

BeFos injekteringsprogram – Kompetensuppbyggnad och forskning 2012 – 2022

Innehåll

1	Introduktion och sammanfattning	2
2	Framtagning av programmet och prioriteringar	3
3	Utgångspunkter för programmet	4
3.1	Marknad och omfattning för injekteringsarbeten	4
3.2	Frågeställningar och problem	4
3.3	Kunskap, forskning och kunskapsluckor – aktuell status	5
3.4	Mål för programmet	7
3.5	Projekt med olika mål och inriktning (Scope of work)	8
4	Projektområden	10
I	– Information och utbildning	10
II	– Observationsmetoden	13
III	– Real Time Grouting Control, RTGC	14
IV	– Teknik för injektering	15
V	– Optimering av skärmdesign	16
VI	Material för injektering	17
VII	– Bergets vattenvägar och det injekterbara spricksystemet	18
VIII	– Hydromekaniska kopplingar och deras inverkan på karakterisering och resultat vid tunnelbyggande	19
	Bilagor	20
	Bilaga 1 Förslag på studier och projektområden	21
	Bilaga 2 Referenslista	23

1 Introduktion och sammanfattning

Forskning om berginjektering har funnits med i BeFos program sedan 1980-talet. Under denna tid har forskningen fört ämnet från Svartkonst, som det en gång myntades av Carl-Olof Morfeldt, till en ingenjörsvetenskap med komponenter från många områden – geologi, geohydraulik, materialvetenskap, reologi och produktionsteknik. Omsättningen i praktiken har dock släpat efter vilket till del beror på att viktiga frågor fortfarande finns att lösa.

Föreliggande program utgör BeFos satsning på utveckling av kunskap och teknik för berginjektering under åren 2012 – 2022. Programmets övergripande mål är:

1. Effektivitet i injekteringsarbetet
2. Funktionssäkring av injekteringsresultatet.

Programmet omfattar en satsning på kompetensuppbyggnad vilket är en viktig förutsättning för att forskningens resultat ska nyttiggöras i praktiken. Det omfattar också tre projektområden för fortsatt grundläggande forskning för ökad förståelse, samt fem projektområden som direkt syftar till en mer produktionsanpassad och effektiv tillämpning. De totalt nio projektområdena med planerad finansiering från BeFo visas i tabellen nedan.

I det efterföljande redovisas kort hur programmet har arbetats fram, samt beskrivs de utgångspunkter och argument som styr framtagningen. Slutligen beskrivs projektområdena med mål och föreslaget innehåll.

Projektområde I - IX		BeFos planerade finansiering (Mkr)
Kompetensuppbyggnad i branschen		
I	Information och utbildning	3
Tillämpad forskning		
II	Observationsmetoden	1,5
III	Real Time Grouting Control, RTGC	4
IV	Teknik för injektering	9
V	Optimering av skärmdesign	1,5
Grundläggande forskning		
VII	Material för injektering	9
VIII	Bergets vattenvägar och det injekterbara spricksystemet	2
IX	Hydromekaniska kopplingar och deras inverkan på karakterisering och resultat vid tunnelbyggande	3
Summa Mkr		33

2 Framtagning av programmet och prioriteringar

Programmet initierades av BeFo och SKB till grund för en fortsatt långsiktig, sammanhållen och gemensam insats. En behovsinventering i form av en workshop med ett tiotal deltagare från BeFo, Trafikverket, Chalmers, KTH, SKB och övriga branschföreträdare resulterade i en lista med ett fyrtiotal frågeställningar eller förslag på studier. Listan sorterades och lämnades över till högskolerepresentanterna med uppgift att formulera ett program för genomförande. Som en del i arbetet inhämtade högskolan prioriteringar mellan de olika frågeställningarna från företrädare för branschen. Den ytterligare bearbetade lista som utgjorde underlag för prioriteringarna återfinns i bilaga 1.

Högskolornas programförslag bereddes därefter vidare av en arbetsgrupp från BeFos programråd, vilket resulterade i föreliggande kondenserade program. Beredningen innebar en prioritering och anpassning till bedömd rådande ekonomisk ram under de närmsta tio åren. Några av de föreslagna programområdena kan omfatta flera doktorandprojekt och periodens längd möjliggör också tid att förbereda och genomföra fullborda ett eller flera i tiden delvis överlappande doktorandprojekt.

Prioriteringsarbetet resulterade i följande prioritering:

1. Insatser för nyttiggörande
2. Tillämpad forskning
3. Grundläggande forskning.

Insatser för nyttiggörande genom kompetensuppbyggnad i branschen som omfattar **Information och utbildning** (projektområde I) är högst prioriterad då implementering av framtagen kunskap släpar efter. Kompetensuppbyggnadsprogrammet bör starta snarast. Dels därför att den vunna kunskapen måste ut för att kunna tillämpas, dels för att tillämpningen i sin tur ska ge återkoppling till den fortsatta forskningen. Tiden för att skriva en ”*Internationell bok*” bör inte underskattas.

Tillämpad forskning innefattar fältförsök och att man så långt det är möjligt försöker renodla ett problem och utvärdera det praktiskt i pågående bergbyggen. Den tillämpade forskningen har stark knytning till utveckling av ny teknik och nya metoder. Sådana projekt kommer närmast i prioriteringen efter kompetensuppbyggnad.

Projektområdena som avser systematisk styrning och anpassning av utförandet i fält, d v s **Observationsmetoden** (projektområde II) och **Real Time Grouting Control** (projektområde III) är väsentliga då de är av största betydelse för det övergripande programmålet ”funktionssäkring av injekteringens resultat” men även har stark bäring på programmålet ”effektivisering”.

Inom den grundläggande forskningen är **Material för injektering** (projektområde VII) det område som för uppnåendet av de övergripande målen anses väsentligast att vidareutforska.

3 Utgångspunkter för programmet

3.1 Marknad och omfattning för injekteringsarbeten

Vårt framtida samhälle står inför många svåra frågeställningar. Klimathotet, krav på uthållighet, bättre resursutnyttjande, trycket från en ökande befolkning och urbanisering måste lösas utan avkall på välståndet. I flera fall kan byggande som är kopplat till ett bättre utnyttjande av undermarken ge attraktiva lösningar. Tunnlrar för energiproduktion, berggrum för energilagring och avfallshantering, tunnlar för kommunikation och försörjning är exempel på lösningar som förväntas öka i framtiden. Detta kommer givetvis att ställa krav på tekniken att bygga tunnlar. Tätning av tunnlar genom injektering kommer att vara en viktig del i det.

Omfattningen av undermarksbyggandet kommer troligtvis inte att minska utan snarare öka. Idag byggs undermarksprojekt i Sverige för ca 10 miljarder per år. Arbetena med att driva själva tunnelarbetena är ca 25-40 %. Av detta uppgår kostnaden för injektering till ca 10 - 30 %. Detta gör att den framtida årliga marknaden för injektering i Sverige är ca 250 - 1200 miljoner kronor.

Sett i ett mer globalt perspektiv är marknaden mycket stor. Det råder inget som helst tvivel om att Sveriges framskjutna position inom injekteringsforskningen ger möjligheter för svenska aktörer att skapa sig världsledande positioner. Det kräver dock vilja och resurser.

Områden som har potential är:

- Projektering och datorstöd för design och karakterisering
- Utrustningar för karakterisering av berg, provning av bruk och injektering
- Injekteringsmedel
- Processer och datorstöd för styrning, kontroll och uppföljning
- Entreprenadarbeten

Genom det unika samarbetet mellan Chalmers och KTH i dessa frågor har Sverige kunnat skaffa sig en världsledande position inom forskningen. Vi har producerat flera forskningsrapporter inom området än något annat land. Vi vet mycket mer om bergets vattenvägar, injekteringsmedlets spridningsmekanismer och egenskaper idag än för tjugo år sedan. Vi har börjat tillämpa kunskapen i tunnelprojekt. Branschens konservatism har dock gjort att implementeringen har gått långsamt.

3.2 Frågeställningar och problem

Injektering har varit och är en viktig del av skandinaviskt bergbyggande. Det i allmänhet stabila urberget har vattenförande sprickor som måste tätas. Alternativet att klä in tunnlar med en tät lining innebär dubbel bergkostnad då liningen nästan kostar lika mycket som dagens injektering, bergschakt och förstärkning tillsammans. Det medför i normalfallet att även en massiv injekteringsinsats är lönsam jämfört med detta. Emellertid har krav på små tunnelläckage i tätbebyggda storstadsområden och miljöhänsyn i andra områden gjort att kraven på tunneltäthet skärpts väsentligt. I andra områden kanske risken är mer upplevd än reell. Det finns således ett definitivt behov av att utveckla vår förmåga att förutsäga var och till vilken grad vi behöver injektera.

Nödvändiga insatser och därmed kostnaderna för att med injektering uppnå en viss täthet är svåra att förutse. Dessutom finns ett krav på kalkylerbarhet som gjort att man i flera projekt följt en kostsam procedur som varit onödigt omfattande samtidigt som den inte varit tillräcklig i kritiska punkter eller i vissa avseenden som t ex tätning mot dropp. För att förbättra detta krävs att man kan styra injekteringsprocessen bättre, och anpassa insatsen till rådande bergförhållanden. Ett ramverk ges i Observationsmetoden som den formuleras i Eurocode.

Under den senaste femtonårsperioden har en omfattande forskningsinsats genomförts. Den har omfattat allt från konceptuella modeller av vattenvägarna i bergmassan till fälttester av nya material och metoder. Hittills har detta påverkat praxis alltför lite. Det finns många orsaker från att forskare är dåliga på att informera och föra ut sina resultat, till konservatism och ovillighet att förändra i bergbyggeribranschen. Ett problem kan vara att beständighet och funktion för nya material och metoder inte är beprövade. Livslängden för tunnlar och berganläggningar måste vara lång. Tyvärr finns också en logik som säger att om man gör som man alltid gjort kan ingen klandra dig även om man vet att det inte blir så bra. Detta påverkar alla aktörer och hindrar innovationer.

Ett konstaterande är att ekonomin för injektering måste bli bättre. För beställarna att det blir mer tunnel för pengarna. För projektörerna att kompetens omsatt i bra projektering betalar sig. För entreprenörerna att man kan täta tunnlar till en rimligt noggrant kalkylerad kostnad. Slutligen att den injekterade tunneln har ett lågt krav på underhåll. En viktig fråga är här att finna bättre organisering och kontraktsformer för injekteringsarbetena.

En slutsats är att ett forskningsprogram för injektering måste kompletteras med utbildning av alla aktörer: injekterare, arbetsledning, projektörer och beställare. Kunskap är en av nycklarna till framgång.

3.3 Kunskap, forskning och kunskapsluckor – aktuell status

En sammanfattning av några resultat från den genomförda forskningen ges nedan:

Förståelsen av egenskaperna hos den bergmassa som skall injekteras (karakterisering) har byggt vidare på den forskning och de undersökningar som genomförts i SKBs regi inför byggandet av ett slutförvar för kärnavfall. På denna grund har karakteriseringsproblematiken undersökts vidare vid Chalmers^{i,ii}. Spricksystemets hydrauliska egenskaper är extremt heterogena. I ett injekteringsborrhål är det bara ett fåtal sprickor som för betydande vattenmängder och är injekterbara med cement. Konnektiviteten mellan sprickorna är svag och trots att samband mellan borrhål kan konstateras är det oftast rimligt att hantera dem individuellt. Metoder för att hantera karakteriseringen av berget vid design och vid injektering^{iii,iv} har utvecklats och till stor del verifierats. En viktig fortsättning av denna forskning gäller frågan om lämplig skärmgeometri och hur lämpliga injekteringsmedel ska väljas för bästa resultat.

Spridning av cementbruk har teoretiskt analyserats vid KTH och Chalmers^{v,vi,vii,xxviii}. Spridning av fintättningsmedel som polyuretan och silica sol har främst studerats på Chalmers^{viii,ix}. I båda fallen är förståelsen god över hur injekteringsmedel av olika slag sprids i relativt enkla sprickgeometrier. Spridningsprocessen kan relateras till grundläggande reologiska parametrar och injekteringstryck, bruksflöde och injekteringstid vid utförandet. I ett komplext spricksystem är det detaljerade

spridningsförloppet svårt att mäta direkt. Många försök har gjorts för att mäta och analysera vad som i detalj sker i sprickorna ute i berget men kunskapen är här ännu ofullständig.

Egenskaperna hos cementbruk har främst undersökts vid KTH^{x, xi, xxvii}. Genom detta har betydelsen av de reologiska egenskaperna, flythållfasthet och viskositet, blivit klarlagd och kunnat infogas i de ekvationer som beskriver bruksspridning och stoppkriterier. Betydelsen av cementsuspensionens kornstorlek för brukets inträngningsförmåga är ett annat viktigt bidrag från denna forskning. De reologiska egenskaperna hos fintättningsmedel har undersökts på Chalmers^{10, xii}. Även här har betydelsen av de reologiska egenskaperna klarlagts och knutits till spridningsförloppen vid injektering. En viktig utmaning inför framtiden är att kunna mäta bruksegenskaperna under pågående injektering för att kunna övervaka kvaliteten på injekteringsmedlet.

Ett problem som kan uppstå särskilt vid efterinjektering är att injekteringsmedlet inte härdras eller att återflöden till tunneln gör att bruket eroderas och kvaliteten på injekteringen blir dålig. Grundläggande forskning kring detta har utförts vid Chalmers^{xiii}. Problemet bemästras av en kombination av rätt bruksval och ett omsorgsfullt utförande. Verkande grundvattentryck och skärmgeometri är också viktiga faktorer. Nära relaterat till dessa frågor är injekteringsens beständighet. Erfarenheten visar här att en väl utförd injektering har god beständighet men kvalitetsbrister som uppkommit som en följd av ett dåligt utförande förkortar livslängden^{xiv}.

Ett område som hittills ägnats begränsad uppmärksamhet är de geomekaniska aspekterna på injektering. Hittills har en avhandling producerats på vardera KTH^{xv} och Chalmers^{xvi}.

Många projekt har genomförts som fältstudier i pågående bergbyggnadsprojekt. Några som kan nämnas är Hallandsås¹⁴, Södra länken^{8, xvii}, Löttingetunneln^{xxvi}, Törnskogstunneln¹⁴, Nygårdstunneln^{xviii}, Äspölaboratoriet^{3,8,27} med flera. I dessa projekt har oftast någon fråga renodlats så långt det har varit möjligt och testats under realistiska förhållanden. I många fall har det inneburit att nya sätt att utföra^{xix}, styra^{xx} eller utvärdera^{xxi} injektering provats och också påverkat framtida injekteringsteknik. Projekten har i samtliga fall genomförts i samverkan mellan beställare, entreprenörer, konsulter och högskolorna. Förutom att de fört injekteringskunskapen framåt har genom dessa projekt ett unikt nätverk skapats som är en god grund för framtida forskning och utveckling.

Forskningsdelen i dessa projekt har i hög grad styrts av Chalmers och KTH vilket har varit gynnsamt för kvaliteten på genomförandet. Detta bekräftas av att projekten varit grund för artiklar i vetenskapliga tidskrifter. Detta har varit viktigt då kraven på detta i universitetsvärlden har betonats under senare år. I dag står sig denna forskning väl även i detta avseende. Den kunskapsuppbyggnad som dokumenterats i olika publikationer har också resulterat i en grupp disputerade som är kunskapsbärare till industrin.

Trots ovanstående finns luckor avseende såväl grundläggande förståelse, omsättning av forskningsrönen i fungerande byggprocesser samt branschens kompetensnivå.

- Grundläggande förståelse:
Även om vi vet mycket om bergets vattenvägar saknas grundläggande förståelse om hur sprickorna är konnekterade speciellt i mer komplexa geologiska strukturer. Vi har bara begränsad kunskap om hur injekteringsmedel skall blandas och pumpas för att ge bästa möjliga egenskaper och spridning. Vidare saknas kunskap om de kemiska och fysiska egenskaperna av betydelse för beständigheten och de bergmekaniska effekterna av tunneldrivning och injektering.
- Effektiva byggprocesser:
Injekteringsprocessen är komplex och förståelse för de enskilda styrande mekanismerna är inte liktydligt med effektiva design- och styrprocesser. Frågor som berör möjlighet att styra bruket med ökande tryck, ordningsföljden mellan injekteringshål, behov att ändra brukets egenskaper, effekten av längre borrhål och andra frågor relaterat till skärmdesignen är alla exempel på detta.
- Kompetensnivå:
En nyckelfråga är att nå ut till branschen. Lika viktigt att de yrkesverksamma informeras om de senaste landvinningarna är att deras erfarenheter tas till vara och provas inom forskningen.

3.4 Mål för programmet

Den utveckling som beställare och andra aktörer förväntas stödja kan sammanfattas i de övergripande målen:

1. Kvalitets- och funktionssäkring av injektering
2. Effektivitet i injekteringsarbetet.

För att komma dit måste de övergripande målen brytas ned i delmål:

- Att nuvarande kunskap tillämpas lönsamt i pågående bergbyggnadsprojekt
- Att kunskapen om bergets vattenvägar, spridningsmekanismer hos injekteringsbruk fördjupas
- Att prognos- och kalkylmetoder utvecklats till användbara datorstödda projekteringsverktyg
- Att injekteringens verkan och kostnad med kan förutsägas med rimlig noggrannhet
- Att utrustning och medel utvecklas i takt med att fördjupning av kunskapen om injektering sker
- Att organisations- och kontraktsformer baserade på Observationsmetoden etablerats
- Att en grupp injekterare, entreprenörer, projektörer och beställare utbildats med hjälp av för varje kategori adekvata kurser och läromedel.

3.5 Projekt med olika mål och inriktning (Scope of work)

Baserat på de luckor som beskrivits ovan behövs projekt av olika karaktär att behövas. Man kan dela in dem i tre kategorier:

1. Kompetensuppbyggnad av branschen – hit hör att ta fram metodinformation och kursmaterial, att skriva läro- och handböcker för olika kategorier samt också att driva kurser för injektorare, bergbyggare och projektörer.
2. Tillämpad forskning– hit hör fältförsök av olika slag med fördel kopplade till pågående bergprojekt där man så långt det är möjligt försöker renodla ett problem och utvärdera det praktiskt i pågående bergbyggen. Den tillämpade forskningen har stark knytning till utveckling av ny teknik och nya metoder.
3. Grundläggande forskning – hit hör projekt där den viktigaste frågan är ökande av förståelsen av ingenjörsgelogiska berggenskaper, grundläggande fysiska egenskaper hos injekteringsmedel, injekteringsmedels spridning i bergets sprickor, kemiska och fysiska egenskaper av betydelse för beständigheten och bergmekaniska effekter av injektering. Den grundläggande forskningen är kopplad till vårt behov av ytterligare kunskapsuppbyggnad.

Kompetensuppbyggnad av branschen

Ett viktigt hinder för tillämpning av den nyfunna kunskapen är att den inte är så lättillgänglig för de praktiskt verksamma. Den senaste kunskapsredovisningen (Eriksson och Stille^{xxii}) utkom 2005 och ytterligare redovisning återfinns i teknikvetenskapliga tidskrifter, fackpress och konferensuppsatser. En samlad redovisning för olika kategorier och ett utbildningsprogram kan därför vara en viktig punkt.

Tillämpad forskning

En tillämpning av forskningens metoder och resultat fordrar att de prövas och utvärderas i pågående bergprojekt. Det kräver en problemorienterad forskningsmetod^{xxiii} där tillämpningen och utvärderingen av forskningsidéerna på grund av problemens natur måste ske mycket tidigare än i traditionell forskning. De olika stegen i en sådan forskningsmetod visas i figur 1.

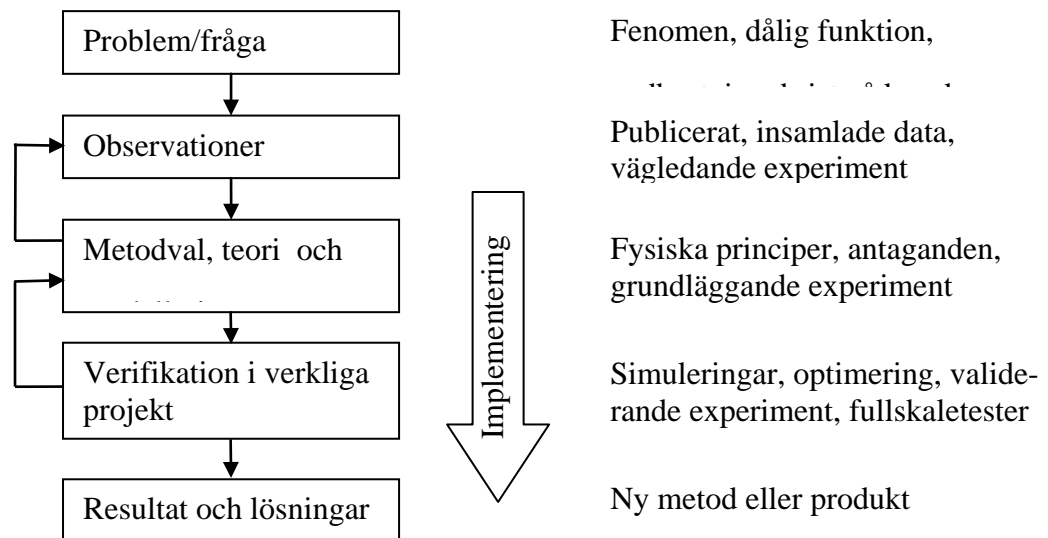
Projektet börjar med att man identifierat ett problem eller en fråga som måste lösas för att uppnå en förbättring eller ett visst resultat. Problemens natur kan givetvis vara mycket olika varför detaljerna bakom en lösning inte kan bestämmas på förhand. Problemet behöver inte heller vara att något inte fungerar utan kan också initieras av att något förmodligen kan göras mycket bättre eller med högre produktivitet.

Problemets lösning startar med att man söker identifiera dess karaktär med utgångspunkt från praktiska erfarenheter, fältstudier och en litteraturoversikt. Ofta kan detta kompletteras med enkla stödjande experiment.

Nästa steg innebär att man skapar en konceptuell modell av problemet och verkande processer där man kan analysera samband, pröva hypoteser och skapa en grund för en kvantitativ (matematisk) modell. I denna fas, som i hög grad är iterativ måste oftast egna idéer och publicerade resultat kombineras på nya sätt. Det är i denna fas som de grundläggande hypoteserna formuleras i en kreativ process.

Resultatet av detta arbete måste sedan testas och verifieras. Detta arbete måste genomföras i nära samarbete med industrin (branschen) helst i pågående bergprojekt. Också denna del av arbetet är iterativ och nya metoder måste tas i anspråk om det tidigare hypoteserna inte visar sig användbara. Detta måste sedan prövas i fält så att förbättringar kan inkluderas i processen.

Det är således nödvändigt att man i tillämpad forskning som syftar till bättre metoder tillämpar idéerna tidigt. Implementering leder också till intresse och förståelse hos de som arbetar med problemet och möjliggör återkoppling.



Figur 1. Problembaserad forskningsmetod med tillämpning i ett tidigt skede.

Fältförsök utförs ofta i pågående byggnadsprojekt. Genomförandet är dock av högst olika kvalitet. Erfarenheten är att de försök som genomförs utan att forskarkompetens är involverad i planläggning och genomförande inte har varit av större värde. I bästa fall har man konstaterat om det man tänkte fungerade eller inte. Data och erfarenheter har i dessa projekt inte samlats på ett sådant sätt att det bidragit till ökad förståelse och lärdomar om den komplicerade injekteringsprocessen. Å andra sidan innebär väl kontrollerade och genomförda fältförsök kostnader som relateras till planering, genomförande och utvärdering. I efterhand har dessa slagits ut på injekteringskostnaden på ett sådant sätt att man i och för sig ser att det går att få bra resultat men inte till dessa kostnader i normal produktion. Det bör därför vara viktigt att utarbeta en arbets- och kvalitetsrutin gemensamt för beställare, industri och forskare som kan följas för fältförsöken. I denna bör också regler för hur kostnader fördelas mellan produktion, alternativa utföranden och forskning etableras.

Grundläggande forskning

Under den senaste 20-årsperioden har en stark utveckling av förståelsen för bergets injekterbarhet, betydelsen av injekteringsmedlens egenskaper och hur injekteringsmedel sprids och fyller bergmassan skett. Emellertid har denna forskning också visat att det kan finnas gränser för hur tätt man kan få berget och också situationer där injektering av olika skäl är mycket svår att genomföra (t ex efterinjektering). Det finns fortsatt behov av att flytta fram gränserna för vår förståelse. Dels för att skapa en grund för bättre tillämpningar, dels för att kunna förutsäga gränserna för när injektering är en lämplig metod. Denna forskning bör till stor del genomföras som teoriutveckling och laboratorieexperiment som sedan kan praktiskt verifieras i fältförsök.

4 Projektområden

Nedan beskrivs projektområdena som bildar stommen i BeFos injekteringsprogram. Det krävs en viss volym för att bilda ett nätverk där man både kan samarbeta och konkurrera med sikte mot givna mål. Projektområdenas ursprung är listan som var bas för prioriteringarna.

I – Information och utbildning

Ett villkor för att forskningens resultat skall komma till tillämpning är att kunniga människor förstår att använda dem. I injekteringsprogrammet ingår därför ett kompetensuppbyggnadsprogram. Kompetensuppbyggnadsprogrammet är brett och riktar sig till alla aktörer med för dem relevanta kurser och utbildningsmaterial. Huvudman för dessa insatser föreslås vara BeFo på samma sätt som sker i Norge där Norsk Bergmekanikgrupp och TEKNA^{xxiv} anordnar kurser i bergteknik. För ett sådant program behövs:

Utbildningsmaterial:

- Informationsmaterial – Detta kan vara av broschyrkaraktär och finnas nedladdningsbart på BeFos hemsida. Detta material bör främst sikta på information för en bredare krets. Hänvisningar till material för att gå djupare i ämnet är viktiga. Inom denna grupp bör också enkla IT-baserade demonstrationsprogram tas fram. Ofta kan man med korta filmsekvenser förklara skeenden som blir mycket abstrakta om man ska beskriva dem i ord.
- ”Kompendium för injekterare” – Detta bör vara en korrekt men beskrivande genomgång av vad som sker vid injektering, vad som styr utförande och resultat. Innehållet bör illustreras med många exempel för att göra kunskapen konkret och förståelig. Ett gott exempel på hur en sådan publikation kan se ut är Stanfors^{xxv} m.fl.
- Internationell ganska komplett bok om kunskapsläget – En samlad framställning av den i Sverige genomförda forskningen och hur den kan tillämpas i praktiken bör tas fram. Nivån bör vara sådan att den kan fungera som lärobok för avancerade nivåer och som handbok vid design och projektering av injektering. Boken bör vara på engelska.

Utbildning:

- Kortkurser för ”branschen” – Korta kurser för alla som arbetar med injektering som beställare, arbetsledare eller injekterare. Kurserna bör inte vara längre än en dag, ges på olika platser och omfatta ett eller ett fåtal delteman vid varje tillfälle. Erfarenheten visar att om varje kurs högst omfattar en dag så är det lättare att få deltagare.
- Kurser för injekterare – Här bör man söka samarbete med någon som anordnar utbildning för bergarbetare. Detta kan t ex vara byggprogrammet i gymnasiet eller motsvarande.
- Kvalificerad kurs för konsulter och doktorander - Denna bör sikta till att föra deltagarna till en djupare insikt om injekterings teori och praktik. Den ovan föreslagna boken är en lämplig bas för en sådan kurs

Information:

- Bergmekanikdagar/BK – Att en session för injektering och hydrogeologi satts av vid i stort sett varje Bergmekanikdag har varit viktigt. Det är ett forum där en stor del av branschen samlas och dokumentationen är lätt att gå tillbaka till för att informera sig om vad som hänt. Det är viktigt att detta fortsätter.
- Nordiska symposier – En serie nordiska symposier om injektering har hållits med ett intervall om ca 4 år. Även dessa har haft stor betydelse. Geologin är liknande i alla nordiska länder och metoderna för bergtätning är också i stort sett desamma. Erfarenhetsutbyte på nordisk bas är viktigt för branschen.
- Facktidskrifter – En informationsspridning på rimlig teknisk nivå har också stor betydelse. Tidskrifterna har lite olika målgrupper men man kan nämna Samhällsbyggaren, Bergs- och brukstidningen och Byggindustrin. Antalet artiklar i dessa borde väsentligt kunna ökas.
- Konferenser och vetenskapliga tidskrifter – Dessa är viktiga för forskarsamhället, dels för att i kvalitetsgranskade fora sprida forskningsresultat, dels för att inom akademien meritera både forskare och forskargrupper. Publicering av resultaten har fått allt större betydelse. Tilldelningen av medel i högskolan styrs delvis av publiceringen och den väger tungt vid tillsättning av akademiska tjänster och har därmed blivit ett krav för att det ska finnas lärare för utbildning på en avancerad nivå.

Implementering

En framgång för programmet är att resultaten förs från forskning till praktisk och lönsam tillämpning i bergbyggande. Implementering är dock inte högskolornas direkta ansvar. De kan skapa ny förståelse och utbilda kunniga ingenjörer och experter. En förutsättning är därför att branschens alla aktörer aktivt engagerar sig i det.

En nyckelroll för att föra den genomförda forskningen till kvalitetssäkrad produktion har beställarna. Det är de som finansierar arbetet och kan ställa krav som får stort genomslag. Vi föreslår därför att de större beställarna diskuterar vilka krav man kan ställa på injekteringsprocessen utifrån dagens spetskompetens. En work-shop med beställarrepresentanter och ett begränsat antal experter bör vara en bra ansats. BeFo kan ha en sammanhållande roll i detta. Ett möjligt utfall är uppgifter för en arbetsgrupp

som med utgångspunkt från detta programförslag styr vidare utveckling och genomförande.

Ett lämpligt forum för branschmedverkan är BeFo, men det kräver antagligen att BeFo's roll förändras. Ovan har vi föreslagit att man förutom att ordna Bergmekanikdagen och andra möten också ställer sig som huvudman för kortare utbildningar och aktivt med branschens stöd söker initiera yrkesutbildning för injekterare. Här kan man jämföra och lära sig av den medverkan i brunnborrarutbildning som branschorganisationen Geotec har.

Det viktigaste kvittot för ett framgångsrikt program är dock att injektering mätbart kan sägas ha blivit bättre genom att tätningsmålen uppnåtts på kortare tid och med mindre utrustnings- och materialinsats. En del i ett implementeringsprogram måste därför vara en erfarenhetsåterföring från utförda projekt.

BeFos planerade finansiering

BeFos planerade finansiering för detta projektområde uppgår till 3 miljoner.

II – Observationsmetoden

Problemställning:

Bergmassans egenskaper varierar beroende av främst bildningssätt och omvandling. Det vattenförande spricksystemet egenskaper kan undersökas genom förundersökning, men osäkerhet kommer alltid att råda fram tills dess att hela tunneln har schaktats ut.

Att bygga i berg inkluderar således osäkerheter som måste hanteras både tekniskt och kontraktuellt. Innan byggandet startar har man baserat förundersökningarna en prognos avseende injekteringsinsatsen. I takt med att byggandet framskrider så uppdateras kunskapen om berget och baserat på observation kan rätt injekteringsinsats sättas in för varje etapp av tunneln. Detta innebär att observationsmetoden som föreslås i Eurokoden som verifieringsmetod kan lämpa sig både avseende injektering och förstärkning. För att kunna tillämpa observationsmetoden måste flera olika krav uppfyllas. Det gäller val av kritiska parametrar, fastställande av gränser för vad som ska anses acceptabelt, tydliga och genomförbara alternativ samt en organisation och kontrakt som möjliggör användandet av observationsmetoden.

Projekt mål:

- På ett logiskt sätt systematisera injekteringsprocessen utifrån observationsmetodens principer
- Integrera kvalitetssäkring med tillämpning av observationsmetoden för injektering

Typ av projekt och projektaktiviteter:

Arbetet är ett seniorprojekt. I arbetet ingår att på ett logiskt sätt systematisera injekteringsprocessen utifrån observationsmetodens principer och föreslå en generell modell för tillämpning i byggprojekt.

Kvalifikationer på utförare:

Kunskap om injektering, projektering och byggande erfordras. Förståelse för de entreprenadjuridiska frågorna är av stor betydelse.

BeFos planerade finansiering:

BeFos planerade finansiering för detta projektområde uppgår till 1,5 miljoner.

III – Real Time Grouting Control, RTGC

Problemställning:

Styrning av injekteringsprocessen är grunden för att kunna optimera och tillämpa observationsmetoden. Styrning måste ske i realtid, dvs. genom studier av de mätbara parametrarna tryck och flöde. Teorier finns framtagna. Tillämpning och tolkning behöver utvecklas för att metoden skall kunna användas.

Projekt mål:

- Effektivisering och kvalitetssäkring av injekteringsprocessen
- Utveckla RTGC till ett praktiskt användbart verktyg för att styra injekteringsprocessen.
- Utveckla datorstöd (förslag på hårdvara, samt mjukvara) för styrning och utvärdering av injekteringsprocessen i RTGC.

Typ av projekt och projektaktiviteter:

Projektet kan utföras antingen som ett doktorandprojekt eller som ett seniorforskningsprojekt vid någon av de tekniska högskolorna. Projektet ska omfatta fördjupade teoretiska studier kopplade till analys av fältförsök kopplat till tunnelprojekt.

Kvalifikationer på utförare:

God teoretiker med sinne för det praktiska.

Relaterade projekt:

Det finns idag tre projekt som har anknytning till frågeställningen. Vid KTH pågår en studie av Masakuni Tsjumi av arbetena för Citybanan. Hans arbete sker i samarbete med Björn Stille och hans projekt på Chalmers ”Teoretisk injekteringskompetens till praktisk tillämpning”. Vidare har genom anslag från BeFo/Formas ett doktorandprojekt startat vid KTH om RTGC. Doktorand är Jalal Rafi.

BeFos planerade finansiering:

BeFos planerade finansiering för detta projektområde uppgår till 4 miljoner.

IV – Teknik för injektering

Problemställning:

Teknik för injektering inrymmer många delar. Centralt är utrustning för att blanda och pumpa in injekteringsmedlet i berget. Därtill kommer teknik för att kontrollera injekteringsmedlet, berget och resultatet.

Dagens teknik har endast i mindre omfattning ändrats de senaste 50 åren.

Projekt mål:

- Effektivisering av injekteringsprocessen
- Systematiskt studera hur tekniken påverkar injekteringsmedlets egenskaper och spridning
- Utveckla och prova alternativ teknik

Typ av projekt och projektaktiviteter:

Projektet kan vara antingen ett doktorandprojekt eller ett seniorprojekt vid någon av de tekniska högskolorna. Projektet ska omfatta fördjupade teoretiska studier kopplade till avancerade laboratorieundersökningar. Provningar i fält bör ingå. Samarbete med maskinleverantörer eftersträvas.

Kvalifikationer på utförare:

Doktorander och seniorforskare med doktorsexamen.

Relaterade projekt:

I dag har med anslag från SBUF/BeFo/ Formas ett projekt startas på KTH med syfte att mäta brukens egenskaper on-line.

BeFos planerade finansiering:

BeFos planerade finansiering för detta projektområde uppgår till 9 miljoner.

V – Optimering av skärmdesign

Problemställning:

Skärmdesignen är viktig för injekteringsresultatet. Skärmborrhål måste ligga tillräckligt nära varandra för att den tätade zonen ska vara heltäckande. Spricksystemet är anisotrop vilket medför att en orientering riktad mot vattenförande sprickor ger bättre möjlighet för bruket att tränga in. Faktorer att beakta är betydelsen av skärmdesign och injekteringsordning samt bruksegenskaper för att hindra brukserosion och återflöden både vid för- och efterinjektering.

Projektmål:

- Effektivisering och kvalitetssäkring av injekteringsprocessen
- Skapa underlag för att dimensionera och optimera skärmdesign för effektiv injektering.
- Utveckla IT-verktyg för att analysera och optimera skärmdesign.

Typ av projekt och projektaktiviteter:

Projektet bör genomföras av kvalificerade forskare/utredare. Huvudaktiviteter är att:

- Analysera vattenförlustmätningar och injekteringsförlopp borrhål för borrhål från tre injekteringsprojekt med väl utförd registrering (Ex. TASS, TASQ, Lämpliga delar av Botniabanan, Citybanan etc).
- Analysera spricksystemet, dess riktningar, egenskaper mm i dessa projekt
- Dra slutsatser och rekommendera.

Kvalifikationer på utförare

God teoretiker med sinne för det praktiska.

BeFos planerade finansiering:

BeFos planerade finansiering för detta projektområde uppgår till 1,5 miljoner.

VI Material för injektering

Problemställning:

Beroende på krav på tätningseffekt och bergets spricksystem kan olika injekteringsmaterial användas. De kan vara av typen suspensioner eller lösningar. De skall ha lämpliga egenskaper för att tränga in och spridas i sprickorna och vara beständiga. Hälsoaspekterna är viktiga. Egenskaper skall vara möjliga att predicera och erhålla under fältbetingelser och vara reproducerbara. Enhetliga och relevanta standarder för provning är en bristvara.

De senaste årens forskning har varit inriktad mot att identifiera olika problemställningar och studera egenskaperna hos dagens material. Djupare forskning med syfte att utveckla material har endast bedrivits i mindre omfattning. Idag godkänns cementbruk, silika sol och vissa polyuretaner för användning med hänsyn till hälso- och miljökrav.

Projekt mål:

- Kvalitetssäkring av injekteringsmedel i alla led av processen
- Öka kunskapen om olika injekteringsmedels egenskaper relaterade till inträngning och spridning
- Öka kunskapen om de olika injekteringsmedlens beständighet
- Öka kunskapen om hur de olika injekteringsmedlens egenskaper kan styras genom tillsatser

Typ av projekt och projektaktiviteter:

Projektet kan vara antingen ett doktorandprojekt eller ett seniorprojekt vid någon av de tekniska högskolorna. Projektet ska omfatta fördjupade teoretiska studier kopplade till undersökningar i laboratorium. Nära samarbete med olika materialleverantörer bör eftersträvas.

Kvalifikationer på utförare:

Doktorander och seniorforskare med doktorsexamen. Den geokemiska kunskapen måste tillfredställas.

BeFos planerade finansiering:

BeFos planerade finansiering för detta projektområde uppgår till 9 miljoner.

VII – Bergets vattenvägar och det injekterbara spricksystemet

Problemställning:

För att injektering ska lyckas måste en kombination av förståelse för det spricksystem som ska injekteras, materialval och teknik förenas. Dagens metodik för att beräkna inläckage och injekterbarhet bygger på att man från data från vattenförlustmätningar bestämmer en spricktransmissivitet och med hjälp av denna skattar spricköppningen med den s.k. kubiska lagen. Detta arbetssätt bygger på ett antal ganska grova förenklingar i sprickgeometri och aperturfördelning. I allmänhet överskattas inläckagen med denna metodik och prognoser för injekterad bruksmängd visar stor variation. Resultatet blir att överföringen till injekteringsklasser eller motsvarande upplevs som mindre meningsfulla. En djup förståelse för både vattenvägarna i berget och osäkerheter i dagens prognosmetoder är grundläggande för att göra injektering förutsägbar och tekniskt fördelaktig. Resultat från denna forskning har bäring på alla följande projekt.

Projekt mål:

- Öka kunskapen om bergets vattenvägar så att sprickornas bidrag till inläckaget kan kopplas till deras utsträckning och samband.
- Att skapa en bas för att integrera hydromodeller och injekteringsprognoser.
- Att analysera hur injekteringsprognoser kan användas som utgångspunkt för att definiera injekteringsklasser för bergprojekt.

Typ av projekt och projektaktiviteter:

Projektet kan vara doktorandprojekt vid teknisk högskola. Projektet kan omfatta fördjupade teoretiska studier och i sin senare del kopplas till större fältförsök. I projektet kan data från bergprojekt med väl dokumenterade injekteringar, inflödesmätningar och bergkartering inventeras och analyseras. Information finns bland annat att hitta i databaser från SKBs platsundersökningar och Äspö HRL. Projektet kan ses som en fortsättning på Lisa Hernquist arbete om Karakterisering av berg i 2- och 3D för injektering. Projektet är också nära relaterat till Martin Stigssons arbete om Discrete Fracture Network Modelling in Crystalline Rock.

BeFos planerade finansiering:

BeFos planerade finansiering för detta projektområde uppgår till 2 miljoner.

VIII – Hydromekaniska kopplingar och deras inverkan på karakterisering och resultat vid tunnelbyggande

Problemställning:

Framdrift av tunnel leder till spänningsändringar och deformation. Detta kan påverka förinjekteringens tätande funktion. Injekteringen kan också leda till lokal spänningsändring och deformation. Koppling av geologin (bergart, sprickintensitet, sprickorientering) till det geohydrologiska och geomekaniska beteendet ökar möjligheten att förutse problem och anpassa injekteringsskärmens utformning. Inledande studier tyder dessutom på att data från karakterisering och injektering kan användas för att få en bättre bild av de mekaniska förhållandena nära en tunnel. Högre tryck ger en längre och snabbare inträngning och kan leda till en effektivare injekteringsprocess. En viktig fråga är i vilken omfattning man kan tillåta lokal deformation (skjuvning och jacking) utan att äventyra tätningsresultatet.

- Framdriften påverkar bergets genomsläpplighet och förinjekteringens tätande funktion.
- Observationer visar att spänningsändring som injekteringen orsakar kan leda till deformation. Kopplingen geologi, hydrogeologi och geomekanik behöver belysas ytterligare i injekteringssammanhang så att injektering bättre kan anpassas efter förutsättningar.

Projekt mål:

Målsättningen är att öka förståelsen för hur geologi, hydrogeologi och geomekanik samverkar vid injektering och berg/tunnelbyggande. Projektet skall resultera i en ökad möjlighet att identifiera problem och ge rekommendationer angående skärmformning och metodik med syfte att erhålla ett bättre tätningsresultat.

Typ av projekt och projektaktiviteter:

Projektet bör vara ett doktorandprojekt vid teknisk högskola. Projektet skall omfatta en fördjupad teoretisk studie och i sin senare del kopplas till ett större fältförsök. I projektet skall data från bergprojekt med väl dokumenterade injekteringar, inflödesmätningar och bergkartering inventeras och analyseras. Viktiga databaser finns också från SKBs platsundersökningar och Äspö HRL.

Kvalifikationer på utförare:

Doktorandprojekt. Projektet genomförs vid någon av de tekniska högskolorna där sedan tidigare forskning kring dessa problemställningar genomförs.

Relaterade projekt:

Projektet relaterar till tidigare forskning som publicerats i avhandlingar av Staffan Swedenborg (Rock Mechanical Effects of Cement Grouting in Hard Rock), och Rikard Gothäll (Rock mass response during high pressure grouting). Nära relaterat är också arbeten av Johan Thörn (Hydromekaniska egenskaper hos sprickor och sprickzoner) samt Sara Kvartsberg (Metodik för bedömning av bergförhållanden och design av tunnlar).

BeFos planerade finansiering:

BeFos planerade finansiering för detta projektområde uppgår till 3 miljoner.

Bilagor

Bilaga 1: Projektförslag

Bilaga 2: Referenslista

Bilaga 1 Förslag på studier och projektområden

Prioritera bland enskilda förslag (1-10)	Prioritera bland förslag på huvudprojekt (1-8)	Berg	Materialet	Tekniken	Observationsmetoden	HM- koppling injektering/berg byggande	Tätning vid heterogena förhållanden	RTGC (Real Time Grouting Control)	Optimera skärmdesign									
										Grundläggande forskning			Teknik- och metodutveckling					
	KARAKTERISERING																	
	1 Fortsatta studier av bergets vattenvägar	X																
	2 Det injekterbara spricksystemet	X	X	X														
	3 Identifiera vattenförande strukturer på stort djup	X						X										
	4 Hur uppskattar vi bäst aperturen hos sprickor som ska injekteras? – Ett empiriskt samband	X	X															
	5 Förstudie: Bergklass - injekteringsklass	X																
	6 Skattning av sprickstyvhet och bergspänning utgående från hydrauliska tester och Injektering					X		X										
	DESIGN																	
	7 Att välja rätt designmetod				X													
	8 Styrning av tunnelbyggande baserat på Observationsmetoden /kontrollhål - inflöde				X													
	9 Metodik för rationell uppföljning / tillämpa observationsmetoden				X													
	10 Verifiera injekteringsresultat /parametrar registrerade under injekteringsförloppet	X	X	X				X										
	11 DFN-modellering av injekterings-spridning och injekteringsresultat	X	X															
	12 Hur sprider sig bruket?	X	X	X														
	13 Skärmdesign med hänsyn till spricksystem och sprickornas genomsläpplighet								X									
	14 Numerisk analys av injekteringstryckets betydelse för val av injekteringsmetodik?			X					X									
	15 Fullskaleförsök och jämförelser mellan olika injekteringsteknik vad gäller tryck och tid?	X	X	X					X									
	16 Tätning av besvärliga zoner/en eller två omgångar						X		X									
	17 Jacking av berget vid injektering- risk					X		X										

	eller möjlighet								
	18 Styrd efterinjektering			X					X
	DESIGN SLUTFÖRVAR								
	19 Geometri på injekteringskärm i deponeringstunnlar								X
	20 Injektering av högkonduktiva sprickzoner – En uppföljning av en injektering i Äspö tillfartstunnel						X		
	21 Injektering av borrhål								X
	22 Injektering av ramp genom FFM02					X	X		X
	23 Injekteringsteknik vid schaktsänkning								X
	24 Injektering av sänkschakt genom FFM02					X	X		
	25 Efterinjektering vid höga vattentryck/stora tunneldjup			X					X
	UTFÖRANDE och UPPFÖLJNING								
	26 Styrning av injekteringsförloppet							X	
	27 Flerhålsinjektering								X
	28 Snabba metoder för att kontrollera genomsläppligheten							X	
	29 Risk för utspolning av injekteringsbruk vid borrhål								X
	30 Injekteringsbruks känslighet för vibrationer		X						
	31 Undvika läckande injekteringshål		X						X
	32 Mätning av bruksegenskaper on line		X					X	
	INJEKTERINGSMEDEL								
	33 Stoppmedel för högkonduktiva zoner		X				X		
	34 Silica sols stabilitet under och efter injektering		X						
	35 Injektering med silica sol – Inblandning av accelerator i injekteringsmunstycket		X						X
	36 Bättre förståelse av silica sol som injekteringsmaterial		X						
	37 Blandning av låg-pH bruk (silica sol?)		X						
	38 Cementbruks inträngningsförmåga	X	X	X					
	39 Erfarenheter av Låg-pH cement		X						
		Berget	Material	Tekniken	Observationsmetoden	HM-koppling injektering/berg byggande	Tätning vid heterogena förhållanden	RTGC	Optimera skärmdesign

Bilaga 2 Referenslista

- ⁱ Fransson Å, 2001: Characterization of fractured rock for grouting using hydrogeological methods. Thesis, Chalmers University of Technology, Department of Geology, Göteborg.
- ⁱⁱ Hernqvist L 2009: Characterization of the Fracture System in Hard Rock for Tunnel Grouting. Thesis, Chalmers University of Technology, Division of Geology and Geotechnical Engineering, Göteborg.
- ⁱⁱⁱ Gustafson G, Fransson Å, Funehag J, Axelsson M 2004: Ett nytt angreppssätt för bergbeskrivning och analysprocess för injektering, V-byggaren 4:2004.
- ^{iv} Kozubowski T, Meerschaert M, Gustafson G, in prep: A new stochastic model for fracture transmissivity assessment. Submitted to Hydrogeology Journal (2006).
- ^v Hässler L 1991: Grouting of rock – simulation and classification. Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- ^{vi} Eriksson M 2002: Prediction of grout spread and sealing effect: a probabilistic approach. Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- ^{vii} Gustafson G, Stille H 2005: Stop criteria for cement grouting. Felsbau 23 (2005) NR. 3.
- ^{viii} Andersson H 1998: Chemical Rock Grouting – An experimental Study on Polyurethane Foams. Thesis, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers.
- ^{ix} Funehag J, 2007: [Grouting of Fractured Rock with Silica Sol; Grouting design based on penetration length](#). Thesis. Chalmers University of Technology.
- ^x Håkansson Ulf 1993: Rheology of fresh cement-based grouts. Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- ^{xi} Eklund D, Stille H 2008: Penetrability due to filtration tendency of cement based grouts. Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 23, No. 4, pp. 389-398.
- ^{xii} Funehag J, 2007: [Grouting of Fractured Rock with Silica Sol; Grouting design based on penetration length](#). Thesis. Chalmers University of Technology.
- ^{xiii} Axelsson M 2009: Prevention of erosion of fresh grout in hard rock. Thesis, Chalmers University of Technology, Division of Geology and Geotechnical Engineering, Göteborg.
- ^{xiv} Lindblom U 2009: Underhåll av berganläggningar – Processer och tidsförlopp. FoU-Väst Rapport 0902, Sveriges Byggindustrier.
- ^{xv} Gothäll R 2009: Behaviour of rock fractures under grout pressure loadings. Basic mechanics and special cases. Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- ^{xvi} Swedenborg S 2001: Rock Mechanical Effects of Cement Grouting in Hard Rock. Thesis, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers.

-
- ^{xvii} Dalmalm T 2004: Choice of Grouting Method for Jointed Hard Rock based on Sealing Time Predictions. Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- ^{xviii} Butron C 2009: Drip Sealing of Tunnels in Crystalline Rock: Pre-Excavation Design and Evaluation. Licentiate Thesis, Chalmers University of Technology, Division of Geology and Geotechnical Engineering, Göteborg.
- ^{xix} Funehag J, 2004: Sealing of Narrow Fractures in Hard Rock – A Case Study in Hallandsås, Sweden. Tunneling and Underground Space Technology, Vol 19:4-5, pp 1-8
- ^{xx} Kobayashi S, Stille H, Gustafson G, Stille B 2008: Real Time Grouting Control Method, Developåment and application using Äspö HRL data. SKB R-08-133.
- ^{xxi} Engström A, Persson K, Gustafson G 2009: Nyttan av vattenförlustmätningar vid tätning av tunnlrar. BeFo Rapport 91, Stiftelsen bergteknisk forskning, Stockholm.
- ^{xxii} Eriksson M, Stille H 2005: Cementinjektering i hårt berg. SveBeFo, Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning, Stockholm
- ^{xxiii} Evertsson C M 2000: Cone Crusher Performance, Ph D thesis, Chalmers University of Technology.
- ^{xxiv} <http://www.tekna.no/portal/page/portal/tekna/arrangementer>
- ^{xxv} Stanfors R, Triumpf C-A, Emmelin A 2001: geofysik för bergbyggare, SveBeFo K15, Stiftelsen Svensk bergteknisk Forskning, Stockholm.
- ^{xxvi} Dalmalm, T., Roslin, M., (2007), Geology induced pressure loss in grout holes, SveBeFo Bergmekanikdagen Mars 2007, pp 101-116, Stockholm, Sweden.
- ^{xxvii} Draganovic A, 2009 Bleeding and filtration of cement-based grout, Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden
- ^{xxviii} Jansson T., (1998), Calculation models for estimation of grout take in hard jointed rock, Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.