat sig att man inte kan få ett lättroligt och snabbt bindande injekteringsbruk samtidigt. Vilket medel man väljer måste baseras på geologisk information om sprickorna, vattenflödet, tryck etc. och man måste optimera för bästa resultat. Detta fordrar en noggrann utvärdering av typ, receptur och utprovning av bruken i både laboratorium och fält. Undersökningarna har gett många av de styrande variablerna och visat på utrustning och laborativa metoder för att ta fram anpassade injekteringsbruk. Man måste dock optimera för alla villkor inklusive temperatur, blandare och tid till injektering.

I finsprickigt till normalt sprickigt berg kan man klara sig med långsamma cementen med god rörlighet och inträngning. De binder emellertid långsamt. Här måste man beakta risken för tillbakaspolning när trycket sänks. Om detta inte är möjligt måste man utnyttja tillstyvnaden vilket beror på typen av superplasticerare cement och tillsatsmaterial såsom accelerator.

I transmissiva zoner blir tillstyvnad och bindetid viktigare. Här måste man även beakta utspädning och bortspolning av flödande vatten. För transmissiva zoner kan man antagligen använda ett långsamt cement med accelerator eller ett snabbt cement. Acceleratorerna ger mycket snabb tillstyvnad vilket kan förhindra inträngningen. Antagligen får man bättre resultat med snabba cement. Ett sätt kan vara att utnyttja falsk bindning. Med gipsfritt cement och med utnyttjande av aluminatreaktionerna kan man styra tillstyvnaden från några minuter till några timmar.

7.4.2 Beständighet och kemisk stabilitet

Det största problemet med cementbaserade injekteringsmedel är att de innehåller vattenlösliga komponenter. De främst i vanlig betong skadliga reaktionerna ger en svällning vilket är oväsentligt i bergsprickor. Beständigheten kommer därför främst att bli en funktion av hur vatten tränger igenom den injekterade zonen. Detta i sin tur beror på fyllnadsgrad i spricksystemet och permeabilitet hos den stelade cementpastan. En värdering av lakning och beständighet måste därför baseras på studier av cementpasta i sprickor i berget och av hur mycket och hur hög kalciumhalt det penetrerande vattnet har. Om urlakningen kan bli ett stort problem bör man övergå till ett bruk baserat på granulerad masugnsslagg och/eller med silikastoft. Dessa bruk innehåller mindre av kalciumhydroxid vilket minskar urlakningshastigheten. Dessa cement är dock mycket långsamma om de inte accelereras.

7.4.3 Filtreringsstabilitet

Metoden att karaktärisera viktiga materialparametrar för injekteringsbrukets egenskaper med en rotationsreometer som är försedd med planparallella mätplattor har visat sig framgångsrikt. Mätmetodiken och materialmodellen kommer att ytterligare förfinas och utvecklas. De problem och anomalier som uppstått under provningarna, är till stor del förväntade och bedöms inte vara av något betydande hinder inför framtida utveckling av mätkonceptet.

För att förbättra kvalitén och minska eventuell störningskänslighet av de numeriskt beräknade faktorerna för kritisk spaltvidd, flytgränsens beroende av spaltvidden och viskositetens beroende av spaltvidden (d_{cr} , $k_{d\tau}$ och $k_{d\mu}$) kan ett antal åtgärder vidtagas. Mätmetodiken och mätutrustningen kan vidareutvecklas för att öka dess mätnoggrannhet och mätkvalité. Mätresultaten kan destilleras före de används i materialmodellen. Ett förslag till destillering skulle vara att först anpassa samtliga mätvärden till en traditionell tvådimensionell Bingham-modell, för att sedan använda dessa beräknade skjuvspänningar i den tredimensionella Bingham-modellen. Alternativa materialmodeller med fler parametrar t ex Hershel-Bulkley-modellen kan användas för destillering av mätvärdena. Randvillkor kan uppsättas vid optimeringen av passningen av mätvärdena till materialmodellen. Randvillkoren kan t ex vara att d_{cr} , $k_{d\tau}$ och $k_{d\mu}$ inte kan anta negativa värden. Störningsanalys av mätvärdena ska utföras för att se effekten av hur variationer i mätdata påverkar faktorerna d_{cr} , $k_{d\tau}$ och $k_{d\mu}$. För att ge d_{cr} en mer entydig fysikalisk innebörd i den tredimensionella modellen kan denna faktor uppskattas (mätas) vid en särskild, direkt, mätning. Den kritiska spaltvidden, d_{cr} , skulle härmed kunna utgöra det asymptotvärde vid vilket den erhållna skjuvspänningen i materialet går mot oändligheten och vidare injektering i kaneln blir omöjlig. En möjlig väg att uppskatta en kritisk spaltvidd för en viss karaktäristisk kornstorlek, är att mäta den normalkraft som erhålls när platta-platta geometrin sänks ner mot provet. Kritisk spaltvidd, d_{cr} , definieras som den spaltvidd vid vilken normalkraften på materialet förväntas ge en så stor mekanisk kontakt mellan mätgeometri och underlag, så att risk för kraftigt ökande flödesmotstånd föreligger. Alternativa kriterier och mätmetodiker för explicit mätning av d_{cr} är troligen nödvändigt att genomföra för att utvärdera hur väl olika mätmetoder uppskattar ett relevant värde för d_{cr} .

7.4.4 Beskrivning av injekteringsmedel

De cementbaserade injekteringsmedlen baseras på cementpartiklar i vatten. Cementpartiklarna reagerar med vattnet och ger en fast produkt. Partiklarna behöver inte nödvändigtvis endast bestå av portlandcement. Man kan blanda upp cementet, vilket är vanligt i de kommersiella produkterna, med finmald granulerad masugnsslagg. Gjorda försök vid CBI visade att blandningar med slagg hade samma rörlighet som den rena portlandcementen och att portlandcementen styrde bindetiden. Styrkeuppbyggnaden efter bindning blir dock långsammare med slagg. Vi fick samma resultat med finmald kvarts.

Det finns även produkter baserade på finmald granulerad masugnsslagg som aktiveras med natriumhydroxid. Det finns även kombinationer där masugnsslagg eller en kombination av slagg och portlandcement aktiveras med vattenglas (alkalisilikat). Denna kan fås att binda mycket snabbt och styras med mängd vattenglas. Injekteringsmedel baserad på eller med blandningar med portlandcement ger mindre urlakning och mera av stabila urlakningsprodukter. Det är därför en fördel med slagginblandning ur beständighets-synpunkt.

Vid besvärliga injekteringar kan man även använda sig av kombinationer baserade på vattenglas. I dessa medel baseras bindningen på att man med olika metoder sänker pH vilket resulterar i att silikan fälls ut som en gel vilket stoppar vattenflödet. Denna gel kan emellertid krympa varför medlet inte rekommenderas ur beständighets-synpunkt. Utfällningen av silikagel tidstyrs av olika typer av organiska syror. Oorganiska syror ger för snabb utfällning. I nyare koncept används silika som surgjorts för att bli vattenlöslig och flytande. Den stabiliseras sedan i berg med hjälp av kalciumkarbonat och andra

kemikalier som höjer pH värdet vilket ger en utfällning av silika. Denna produkt blir mera långtidsstabil. Vattenglas eller surgjord silika kan vara intressant i vissa applikationer då det är ett lättdefinierat oorganiskt material som inte kontaminerar grundvattnet.

8 Referenser

Andersson H, 1998. Chemical Rock Grouting. An Experimental Study on Polyurethane Foams. Doktorsavhandling, Institutionen för geoteknik. Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.

Berggren A-L, 1983. Engineering Creep Models for Frozen Soil Behaviour. Doctoral Thesis, Geotechnical Division, the Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway.

Bergman S G A, Nord G, 1982. Täta tunnlar lagom, BeFo Rapport nr 64:1/82, Stockholm.

Bodén A, Gustafson G, Hässler L, Lagerblad B, Lindblom U, Pusch R, Stille H, 1997. Injekteringsteknik – Kunskapsläge och utvecklingsbehov. SKB projektrapport PR D-97-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bodén A (red.), 1998. Projekt Injektering. Avrapportering av etapp 1. SKB projektrapport PR D-98-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Brantberger M, Dalmalm T, Eriksson M, Stille H, 1998. Styrande faktorer för tätheten kring en förinjekterad tunnel. Rapport 3049, Avd. Jord- och bergmekanik, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.

Bruce N-E, 1992. Tunnelbanan till Skarpnäck, tättnings- och förstärkningsarbeten. Bergsprängningskommittén Diskussionsmöte BK –92.

Carlsson A, Lintu Y, Olsson T, 1987. Injektering i berg. hydrogeologiska förutsättningar och genomförande. Vattenfall, BKU, U(K) 1987/9, Stockholm.

Carlsson L, Gustafson G, 1991. Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik. Rapport R66:1991. Bygghälsorådet, Reviderad utgåva av R41:1984. Stockholm.

Eriksson M, 1998. Experimental study of filtration effect during grouting. Rapport 3051, Avd. för Jord- och bergmekanik, Inst. för Anläggning och miljö, KTH, Stockholm.

Eriksson M, 1999. Model for Prediction of Grouting Results – Spreading, Sealing Efficiency and Inflow. Licentiatavhandling nr 2046, Avd. för Jord- och Bergmekanik, Inst. för Anläggning och miljö, KTH, Stockholm.

Eriksson M, Dalmalm T, Brantberger M, Stille H, 1999. Separations- och filtreringsstabilitet hos cementbaserade injekteringsmedel. Rapport 3065, Avd. för Jord- och Bergmekanik, KTH, Stockholm.

Eriksson Å, Palmqvist K, 1997. Tätning och erfarenheter från Lundbytunneln. SveBeFo Bergmekanikdagen 1997, Stockholm.

- Fransson Å, 1999.** Grouting Predictions Based on Hydraulic Tests of Short Duration: Analytical, Numerical and Experimental Approaches. Publ. A 93, Chalmers University of Technology, Department of Geology. Göteborg.
- Hakami E, Larsson E, 1996.** Aperture measurements and flow experiments on a single natural fracture. International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 33, No. 4, pp. 395–404.
- Hansson P, 1998.** Cementbaserade injekteringsmedels inträngningsförmåga – mätning och modellering. Nordiskt symposium i berginjektering 1998. Föredrag vid det tredje nordiska symposiet i berginjektering, 18.11.1998, Esbo, Finland. Forskningsrapport 25, Laboratory of Rock Engineering A, Tekniska Högskolan, Helsingfors.
- Henn R W, 1996.** Practical guide to grouting of underground structures. ASCE Press, New York, 1996.
- Hässler L, 1991.** Grouting of Rock – Simulation and Classification. PhD Thesis, Dept. of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Hässler L, Forhaug M, 1997.** Erfarenheter från injekteringsarbeten vid Arlandabanan. SveBeFo Bergmekanikdagen 1997.
- Karlsruud K, 1998.** Berginjeksjon, Funksjonskrav – settninger. Kurslitteratur, Berginjeksjon 12–14/10 1998, Norsk Bergmekanikkgruppe, Oslo.
- Kutzner C, 1996.** Grouting of rock and soil. A. A. Balkema, Rotterdam.
- Lagerblad B, Trägårdh J, 1995.** Conceptual model for concrete long time degradation in a deep nuclear waste repository. SKB TR-95-21, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- Lédel M, Thorild J, 1995.** Injekteringsarbeten i Lundbytunneln. Examensarbete, Institutionen för byggt teknik, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
- de Marsily G, 1986.** Quantitative Hydrogeology. Groundwater Hydrology for Engineers. Academic Press, Inc., San Diego.
- Morfeltd D, Flodin T, 1993.** Ormen – en fullbörad bergtunnel för magasinering av avloppsvatten. Erfarenheter från injekteringsarbetet. BeFo Bergmekanikdag 1993.
- Rhén I (ed), Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P, 1997.** Äspö HRL – Geoscientific evaluation 1997/5. Models based on site characterization 1986–1995. SKB TR 97-06, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- Smellie J A T (ed), 2000.** Maqarin Natural Analogue Project: Phase IV. Reconnaissance mission report (April 28th to May 7th, 1999). SKB R-00-34, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- Stille H, 1984.** Bultförstärkning av bergtunnlar – Analys med hjälp av ”Ground Reaction Curve”. Stiftelsen Bergteknisk Forskning – BeFo, rapport 151:1/84.

Stockholms gatukontor, Utredningsavdelningen, 1982. BTA, Bergtekniska anvisningar vid utsprängning av tunnlar och bergrum med hänsyn till främst bergtäckning och täthetskrav.

Trägårdh J, Lagerblad B, 1998. Leaching of 90-year old concrete in mortar with stagnant water. SKB TR-98-11, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.