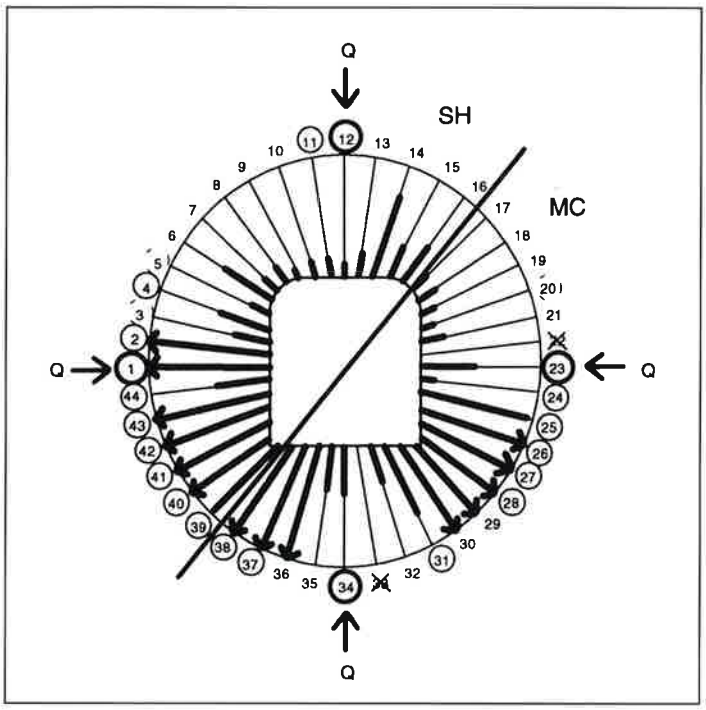
SveBeFo

STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING
SWEDISH ROCK ENGINEERING RESEARCH



INJEKTERINGSFORSKNING I BERGRUM UNDER KUNGLIGA BIBLIOTEKET

Helen Andersson

SveBeFo Rapport 14

STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING
SWEDISH ROCK ENGINEERING RESEARCH
SveBeFo Rapport 14

INJEKTERINGSFORSKNING I BERGRUM UNDER KUNGLIGA BIBLIOTEKET

Grouting research in caverns below the Royal Library in Stockholm

Helen Andersson
Chalmers Tekniska Högskola

Stockholm 1994
ISSN 1104-1773
ISRN SVEBEFO-R--14--SE

FÖRORD

I SveBeFo:s forskningsprogram har injekteringsteknik för tätning av bergtunnlar haft en viktig plats under flera år. Forskningen har huvudsakligen bedrivits vid KTH, där modeller för injekteringsmedels strömning tagits fram liksom metoder för egenskapsbestämning. Vid sidan av dessa projekt har vi fått tillfälle att medverka i en uppföljning av injekteringsarbeten vid utbyggnaden av bergrum för Kungliga biblioteket under Humlegården i Stockholm. Projektet har bestått i redovisning av utförda tätningsarbeten med högt ställda krav samt en serie försök i ett tunnelavsnitt för utvärdering av hålplacering, vattencementtal och cementtyper i några injekteringsskärmar. Dessa fältuppföljningar har varit av stort värde som komplement till tidigare nämnd modellutveckling och laboratorieundersökningar.

Arbetet har utförts av Helen Andersson vid avdelningen för bergbyggnadsteknik vid Chalmers tekniska högskola och projektets slutrapport föreligger härmed. Projektet har finansierats gemensamt av BFR, Nutek, SveBeFo, Tyréns och Statens fastighetsverk (tidigare Byggnadsstyrelsen) samt medverkan i fält av entreprenören NCC.

Stockholm oktober 1994

Tomas Franzén

SAMMANFATTNING

Första delen av rapporten innehåller den forskningsinriktade dokumentationen i form av utförd geologisk kartering, uppföljning av grundvattennivåer och utförd injektering i hela projektet.

Under projektering av bergrummen under Kungliga biblioteket i Stockholm utfördes kärnborrning, hällkartering och bergspänningsmätning. Minsta horisontalspänningen uppmättes till ca 3,4 MPa eller ca 3 gånger vertikalspänningen. Den geologiska karteringen har i rapporten sammanfattats överskådligt i 150-m avsnitt. Karteringen innehåller, förutom rent geologiska data som bergarter, sprickor och sprickzoner, även uppgifter om förinjektering och vatteninläckning i anläggningen.

Kraven avseende bibehållna grundvattennivåer definierades i en vattendom. Som mål för tillåten inläckning av grundvatten i bergrummen angavs 2 liter/min och 100 m tunnel. Mätningar av nivån har utförts på grundvattenytan i berggrunden, samt på undre respektive övre grundvattenytan i jordlagren runt anläggningen. Uppföljningen visade att grundvattennivåerna generellt har en långsamt avtagande trend. En temporär, kraftigare grundvattensänkning under våren 1993 redovisas jämte vidtagna åtgärder.

De höga täthetskraven medförde att man föreskrev ett omfattande tätningsprogram; innebärande systematisk förinjektering med cementsuspension och tät hålplacering. Statistisk bearbetning av injekteringsåtgången för transporttunneln samt galleri och mellanpall i bergrummen redovisas i rapporten. Injekteringsåtgången i hela projektet hade en mycket skev fördelning, med ett medelvärde större än medianen, och med höga värden på standardavvikelse och maximum. Även utförda efterinjekteringsinsatser av lokala inläckage presenteras.

Rapportens andra del beskriver injekteringstesterna, utförda i fyra injekteringsskärmar i transporttunnelns nedre del. Målsättningen med injekteringsförsöken sammanfattades i programmet för planerade forskningsinsatser i tre punkter, varav de två första kan sägas utgöra fristående undersökningar.

Den första punkten gällde huruvida effektiv, riktad spolning av borrhålen före injektering har en avgörande betydelse för inträngningsförmågan för cementsuspensionen. Slutsatsen blev att ökningen av transmissiviteten, och därmed eventuellt av inträngningsförmågan för suspensionen, i det här projektet inte motiverade det extra arbetet med spolningen.

Andra punkten gällde vad injektering med s k "Flex Mix-manschett" innebär och vilka framtida användningsområden en sådan metod har. Exempel på ett viktigt användningsområde är injektering i vertikala hål, eftersom manschettens två rör respektive kranar möjliggör evakuering av luft och stående vatten i borrhålet före injektering. Injektering av polyuretan med denna manschett utfördes i ringa omfattning i detta projekt, varför erforderligt underlag för utvärdering saknas.

I den tredje punkten sammanfattades det övergripande målet med undersökningen; det optimala injekteringsförfarandet i projektet. Under planeringen av försöken diskuterades bl a betydelsen av cementets kornstorlek, lämpligt antal injekteringshål, samt slutligen vattencementtalets inverkan.

Undersökningen inleddes med omfattande hydrauliska tester inom varje skärm. Testmetoder, samt olika sätt att utvärdera transmissiviteten beskrivs i rapporten och resultaten diskuteras och jämförs.

Testskärmarna delades in i två delar, vilka injekterades dels med SH-cement, dels med mikrocementet Mikrodur P-F. Injekteringsmaterial och -blandningar, samt arbetsförfarande, beskrivs. Antalet s k "singulära hål", dvs hål med stor materialåtgång med eller utan samband till omkringliggande hål, presenteras. Utvärdering av injekteringsresultatet utfördes på tre sätt; jämförelse av injekteringsfält och mer permeabla sektorer, respektive enstaka hål, samt med sprickplansmodeller.

En av de viktigaste frågorna inför injekteringsförsöken gällde huruvida kornstorleken på föreskrivet cement var avpassad så att kornen skulle kunna tränga in i och täta sprickorna i berget. Resultaten av injekteringsförsöken tyder på att användande av mikrocement istället för SH-cement gjorde störst nytta i det mer permeabla berget, dvs i den kraftigt uppspruckna röda graniten.

Totala åtgången av cementsuspension i det tätare berget befanns vara större vid användning av SH-suspension, jämfört med MC-suspension. Eftersom kärnor för fastställande av cementsuspensionens utbredning inte tagits, kan man inte med säkerhet förorda den ena eller andra cementsorten. Vattenförlustmätning med lång enkelmanschett visade att skärminjektering minskat bergets permeabilitet. Merparten av vattenförlusterna uppmättes längst in i de undersökta hålen.

En annan intressant fråga var om antalet injekteringshål var befogat. Den konservativa designfilosofin syftade till att minimera risken att hålen inte skulle träffa någon vattenförande zon. Ett alternativ till den täta hålsättningen kunde varit utförande med s k "split spacing", dvs förtätning av hålen efter en första injekteringsomgång, i kombination med en beredskap för effektiv efterinjektering om förekomst av singulära hål förorsakat problem med vatteninläckning.

Frågan huruvida SH-injektering som startar med vattencementtalet 3,0, skulle medföra oönskade sedimenterings- och filtreringseffekter belystes också. Mätningarna av separationen för suspensionerna SH 3,0 och MC 1,5, som utfördes i samarbete med Thomas Janson KTH, visade att medlen inte uppfyllde kriteriet för en stabil suspension. För att med sprickplansmodeller kunna förutsäga något om volymsåtgången under injekteringen, måste stabila injekteringsmedel användas. Vidare bör man vara medveten om risken för borttransport respektive sedimentation av instabila suspensioner, än vid en suspension med högre stagnationskoefficient och stabilitet. Likaså erhålls lättare s k "bridging-effekt", dvs överbryggning av cementkorn framför sprickköppning, ju större cementkornen är.

SUMMARY

The first part of the report deals with research orientated documentation of the geological mapping, follow-up of groundwater levels and grouting in the entire project.

In the planning of the caverns below the Royal Library in Stockholm, apart from core drilling and ground mapping, rock stress measurements were conducted. The minimal horizontal stress was measured approximately at 3,4 MPa. The geological mapping was presented in a clear manner in 150-m sections. The mapping includes, pure geologic data such as lithology, fractures and fracture zones, as well as information on pregrouting and leakage of water into the cavern.

High demands were made on maintained groundwater levels; furthermore, the water leakage into the caverns was limited to 2 litres/min and 100 metres of tunnel. Measurements were made of the groundwater level in the bedrock around the caverns, and of the lower and upper groundwater level in the soil. The follow-up showed a slowly declining trend of the groundwater level. A temporary groundwater drawdown during the spring of 1993, and measures taken against it, is described.

The urgent need for tightness called for an extensive sealing program with systematic pregrouting with cement suspension and close hole spacing. Statistical results of the grout consumption in the access tunnel, the gallery and the middle bench of the caverns is presented. The consumption in the whole project had a very skewed distribution, with the mean larger than the median, and with high values for the standard deviation and the maximum. Finally, measures taken for postgrouting is presented in the report.

The second part of the report describes the grouting tests, executed in four grouting fans in the lower end of the access tunnel. The objective of the grouting tests was summarized in three points in the research program; the first two of these may be looked upon as separate investigations.

The first point dealt with effective, directed flushing of the boreholes before the grouting, and whether this is of crucial importance for the penetration of the cement suspension. The conclusion was that the small increase of the transmissivity, and therefore possibly the penetration of the suspension, did not motivate the extra work involved with the flushing in this project.

The second point dealt with the technique of grouting with a so called "Flex Mix packer" and possible future uses for such a packer. An example of an important application is grouting in vertical holes, since the two tubes and hoses of the packer makes evacuation of air and standing water in the borehole possible before grouting. Grouting of polyurethane, using a Flex Mix packer was little used in this project, why there is no foundation for a proper evaluation.

The last point concludes the main objective with the investigation; namely definition of an optimum grouting procedure in this project. During the planning of the tests questions concerning the importance of the particle size of the cement, adequate borehole spacing and finally the influence of the water-cement ratio, were addressed.

Extensive hydraulic tests were made first in the investigation. Methods for testing and different ways to evaluate the transmissivity are described in the report. Results obtained with different methods of evaluation are discussed and comparisons are made.

The tested grouting fans were divided in two parts, which were grouted partly with ordinary grouting cement (SH), partly with a microcement (MC), named Mikrodur P-F. The number of so called "singular holes", meaning holes with a large consumption of suspension are presented. The grouting result are evaluated in three ways; comparisons of grouting fields and permeable sectors within them, as well as evaluation of single holes, and analyses using fracture flow models.

One important question before the grouting tests concerned the particle size of the prescribed cement and whether it was appropriate for penetrating into and sealing the fractures in the rock. The results indicate that microcement would have been preferred over ordinary grouting cement in the permeable and crushed red granite.

The total consumption of cement suspension in the competent rock was found to be larger if ordinary cement instead of microcement was used. Since rock cores to establish the propagation of cement suspension were not taken, the cement type cannot be recommended with certainty. Waterloss measurement with a long packer indicated that grouting decreased the permeability of the rock; most of the water loss was found in the end of the holes.

Another question of interest was whether the number of grouting holes was justified. The conservative design philosophy aimed at minimizing the risk that the holes would not penetrate water bearing zones. An alternative to the close hole placement could be so called "split spacing", i.e. densification of the hole geometry after the first grouting, in combination with effective post grouting if so called singular holes would cause problems with water leakage.

Finally the question was raised whether grouting with ordinary grouting cement, starting with a W/C-ratio of 3,0, would lead to unwanted sedimentation and filtration effects. The measurements of separation, executed in cooperation with Thomas Janson KTH, for the suspensions SH 3,0 and MC 1,5 showed that these grouts did not fulfil the criteria for a stable suspension. In order to be able to predict anything about the volume consumption during grouting from fracture flow models, stable grouts must be used. Furthermore one should be aware of the risk of removal and sedimentation of unstable suspensions, compared with suspensions with high stagnation coefficient and stability. Also, so called "bridging effects", i.e. flocking of particles in front of fracture openings, occur more easily with larger particles.

FÖRFATTARFÖRORD

Under projekteringen av arkiven i bergrum under Kungliga biblioteket lades stor vikt vid de svårigheter som kunde uppkomma, både under och efter utsprängningen, på grund av bergrummens centrala läge.

Byggherren - Kungliga byggnadsstyrelsen - gav bergavdelningen vid Chalmers tekniska högskola möjligheten att följa projektet och utföra forskningsinriktad dokumentation samt experiment under bergarbetena.

Forskargruppen med professor Ulf Lindblom som forskningsledare, bestod av Jibao He, Ingvar Bogdanoff samt undertecknad. Jibao He studerade de bergmekaniska förhållandena kring bergrummen och Ingvar Bogdanoff utförde vibrationstester med alternativa sprängmedel, men denna rapport behandlar framförallt de experimentella injekteringstester som utfördes under våren/sommaren 1993. Förutom dessa tester presenteras även uppföljning av grundvattennivåer, geologisk kartering samt injektering.

Avdelningen för bergbyggnadsteknik vid Chalmers tekniska högskola har med stöd från NUTEK, BFR, SveBeFo (tidigare BeFo), Tyréns och Statens fastighetsverk (tidigare Byggnadsstyrelsen) genomfört den nämnda forskningen. Stor praktisk hjälp har entreprenören NCC bidragit med.

En stor hjälp har Roberth Colliander varit, som utfört större delen av karteringspresentationen, i form av ett examensarbete som avslutning på sin geologexamen vid Göteborgs universitet.

Thomas Janson, doktorand vid avdelningen för Jord- och bergmekanik på KTH, som medverkat med mätning av cementsuspensionernas reologiska egenskaper samt utvärdering av injekteringen enligt sprickplansmodeller I-III, står som huvudförfattare till avsnitt 2.3.4.

Ett särskilt tack riktas till Erik Eriksson (KBS), Göran Manell (NCC) och Bo Svallhammar, för aktivt stöd under fältarbetena under våren 1993.

Göteborg i juni 1994

Helen Andersson

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING I

SUMMARY III

FÖRFATTARFÖRORD V

BAKGRUND 1

1. DOKUMENTATION 2

1.1 Geologiska förhållanden 4

1.1.1 Lokal geologi 4

1.1.2 Bergspänningsmätning 5

1.1.3 Krav på karteringsredovisning 5

Presentationsteknik ("Äspömodell") 6

1.1.4 Sammanställning av kartering 6

1.2 Grundvattensituation 7

1.2.1 Utgångsläge 7

1.2.2 Omgivningspåverkan - krav och mätprogram 8

1.2.3 Sammanställning av grundvattenmätningar 9

Grundvattenyta i berggrunden 10

Undre grundvattenyta i jordlagren 11

Övre grundvattenyta i jordlagren 12

1.2.4 Temporär grundvattensänkning 14

Åtgärder - infiltration och injektering 15

1.3 Injektering 15
1.3.1 Täthetsskrav och anvisningar 15
1.3.2 Injekteringsmaterial- och utrustning 17
1.3.3 Sammanställning av förinjektering 18
Statistisk bearbetning 18
Botteninjektering 22
1.3.4 Efterinjektering 23
Före avetablering 23
Efter avetablering 25

2. INJEKTERINGSFÖRSÖK 29

2.1 Inledning 29
2.1.1 Frågeställningar 29
2.1.2 Arbetsgång 30
2.1.3 Singulära hål 31

2.2 Inledande hydrauliska tester 33
2.2.1 Pumputrustning 33
2.2.2 Testmetoder 34
Vattenförlustmätning med enkelmanschett 34
Spolning av hål 34
Vattenförlustmätning med lång enkelmanschett 35
Interferensmätning 40
2.2.3 Transmissivitet - utvärdering 41
Moyés metod (Lugeon) 41
Jacobs metod 42
Avstånd - avsänkningsanalys 45
2.2.4 Diskussion kring resultat 47
Sammanfattning 47
Jämförelse av olika utvärderingsmetoder 48

2.3 Injekteringstester 51

2.3.1 Utförande 51

Val av injekteringsfält 51
Injekteringsmaterial- och blandningar 52
Beskrivning av injekteringsarbetet 53
Beskrivning av Flex Mix-injekteringen 54

2.3.2 Utvärdering av injekteringsresultat - fält och sektorer 58

Beskrivning av injekteringsskärmarna 58
Utvärderingsmetodik 59
Redovisning av utvärdering 59
Sammanställning 62

2.3.3 Utvärdering av injekteringsresultat - enstaka hål 64

Urvalsprincip 64
Databas 65
Redovisning av utvärdering av enstaka hål 66

2.3.4 Utvärdering av injekteringsresultat - sprickplansmodeller* 68

Cementbaserade injekteringsmedel med tillsatser 68
Egenskapsmätning av cementbaserade injekteringsmedel 69
Mätresultat - fält- och laborationsmätningar 71
Sprickplansmodeller 73
Resultat av sprickplansmodeller 76
Synpunkter på medel, mätningar och sprickplansmodeller 77

3. SLUTSATSER 78

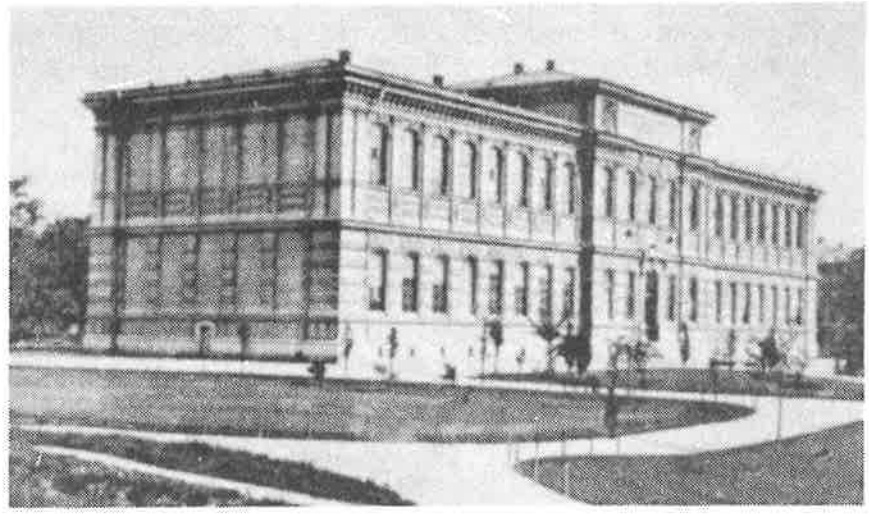
REFERENSER 81

BILAGOR 83

* Avsnitt 2.3.4 har huvudsakligen författats av doktorand Thomas Janson på avdelningen för Jord- och bergmekanik på KTH i Stockholm

BAKGRUND

Den ursprungliga byggnaden för Kungliga biblioteket färdigställdes och invigdes 1878. Med en bärande stomme av gjutjärn, inspirerat av British Museum i London och Bibliotèque Nationale i Paris, var biblioteket ett ovanligt inslag i svensk byggkonst. Fotografiet nedan visar Kungliga biblioteket som det såg ut vid invigningen 1878.



Själva byggnaden är således av stort arkitektoniskt intresse och har i sig ett betydande kulturellt värde, men orsaken till dess tillkomst ligger ännu längre tillbaka i tiden. Redan under 1600-talet deklarerade kungen att alla tryckta alster i Sverige skulle sändas till huvudstaden. Vad som alltså började som en kontrollåtgärd i syfte att möjliggöra censur av olämpliga texter, utvecklades dock till ett sätt att spara litterära och kulturella yttringar för eftervärlden.

Kungliga biblioteket blev och är fortfarande mottagare av allt tänkbart tryckt material; tidtabeller, tidningar, direktreklam, böcker, prislistor... En av världens största samlingar av planscher finns på biblioteket; ca 450 000 st varav den äldsta från år 1705. Idag tar biblioteket emot ca 150 000 alster varje år, vilket motsvarar ca 1 500 hyllmeter.

En av anledningarna att ursprungligen placera biblioteket i en parkmiljö, var att möjliggöra framtida utbyggnad. Ut - och ombyggnadsarbeten utfördes också på 20-talet, och mellan 1956 och 1970. Det s k Annexet, som 1968-70 sprängdes ned i berget strax bakom biblioteket, utgjorde ett betydande tillskott i arkivplats.

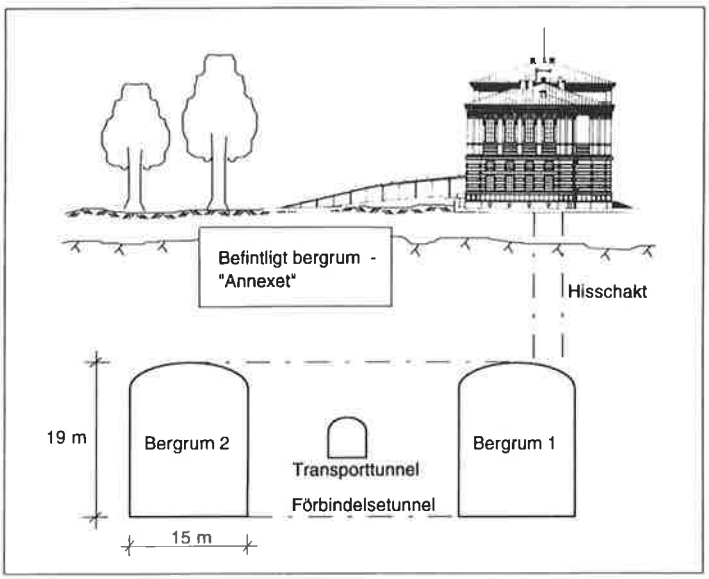
Parkområdet Humlegården är dock ett viktigt inslag i miljön i innerstaden och används flitigt för rekreation både av omkringboende och tillresande. Ytterligare utbyggnad kunde därför inte tillåtas, varför regeringen 1990 tog beslutet att spränga ut arkiv i berggrunden under Kungliga biblioteket.

1. DOKUMENTATION

Under många år har arkivkapaciteten vid Kungliga Biblioteket i Stockholm varit ganska liten jämfört med behovet. På grund av begränsat byggutrymme i huvudstaden, bygg- kontra driftskostnader etc, fattades för ett par år sedan beslutet att bygga ett underjordiskt arkiv i anslutning till biblioteket.

Med tanke på bergrummens centrala läge och den framtida användningen av anläggningen ställdes i handlingarna höga krav avseende vibrationer från sprängningen, tillåtet inläckage i bergrummen, förstärkningar osv. En vattendom fastställde kraven avseende grundvattennivån.

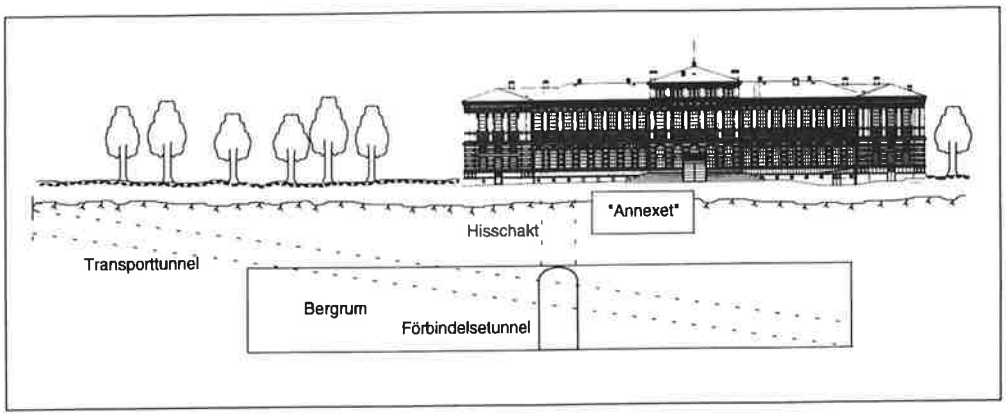
Arkivet under biblioteket utgörs av två bergrum som inreds med femvåningsbyggnader. Bergrummens bottennivå ligger ca 37 m under markytan, dvs nivån –29 m, och de är drygt 19 m höga, 15 m breda och 150 m långa.



Figur 1.1 Principiell sektion för arkiven under Kungliga Biblioteket

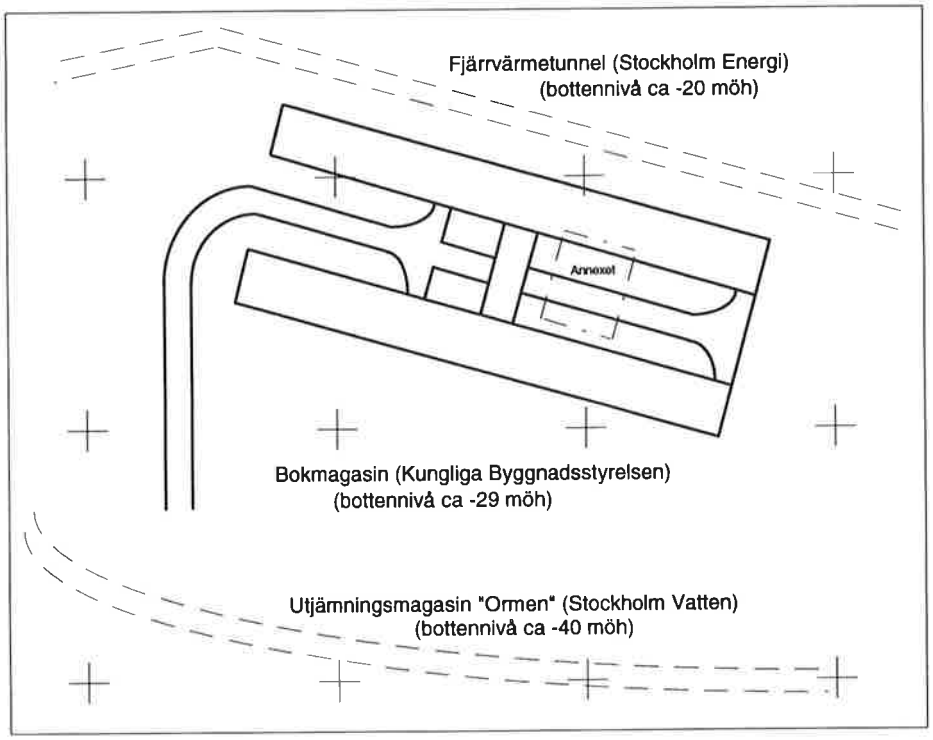
Det befintliga bergrummet, kallat "Annexet", som syns bakom biblioteket i figur 1.1 ovan, byggdes för avlastning av bibliotekets arkivutrymmen redan 1968-70.

En tunnel med påslag strax intill Engelbrektsplan, som efter avslutat arbete kommer att förslutas, anlades för transporter ned i berget under byggnadsskedet (figur 1.2). Bibliotekets huvudbyggnad ansluts direkt till det underjordiska arkivet med ett hisschakt till bergrum 1, ytterligare ett antal försörjningschakt och tvärtunnlar mellan bergrummen ingår i anläggningen.



Figur 1.2 Principiell längdsektion för arkiven under Kungliga Biblioteket

I figur 1.3 nedan visas en generell plan över arkiven och berganläggningar i dess omedelbara närhet. Fjärrvärmetunneln, som byggdes under 70-talet, ligger ca 20 m norr om arkiven, men på en grundare nivå ca –20 m. Utjämningsmagasinet söder om arkiven, "Ormen" kallad, ligger ca 100 m söderut på nivån –40 m. Ormen byggdes under tidigt 90-tal.



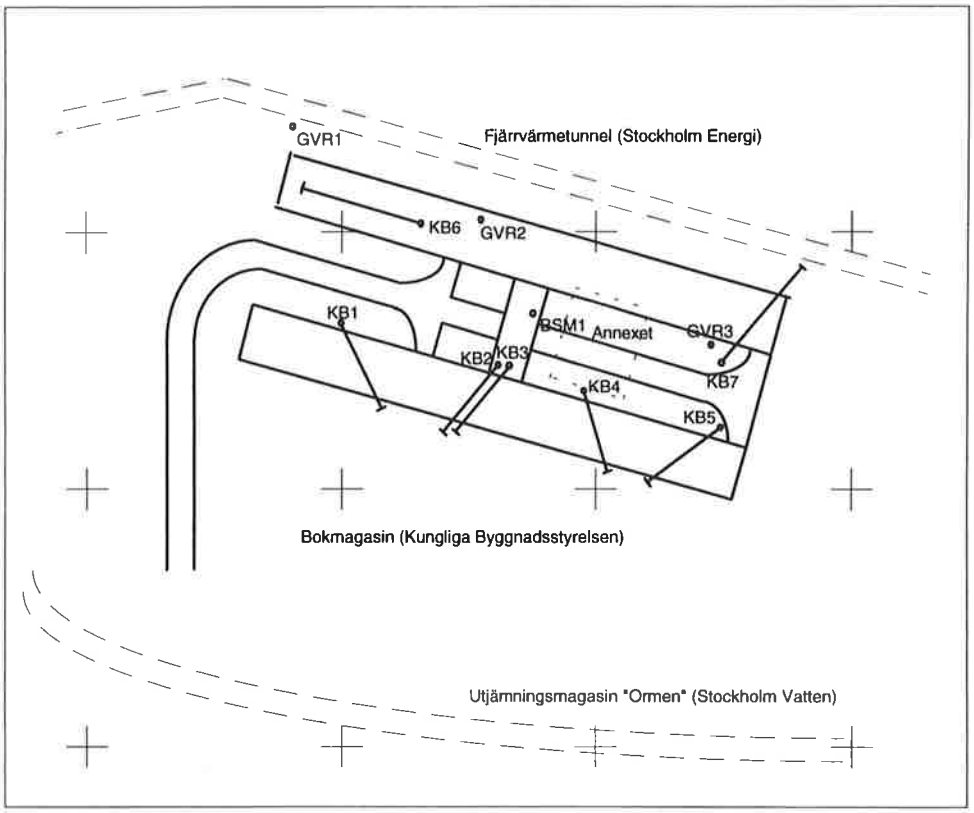
Figur 1.3 Principiell plan över arkiven under Kungliga Biblioteket samt närliggande bergtunnlar

I entreprenörens åtagande avseende kvalitetssäkring och egenprovning ingick bland annat geologisk kartering efter varje salva, regelbunden mätning av grundvattnets nivå och kvalitet, samt redovisning av tid- och materialåtgång för injekteringsarbetena. Chalmers fick möjlighet att påverka protokollens utformning, samt mätningarnas intensitet, och erhöll löpande ett exemplar av dessa.

1.1 Geologiska förhållanden

1.1.1 Lokal geologi

Under projekteringen av bergrummen utfördes, förutom jord- och bergsondering för fastställande av bergöverytans läge, även hällkartering och kärnborrningar. Inför planeringen av det första bergrummet utfördes fem kärnborrhål (KB1-5), och när bergrum 2 tillkom utfördes ytterligare sex hål (BSM1, GVR1-3 samt KB6-7). Kärnborrhålens lägen redovisas i figuren nedan.



Figur 1.4 Kärnborrhålens läge

Berggrunden under Kungliga biblioteket är en grå, medel- till grovkornig granit (s k stockholmsgranit) och en grå, medelkornig gnejs. Berget är genomskuret av smala

pegmatitgångar. Svaghetszoner är sällsynta men omvandlad, starkt vittrad röd granit förekommer. Sprickfrekvensen är generellt låg och bergkvaliteten god utifrån bestämning av RQD-faktor (80-100%).

Under byggnadsskedet upprättades av Mineconsult AB, på basis av erfarenhet från projektet "Ormen", en prognosmodell över strukturer som kunde ha inverkan på bergrumsarbetena för Kungliga Biblioteket. Korrelationen av strukturerna baserades framförallt på Tyréns kartering av fjärrvärmetunneln norr om biblioteket, samt karteringar i tunnelmagasinet Ormen (Morfeldt, 1993).

1.1.2 Bergspänningsmätning

Bergspänningsmätning utfördes i ett av kärnborrhålen, BSM1 (se figur 1.4), som borrades i pelaren mellan de planerade bergrummen inför projekteringen av bergrum 2. Mätningen med hydraulisk spräckning utfördes av RENCO AB (Klasson o. Ljunggren, 1992) och syftade till att bestämma det horisontella spänningsfältet till magnitud och orientering.

Sju mätpunkter ingick i mätserien och den minsta horisontella spänningen beräknad ur analoga tryckdata, σ_h, uppmättes inom djupintervallet till ca 3,4 MPa. Förhållandet mellan den största och den minsta horisontalspänningen, σ_H, var ca 1,2 och orienteringen av σ_H var ca N83°W.

Resultaten från bergspänningsmätningen låg till grund för den detaljerade stabilitetsanalys för bergrummen som Jibao He från Chalmers forskargrupp utförde. Analysen presenteras i en separat rapport (He, 1994).

1.1.3 Krav på karteringsredovisning

I entreprenörens åtagande ingick geologisk kartering efter varje salva under bergschaktningsarbetet. Karteringen skulle utföras i enlighet med bl a anvisningar i RA 83 och MarkAma 83, och utfördes av entreprenörens geolog Per Salomonsson efter ett förslag avseende omfattning utarbetat av Chalmers. Principer fastlagda av SKB (Christiansson o. Stenberg, 1991), fungerade som checklista vid upprättandet av förslaget för insamlande av karteringsdata.

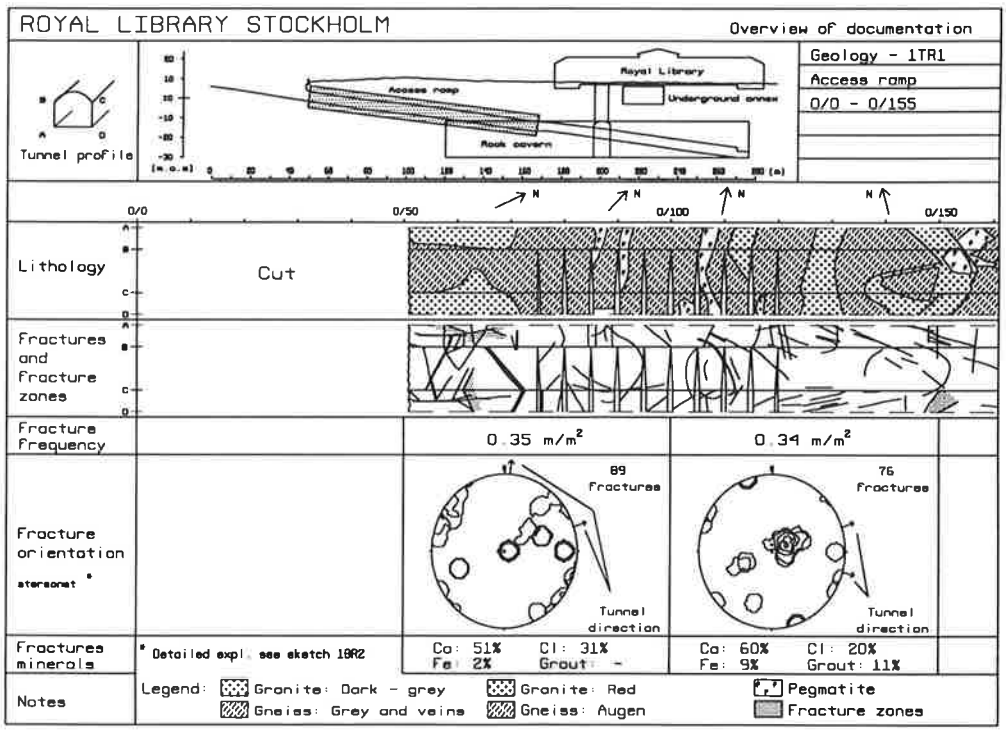
I karteringen dokumenterades bergarter och deras fördelning längs tunnelns tak och väggar, den frilagda bergytans kvalitet och textur, sprickfrekvens, sprickornas strykning respektive stupning och dessas variationer, kross- och sprickzoners lägen och utbredning, sprickfyllnader, beläggningar samt sprickornas råhet, observerad vatteninläckning i form av inrinnande vatten och fuktutbredning. I bilaga 1 visas ett exempel på ett karteringsprotokoll, samt de koder som använts vid karteringsarbetet.

Presentationsteknik ("Äspömodell")

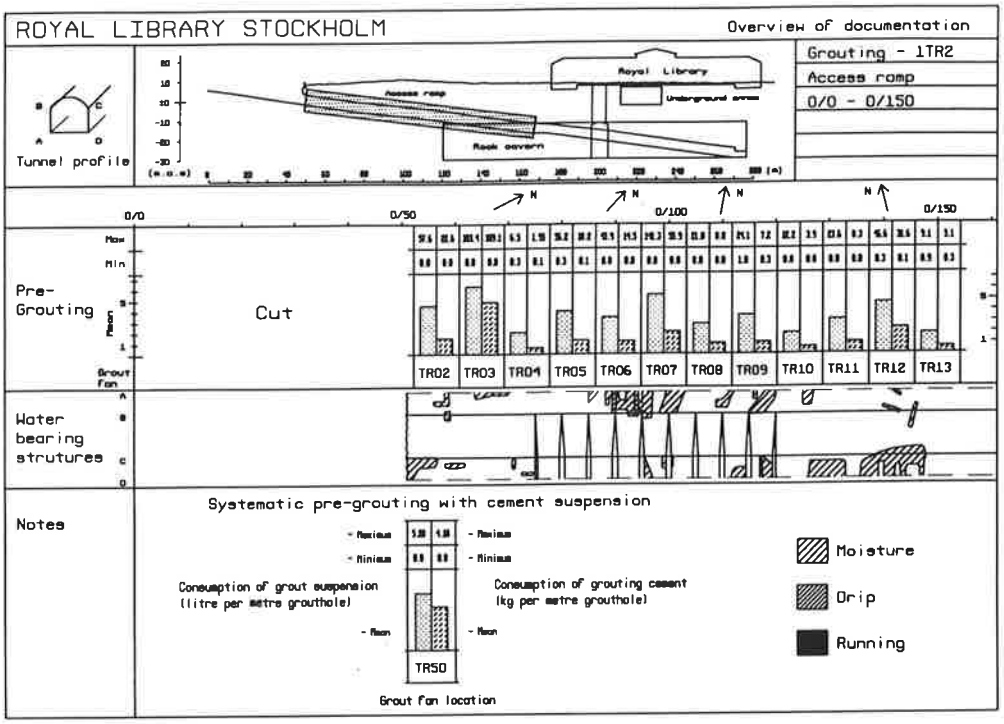
Presentationen av karteringen som förutom rent geologiska data som bergarter, sprickor och sprickzoner etc, även omfattar bl a åtgång av injekteringsmaterial samt inläckning av vatten, var till formen inspirerad av karteringspresentationen från Äspölaboratoriet som bl a presenteras i SKB Annual Report (1991). Karteringen har presenterats med hjälp av datorprogrammet Rockware.

1.1.4 Sammanställning av kartering

Fullständig sammanställning av den geologiska karteringen från bergrummen under Kungliga Biblioteket presenteras i bilaga 2. Som exempel visas här transporttunnelns sidor 1 och 2 för sektion 0/000 - 0/155 (förskärning fram till 0/050). Sida 1 visar bergartsfördelningen och orienteringen av sprickorna, medan sida 2 visar för- respektive efterinjektering, samt vatteninläckning.



Figur 1.5 Kartering transporttunnel 0/000 - 0/155 - sida 1



Figur 1.6 Kartering transporttunnel 0/000 - 0/155 - sida 2

1.2 Grundvattensituation

1.2.1 Utgångsläge

Mätningar av grundvattennivån i observationshål kring biblioteket hade utförts av Tyréns sedan 1989, vissa hål hade mätts under en period i mitten av 70-talet, i samband med anläggningen av fjärrvärmetunneln norr om biblioteket.

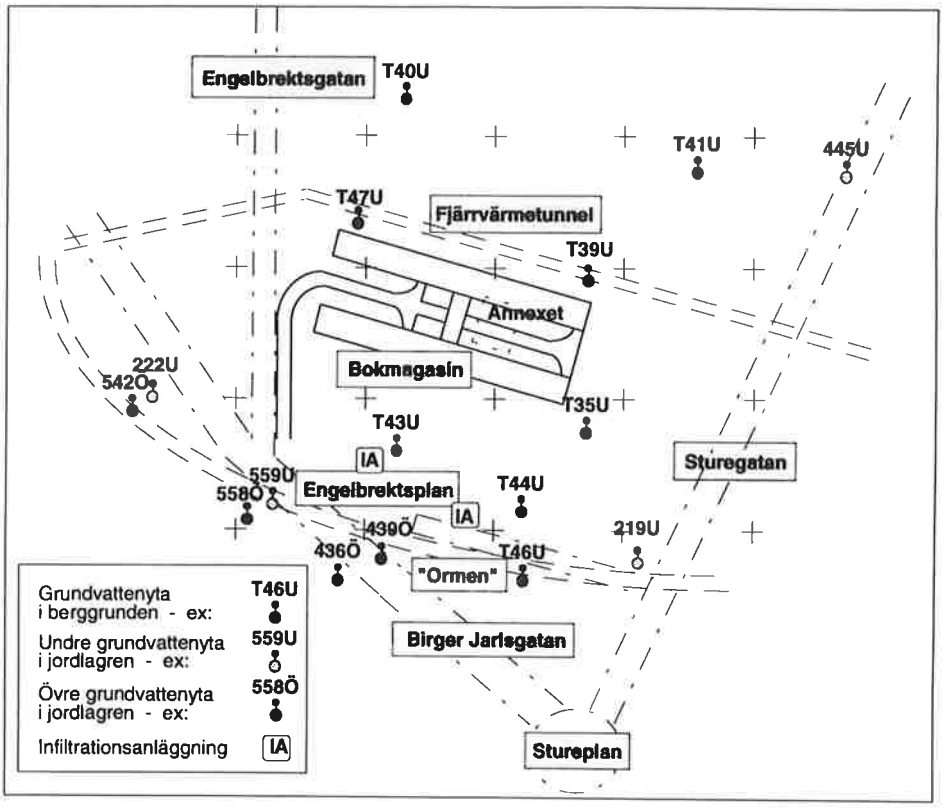
De högt satta krav som nämndes inledningsvis innebar bl a en tillåten inläckning i anläggningen på 2 liter/min·100 m tunnel (täthetsklass I enligt Stockholms Gatukontors Bergtekniska anvisningar). Under drivningsskedet är tillförlitliga mätningar vid mätvallar svåra att åstadkomma, varför karteringsunderlag samt kontroll av grundvattennivåer då var av stor betydelse. Vid projektets början uppmättes en generellt låg nivå på grundvattnet (i förhållande till pålavskärningsplan), varför kraven på gott injekteringsresultat var stora.

I ett tidigt skede av projektet upprättades en nära kontakt mellan olika intressenter i området, för att på ett effektivt sätt kunna säkerställa att kraven enligt vattendomen skulle uppfyllas. I gruppen av intressenter ingick representanter från Byggnadsstyrelsen, Stockholm Vatten och dessas konsulter.

1.2.2 Omgivningspåverkan - krav och mätprogram

Entreprenörens åliggande omfattade kontroll av grundvattennivån i rör inom ett område på ca 300 m kring biblioteket. Ritningen i figur 1.7 visar de observationsrör i närheten av anläggningen som studerats här. Merparten av rören skulle under bergarbetena mätas 2 ggr per vecka, vissa varje dag.

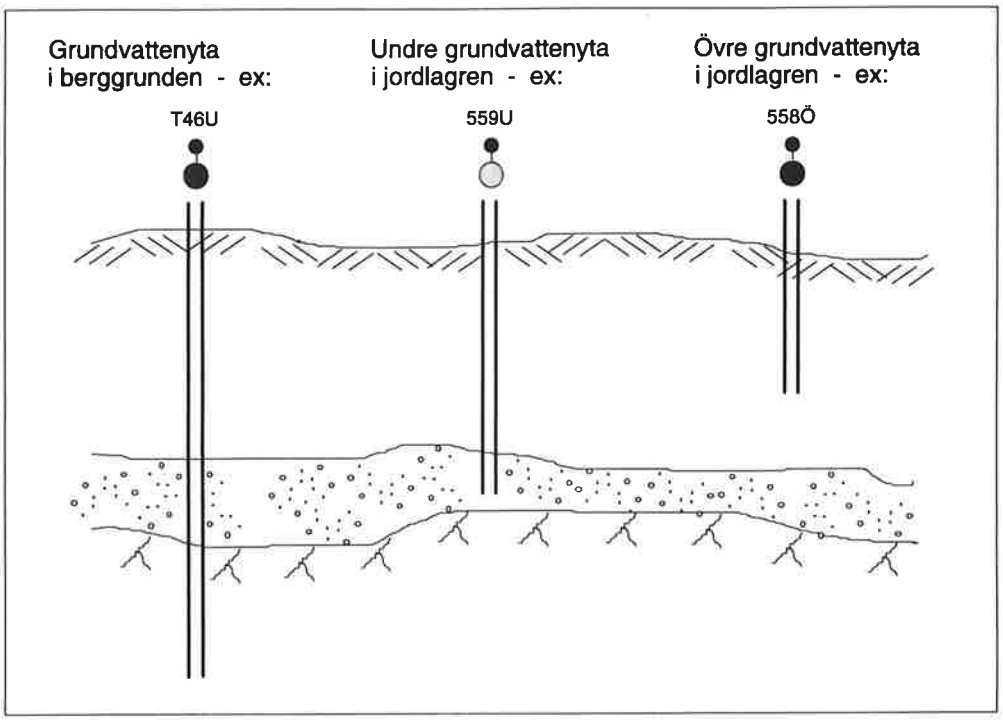
Kontrollintensiteten kunde ändras om nivån t ex sjunkit markant sedan föregående mättillfälle. Om nivån sjunkit under lägsta tillåtna grundvattennivå enligt handling, och fastställd i vattendom, skulle infiltrationsanläggning sättas igång.



Figur 1.7 Grundvattenobservationshål i närheten av anläggningen

Teckenförklaringen i figur 1.7 visar på tre olika typer av grundvattenobservationshål, som mäter grundvattenytan dels i berggrunden, dels i den övre respektive undre grundvattenytan i jordlagren. Den grundvattenyta som påverkas primärt är den i berggrunden. Grundvattenytan i jordlagren påverkas sekundärt och i första hand påverkas grundvattenytan i de undre jordlagren, dvs i friktionsjordlagren närmast bergöverytan. Graden av påverkan styrs av den hydrauliska kontakten mellan berggrund och friktionsjord.

Senare kan även grundvattenytan i de övre jordlagren, dvs leran som överlagrar friktionsjorden, komma att påverkas. Sänkning av denna grundvattenyta styr sättningsförloppet för ovanförliggande bebyggelse. Figur 1.8 visar schematiskt de tre olika typerna grundvattenobservationshål.



Figur 1.8 Olika typer grundvattenobservationshål (efter Lindblom, 1994)

1.2.3 Sammanställning av grundvattenmätningar

Grunddata för de grundvattenobservationshål som ingår i följande sammanställning (se figur 1.7), presenteras i det följande i tabellerna 1.1-1.3. Förutom spetsnivå samt berg-överytans nivå där den finns angiven, anges "normalnivå", trend och infiltrationsgräns. Med normalnivå menas den grundvattenyta som fanns före byggstart, eventuell trend anges i cm per år. För vissa hål kan normalnivå inte anges pga för stora variationer. Infiltrationsnivå är den gräns för grundvattenytan då, enligt vattendom, infiltration skulle påbörjas.

I bilaga 3 finns diagram för varje enskilt hål där mätningar av grundvattenytan mellan juni 1989 och november 1992, då berguttaget var färdigt, ingår. I diagrammen är trender inlagda där så är befogat, trenderna är beräkande på mätvärdena före september 1992, dvs före byggstart. Slutligen finns en markering om tidpunkten för infiltrationen, som beskrivs närmare i avsnitt 1.2.4.

Diagrammen i bilaga 3 innehåller även information om nederbörd under åren 1989 - 1993. Nederbördsobservationerna är hämtade från SMHIs informationsskrift Väder & Vatten, vald klimatstation 'Stockholm', dvs nederbördsmängden är registrerad vid Stockholms gamla Observatorium i närheten av Odenplan.

Ytterligare observationshål finns som inte har studerats; urvalet baserades dels på närhet till anläggningen, dels på mängden information av intresse. Likaså har hål som inte mätts under lång tid uteslutits, bl a de kärnborrade hål (GVR1-3) som borrades i anslutning till projektering av bergrum 2 (se avsnitt 1.1.1). Den korta mätserien ger ingen information om eventuella trender, och då hålen inte heller ingår i vattendomen saknas infiltrationsgräns för dem. Den omedelbara närheten till bergrummen gjorde även att två av hålen injekterades igen under drivningen.

Grundvattenyta i berggrunden

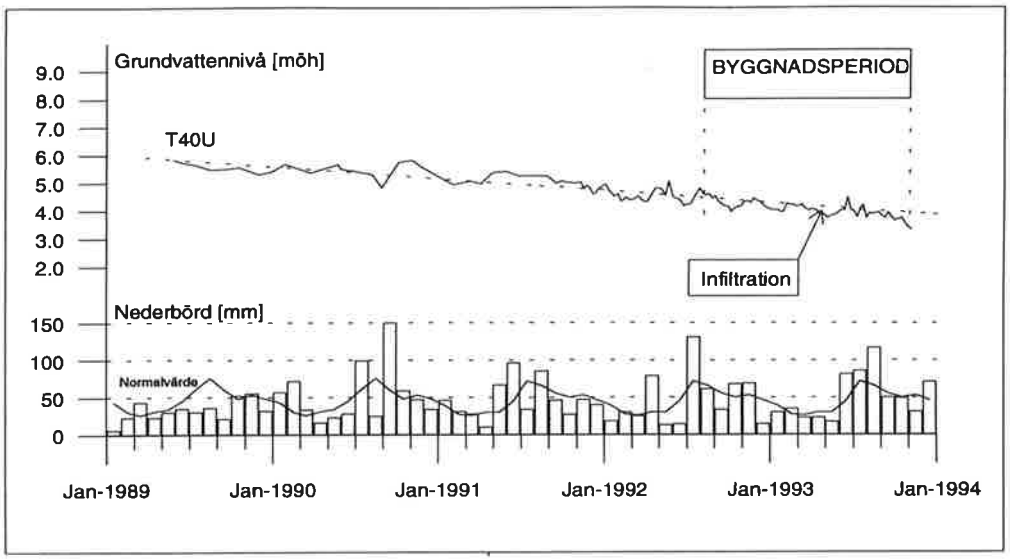
Samtliga brunnar i berggrunden där trend för grundvattenytan kan urskiljas har en avtagande sådan, utom T41U där nivån ökar med knappa 10 cm per år (se tabell 1.1). En förklaring till detta ovanliga fenomen skulle möjligen vara en långsam återhämtning efter en kraftig avsänkning vid tidigare byggnationer i området.

Tabell 1.1 Observationshål för grundvattenyta i berggrunden

Hål-beteckning	Berg-överyta	Spets-nivå	"Normal-nivå"	Trend [cm/år]	Infiltrations-gräns
T35U	+1,3	−3,25	—	—	−3,0
T39U	+1,5	−4,78	+0,4	−3,6	−2,0
T40U	+4,5	−9,97	+4,9	−43,2	+4,0
T41U	+2,0	−9,54	+4,2	+9,3	+3,0
T42U	+4,0	−18,67	—	—	−3,0
T43U	+2,1	−10,56	—	—	+1,0
T44U	±0,0	−10,38	—	—	−1,0
T46U	—	−1,65	±0,0	−11,0	±0,0

Brunnar där "normalnivå" respektive trend inte kan urskiljas har antingen en kraftigt varierande grundvattennivå (T42U), eller påverkas uppenbarligen starkt av yttre faktorer såsom undermarksbyggande i området (T35U, T43U, T44U). De tre sistnämnda hålen behandlas närmare i avsnitt 1.2.4.

Bergbrunn T40U norr om biblioteket har den snabbast avtagande grundvattennivån, med dryga 40 cm per år, och presenteras i figur 1.9. Även nederbördsobservationer från en närliggande klimatstation (Observatoriekullen i närheten av Odenplan) är inlagda.



Figur 1.9 Grundvattenvariation i T40U, mellan juni 1989 och november 1993, samt nederbördsobservationer från Observatoriekullen

Hål T40U verkar svara på nederbördsvariationer, men var däremot opåverkat av infiltrationen under våren 1993, vilket är rimligt med tanke på det stora avståndet mellan hålet och infiltrationsanläggningen.

Undre grundvattenyta i jordlagren

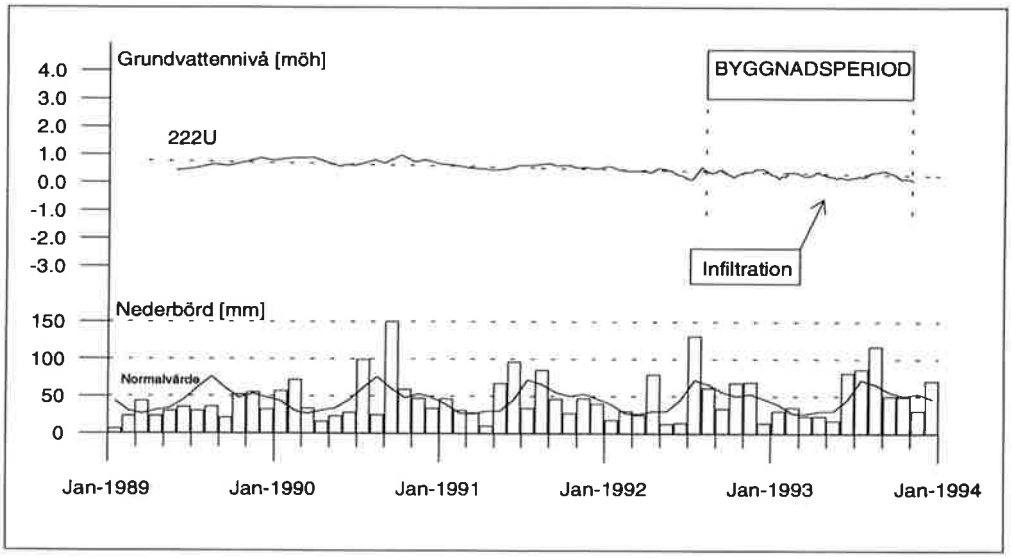
Observationshål 445U beläget vid Sturegatan, nordöst om biblioteket, varierar relativt mycket med ±0,5 m kring "normalnivån" +7,5 möh. Variationerna tycks inte var kopplade till nederbördsvariationerna (se diagram bilaga 3).

Efter att ha haft en stadigt avtagande trend på drygt 5 cm/år, vände kurvan för hål 219U i början av 1993. Möjligen påverkades hålet även av infiltrationen våren 1993, men tydlig orsak till att vändningen inträffade ca 4 månader tidigare saknas.

Snabbast avtagande grundvattennivå i observationshål för undre grundvattenytan i jordlagren, har 222U (figur 1.10) nära tunnelmagasinet Ormen sydväst om biblioteket. Redan före byggstart för arkiven låg grundvattenytan i detta hål på gränsen för infiltrationsstart, och med den avtagande trenden på ca 11 cm per år passerades gränsen tämligen omgående.

Tabell 1.2 Observationshål för undre grundvattenyta i jordlagren

Hål-beteckning	Berg-överyta	Spets-nivå	"Normal-nivå"	Trend [cm/år]	Infiltrations-gräns
219U	–6,0	–5,72	±0,0	–5,5	–0,5
222U	–2,9	–2,90	+0,5	–11,3	+0,4
445U	—	+4,50	+7,5	–3,7	+ 7,0



Figur 1.10 Grundvattenvariation i 222U, mellan juni 1989 och november 1993, samt nederbördsobservationer från Observatoriekullen

Passering av infiltrationsgränsen bedömdes bero uteslutande på den långsiktiga avsänkningen av hela området (Lindblom, 1992), och inte på bergschakten för arkiven. Hålet reagerar för övrigt ytterst sparsamt på variationer i nederbördsmängder, och inte heller erhölls respons vid infiltrationstillfället under våren 1993 (se avsnitt 1.2.4).

Övre grundvattenyta i jordlagren

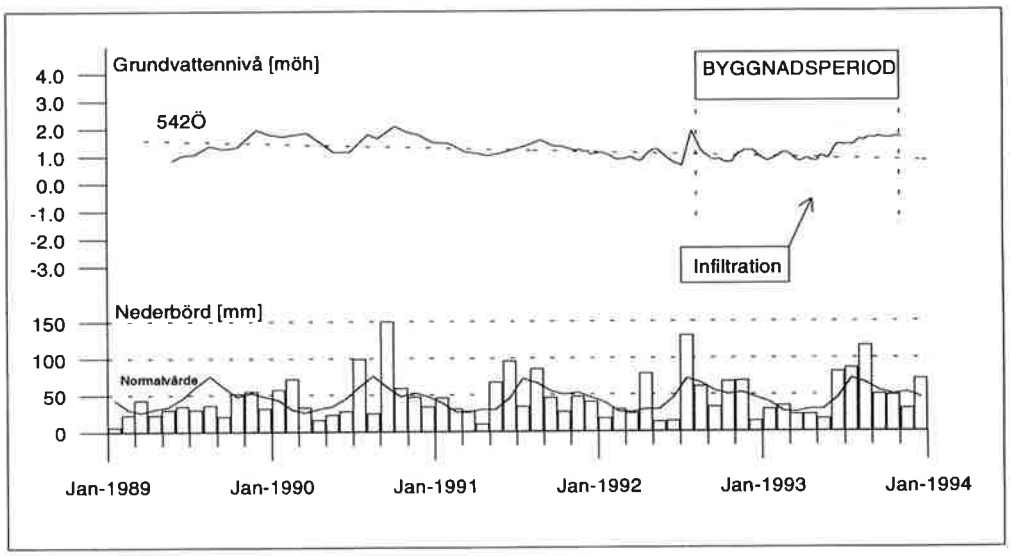
Hål 439Ö, beläget söder om biblioteket och i nära anslutning till tunnelmagasinet Ormen, synes vara synnerligen opåverkat av både variationer i nederbörd och undermarksbyggnationer i området. Grundvattennivån i hålet som registrerar ändringar i övre grundvattenytan i jordlagren, dvs leran, ligger i det närmaste konstant på +1,0.

Tabell 1.3 Observationshål för övre grundvattenyta i jordlagren

Hål-beteckning	Berg-överyta	Spets-nivå	"Normal-nivå"	Trend [cm/år]	Infiltrations-gräns
436Ö	—	−1,24	±0,0	−5,8	±0,0
439Ö	—	−0,34	+1,0	−0,6	+0,4
542Ö	—	+0,52	+1,2	−15,9	+1,0

Några meter söder om 439Ö ligger hål 436Ö som har en långsiktigt avtagande trend på nästan 6 cm per år. Hålet, vars "normalnivå" redan vid byggstart låg nära infiltrationsgränsen, tycks också reagera något på långvarigt ökad nederbördsmängd.

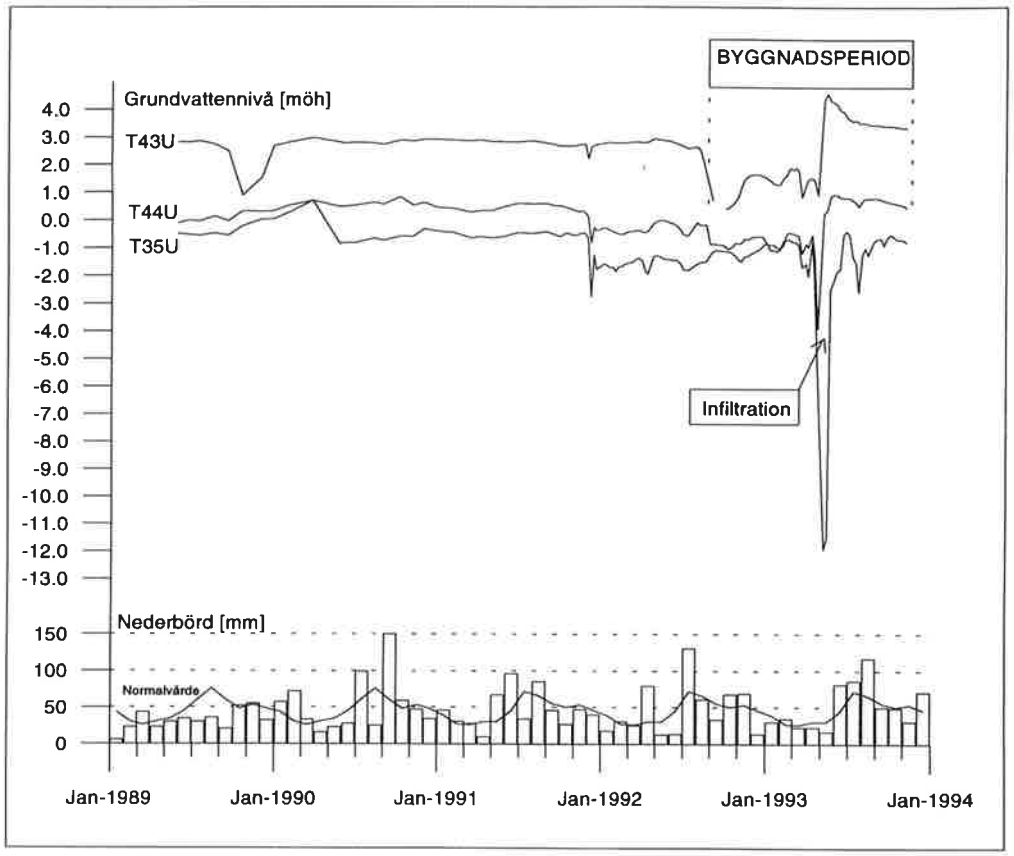
Grundvattenobservationshål 542Ö (figur 1.11) har den snabbast avtagande trenden på nästan 16 cm per år. God korrelation mellan nederbörd och grundvattennivån i hålet tycks föreligga, vilket kan synas märkligt med tanke på lerans ringa permeabilitet. Hålet är beläget strax intill hål 222U (se ovan), dvs ganska långt från biblioteket, och troligt är att den höjning av grundvattennivån som inträffar vid infiltrationstillfället, även i detta hål istället härrör från nederbördsvariationen.



Figur 1.11 Grundvattenvariation i 542Ö, mellan juni 1989 och november 1993, samt nederbördsobservationer från Observatoriekullen

1.2.4 Temporär grundvattensänkning

De tre hålen närmast söder om Kungliga Biblioteket, inne i parkområdet; T35U, T43U, och T44U har uppenbarligen påverkats av undermarksbyggandet i området. Däremot är det svårt att koppla fluktuationer till nederbördsmängder. Variationer i grundvattennivå för hålen mellan juni 1989 och november 1993 visas i figur 1.12.



Figur 1.12 Grundvattenvariation i T35U, T43U och T44U, mellan juni 1989 och november 1993, samt nederbördsobservationer från Observatoriekullen

Samtliga tre hål uppvisar en mindre sänkning av grundvattennivån i slutet av 1991, då tunnelmagasinet Ormen passerade området. Hål T43U återhämtade sig tämligen omgående, medan de övriga två hålen fortfarande vid byggstart för arkiven hösten 1992 inte återfått sin ursprungliga nivå. Återhämtningen av grundvattenytan i hål T35U pågick fortfarande hösten 1992 och påverkades inte av sprängningen av transporttunneln.

Grundvattennivån i hål T43U, beläget närmast påslaget för transporttunneln till arkiven, sjönk med ca 2 m relativt snart efter byggstart under hösten 1992. En tillfällig grundvattensänkning av samma storleksordning förekom hösten 1989. Infiltrationsgränsen på

nivån +1,0 passerades dock inte nämnvärt, och hålet återhämtade sig med ca 1 m under vintern 1992/93.

Även i hål T44U sjönk grundvattenytan efter byggstart, med ca 1 m från nivån ±0,0. Nivån låg därefter närmast konstant på −1,0, vilket även utgör gränsen för infiltration, utom under våren 1993.

Åtgärder - infiltration och injektering

I april månad 1993 skedde en plötslig avsänkning av grundvattennivåerna i hålen T35U, T43U och T44U (se figur 1.12). Bergarbetena under biblioteket omfattade under dessa dagar bland annat borrning av injekteringshål för mellanpall, samt sprängning av den sista kilen och sidostrossarna i bergrum 1.

Speciellt tydlig var den hydrauliska kontakten mellan bergrummen och hålen T35U och T44U, medan avsänkningen i T43U inte var större vid detta tillfälle än vid tidigare.

Infiltrationsinsatser utfördes i två hål (se figur 1.7), varvid grundvattennivåerna i T43U och T44U höjdes omgående. I hål T44U höjdes nivån till den relativt konstanta nivån på ca +0,5 som hålet hade före passagen av Ormen i slutet av 1991. Nivån i T43U ökade tillfälligt till långt över "normalnivå" på ca +3,0.

Mest dramatisk var avsänkningen till ca −12,0 i observationshål T35U, närmast östra gaveln i bergrum 1, vilket tydde på direktkontakt med gallerinivån. Infiltrationen hade ingen effekt på nivån i hålet, men efter avslutad injektering av mellanpallen började återhämtning av grundvattennivån. Eftersom direkt kontakt mellan hålet och bergrum 1 konstaterats sattes hålet under injekteringen under svagt vattentryck, för att inte observationshålet skulle gå förlorat genom igengjutning.

Observationshål T35U beräknas delvis beläget i en krosszon av vittrad, röd granit. Den omvandlade zonen, som hade observerats i östra änden av bergrum 2, är brantstående och stryker ca N-S. Troligt är att zonen även är belägen strax bakom östra gaveln i bergrum 1.

1.3 Injektering

1.3.1 Täthetsskrav och anvisningar

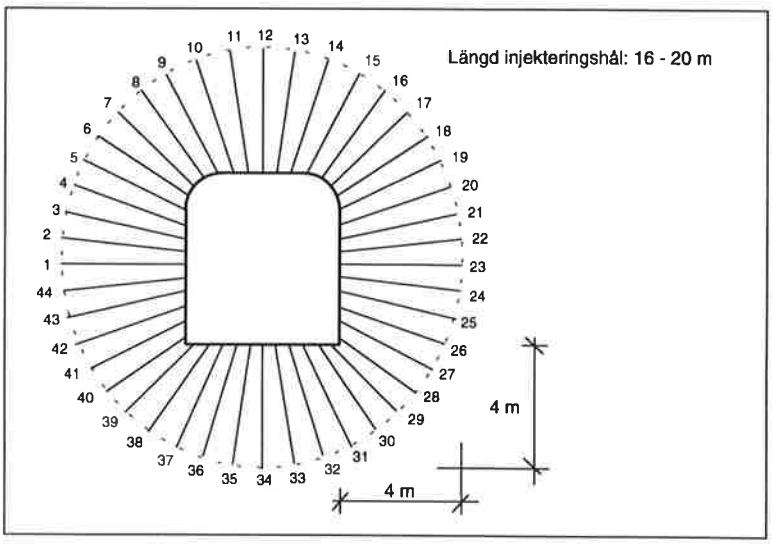
Bygghandlingarna föreskrev att tätskärmen skulle utföras till minst 5 m djup i berget, samt att täthetskravet enligt Stockholms Gatukontors anvisningar täthetsklass 1 skulle uppnås, dvs en maximal mängd inläckande grundvatten på 2 liter per minut och 100 m tunnel.

Förutom dessa krav presenterades ett arbetsförfarande för att uppnå desamma, förfarandet löd;

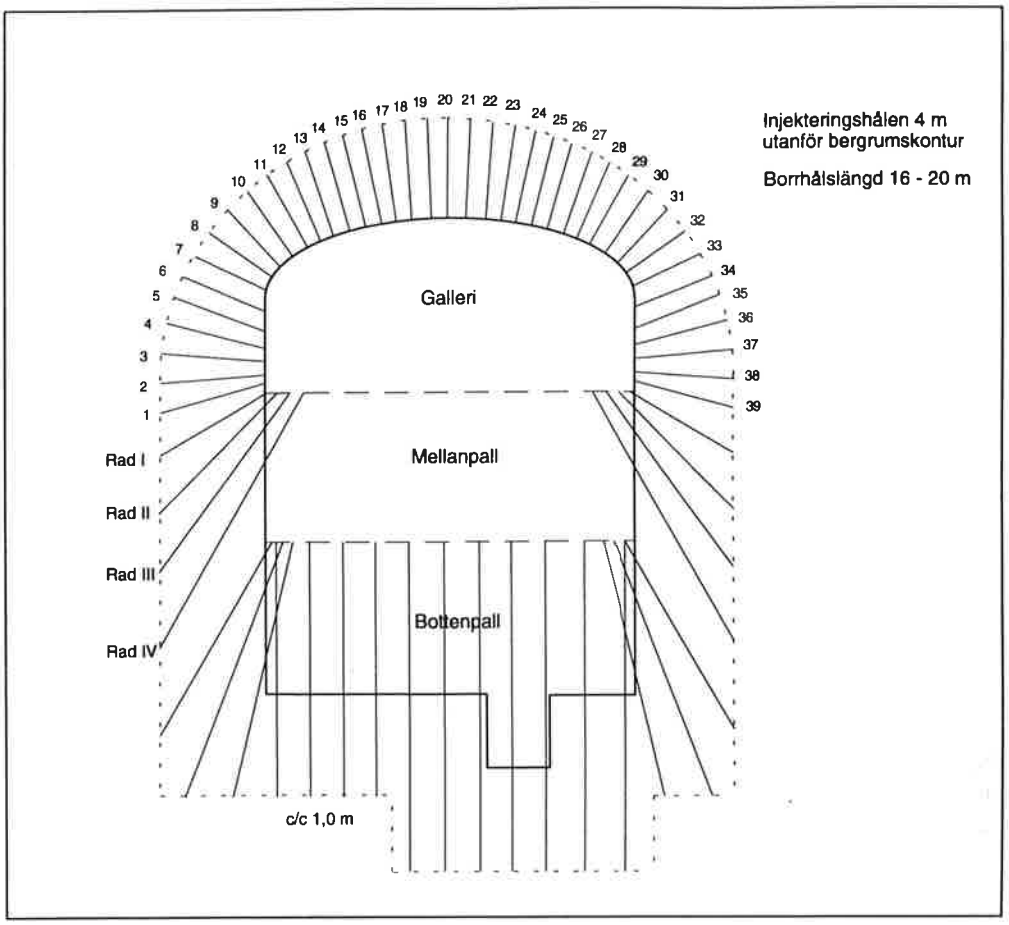
> "Injekteringstrycket vid munstycket (sluttryck) vid cementinjektering skall normalt vara 2,0 MPa. Vid bergtäckning mindre än 10 m varieras trycket mellan 1,0-2,0 MPa. Fortvarighetstillstånd skall upprätthållas minst 2 min med max 10% tryckminskning. Vid injekteringens början används ett tunt bruk med vct = 3,0 som därefter förtjockas successivt. ... Det tunna bruket används i max 30 min, såvida sluttryck inte nåtts därförinnan. Förtjockning utförs fram till 50 min successivt till vct = 1,0, varefter bruk med vct = 0,5 används i 10 min. Kan sluttycket likväl inte nås efter 60 min avbryts injekteringen, och KBS meddelas. Hål skall efter slutförd injektering fyllas med cementbruk med vct = 0,5 i hela sin längd."

Systematisk förinjektering utfördes på traditionellt sätt med en cementsuspension med vattencementtal 3,0 vid start och med en blandning av SH-cement, bentonit och flytmedel. Injekteringshålens inbördes avstånd på 1,0 m resulterade i så många som 44 hål för den 25 m^2 stora transporttunneln.

Den konservativa designfilosofin syftade till att minimera risken att missa någon starkt vattenförande zon, som skulle leda till stort inläckage av grundvatten i anläggningen och problem med efterinjektering. Kritiker har anfört att det stora antalet hål var onödigt i detta "vattentäta" berg. Den geometriska utformningen av injekteringsskärmarna i transporttunneln respektive för bergrummen visas i figurerna 1.13 och 1.14. Totalt antal borrmeter för injekteringssyfte var ca 110 000 m (Manell, 1994).



Figur 1.13 Geometrisk utformning av injekteringsskärmen i transporttunneln



Figur 1.14 Geometrisk utformning av injekteringsskärmen i bergrummen

Galleriet injekterades med hål placerade i solfjäderform, som i transporttunneln, men utan bottenhål. Centrumavståndet mellan hålen i skärmens ytterkant var 1 m och en typisk skärm i bergrummen innehöll därmed 39 hål (se figur 1.14).

Mellanpallen injekterades från gallerinivå snett nedåt längs väggarna och med fyra rader hål (rad I-IV, enligt figur), medan bergrumsbotten injekterades genom hål som borrades från mellanpallsnivå. Injekteringshålen hade genomgående samma inbördes avstånd som i transporttunneln, dvs 1 m i ytterkant skärm. Teoretisk utbredning av injekterad bergvolym var 5 m räknat från bergrumskonturen.

1.3.2 Injekteringsmaterial- och utrustning

Cementsuspensionen som användes för injektering bestod av en blandning av SH-cement (Snabbt Hårdnande Portlandcement) från Cementa, samt som tillsatsmedel

bentonit från Ahsell Mineral och Intraplast-A (injekterings/expandertillsats) från Svenska Sika.

Tabell 1.4 Egenskaper för Cementa SH-cement

Egenskaper	Cementa SH-cement
Cementtyp	Portlandcement
Specifik yta	ca 5000 cm^2/g
Kompaktdensitet	ca 3,15 g/cm^3
Kornstorleksmått d_{95}	ca 58 µm
Hållfasthet efter 1 dygn	ca 15 MPa

Injekteringen inleddes med ett vattencementtal på 3,0, samt med tillsats av 4 vikts-% bentonit och 0,5 vikts-% Intraplast. De hål som inte erhöll mottryck med vct 3,0 injekterades till stopp med vct 1,0.

Injekteringsutrustningen bestod, förutom konventionell kolloidkvarn och omrörare, av tre stycken pumpar av typen 8290 H från Nordisk Cementteknik. Pumpens kapacitet vid fritt flöde är 25 liter/minut och trycket är reglerbart mellan 3-50 bar (enligt NCC). Stoppkriterie (dvs då 20 bars mottryck erhållits) motsvarade, enligt leverantören av pumputrustningen, att tiden mellan två kolvslag översteg 2 minuter.

Under injekteringen registrerades tiden för injektering, samt åtgång cementsuspension, för varje hål. Cementåtgången erhölls med hjälp av ett räkneverk monterat på pumparna, vilket räknade antalet kolvslag. Varje kolvslag motsvarade 0,6 liter suspension.

Chalmers kunde i projektets inledningsskede framställa önskemål om injekteringsprotokollets utformning. Protokollet kompletterades med uppgift om brukets temperatur, samt åtgång cementsuspension för fyllning av borrhålet. Ett exempel på ett injekteringsprotokoll visas i bilaga 4.

1.3.3 Sammanställning av förinjektering

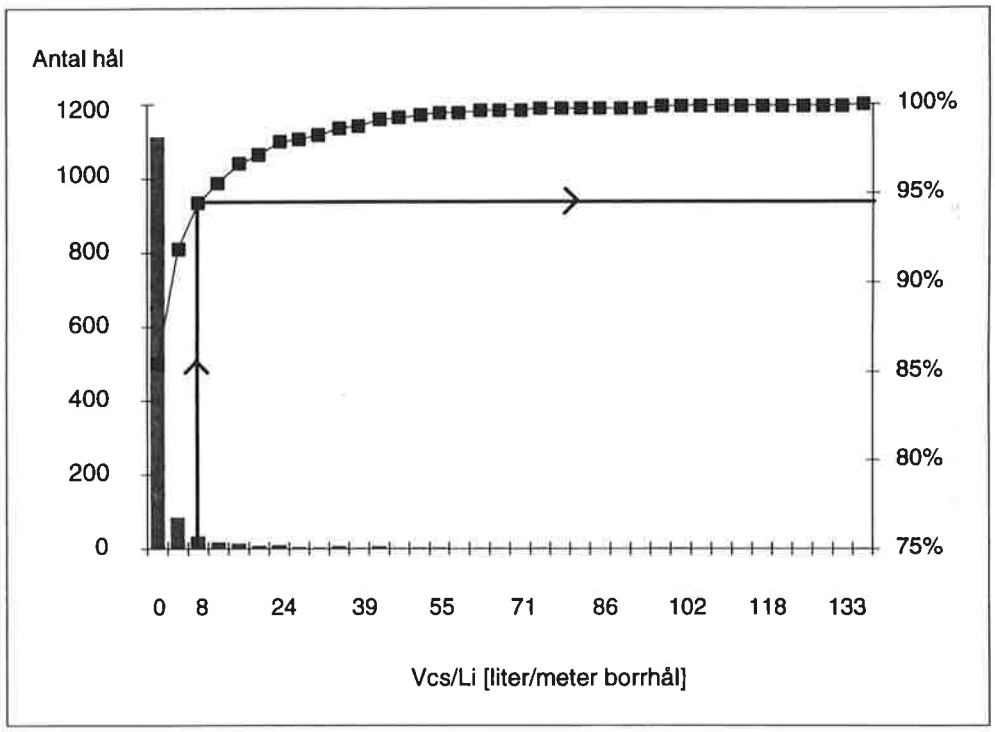
Statistisk bearbetning

Materialåtgången presenteras i det följande med enheterna liter respektive kg per meter injekterat borrhål, istället för t ex kg per meter tunnel som är en vanlig enhet i uppföljningssammanhang. Anledningen var att byggobjektet med dess kurvor, tvärande

tunnlar etc, krävde ojämn överlappning av injekteringsskärmarna, vilket skulle ge en bitvis mycket ojämn åtgång injekteringsmaterial. En del av åtgången skulle tillskrivas det större antalet hål.

Anledningen till att även liter per meter borrhål presenteras är den generellt ringa åtgången. Ett 51 mm borrhål bör svälja minst 2 liter suspension per meter, men relativt ofta var så inte fallet. Detta kan antingen bero på att hålet fyllts från ett annat hål, eller att en mängd luft eller vatten funnits kvar i hålet vid injekteringens början.

Statistisk bearbetning av redovisad åtgång av injekteringsmaterial tydde på en fördelning nära lognormalfördelning. I histogrammet över åtgång cementsuspension i transporttunneln (figur 1.15) observeras direkt att mycket få hål krävde väldigt mycket injekteringsmaterial innan mottryck erhölls. Pilarna i figuren visar att av transporttunnelns 1304 injekteringshål, endast drygt 65 st (ca 5%) tog emot mer än ca 8 liter cementsuspension per meter injekteringshål.

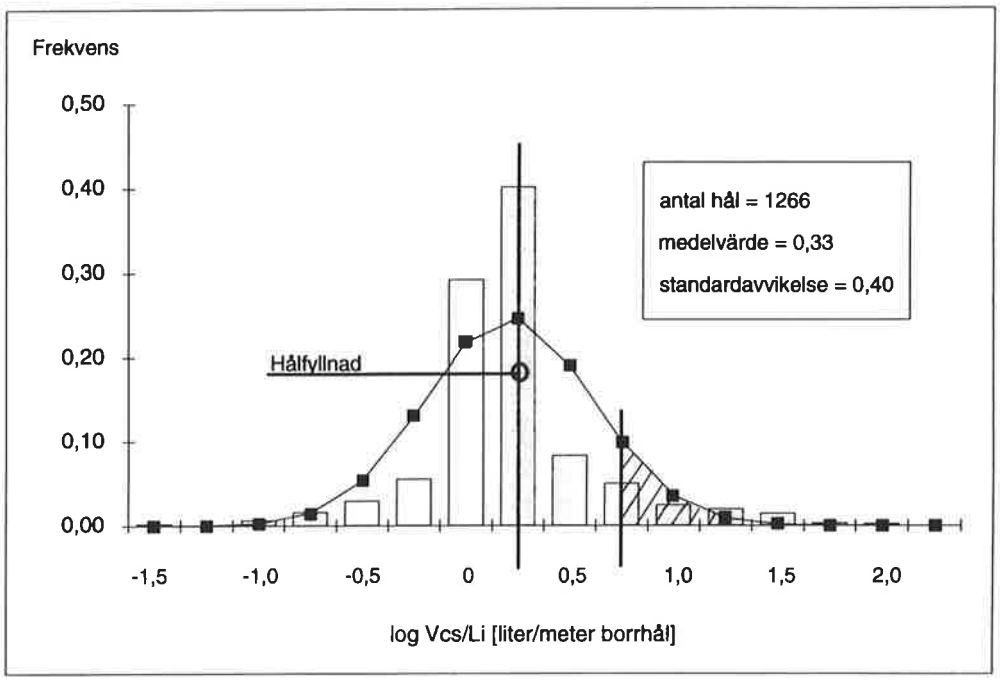


Figur 1.15 Histogram över åtgång cementsuspension per meter injekteringshål i transporttunneln

Med användning av logaritmerade värden på materialåtgången erhölls en svag överensstämmelse med en normalfördelningskurva (fig 1.16). Ur den kan t ex utläsas att ungefär halva fördelningen ligger under log Vcs/Li = 0.25, dvs när volymen cementsuspension per borrmeter injekteringshål är ca 2 liter, vilket motsvarar hålfyllnaden. Observera att i figuren angivet medelvärde respektive standardavvikelse gäller för de logaritmerade

värdena. Anledningen till att antalet hål är minskat med 38 st är att "nollhål", dvs de hål som inte tagit emot något injekteringsmaterial, tagits bort.

Den i mitt tycke mer intressanta "svansen" till höger innehåller de få hål som, med eller utan samband med andra hål, tagit emot mycket material (se även avsnitt 2.1.3). Vissa av dessa tog emot mycket stora mängder injekteringsmedel, ett förhållande som borde kunna styras på ett mer effektivt sätt.



Figur 1.16 Frekvensdiagram över cementsuspension per meter injekteringshål i transporttunneln

I bilaga 5 presenteras samtliga frekvensdiagram för de olika byggnadsdelarna; transporttunneln, bergrum 1 och 2. För bergrummen har presentationen delats upp i en del för galleriet och en del för mellanpallen. Botteninjekteringen presenteras i nästa stycke.

En sammanställning av åtgången injekteringsmaterial (för icke logaritmerade värden) visas i tabell 1.5 (suspension/meter) och tabell 1.6 (kg cement/meter) nedan. Kolumnen som markerats med "Antal nollor" motsvarar de hål som inte tagit emot något injekteringsmaterial och inte medtagits i den statistiska bearbetningen av de logaritmerade värdena (se bilaga 5).

Tabell 1.5 Sammanställning av åtgång cementsuspension per borrhålsmeter [l/m]

Byggnadsdel	Antal hål	Antal nollor	Medel-värde	Median	Standard-avvikelse	Min – max
Transporttunnel	1304	38	3,8	1,9	8,8	0 – 141
Bergrum 1 galleri	979	79	3,5	2,1	6,2	0 – 77
Bergrum 1 mellanpall	904	94	4,7	2,2	17,7	0 – 301
Bergrum 2 galleri	990	53	3,0	2,1	4,3	0 – 63
Bergrum 2 mellanpall	912	71	3,0	2,0	5,8	0 – 121

Tabell 1.6 Sammanställning av åtgång cement per borrhålsmeter [kg/m]

Byggnadsdel	Antal hål	Antal nollor	Medel-värde	Median	Standard-avvikelse	Min – max
Transporttunnel	1304	38	1,6	0,6	4,9	0 – 109
Bergrum 1 galleri	979	79	1,4	0,6	3,5	0 – 53
Bergrum 1 mellanpall	904	94	2,1	0,7	12,2	0 – 248
Bergrum 2 galleri	990	53	1,0	0,6	2,1	0 – 32
Bergrum 2 mellanpall	912	71	2,9	1,9	6,9	0 – 146

Sammanställningarna visar att medelvärdet för åtgång av cementsuspension respektive kilogram cement per borrhålsmeter, för de olika byggnadsdelarna, är större än medianen. Detta betyder att en stor andel av hålen har en mycket liten åtgång, men medelvärdet dras upp av ett litet antal hål med extremt stor åtgång. De höga värdena på standardavvikelse respektive maximum markerar ytterligare skevheten hos fördelningen av icke logaritmerade värden (jämför figur 1.15).

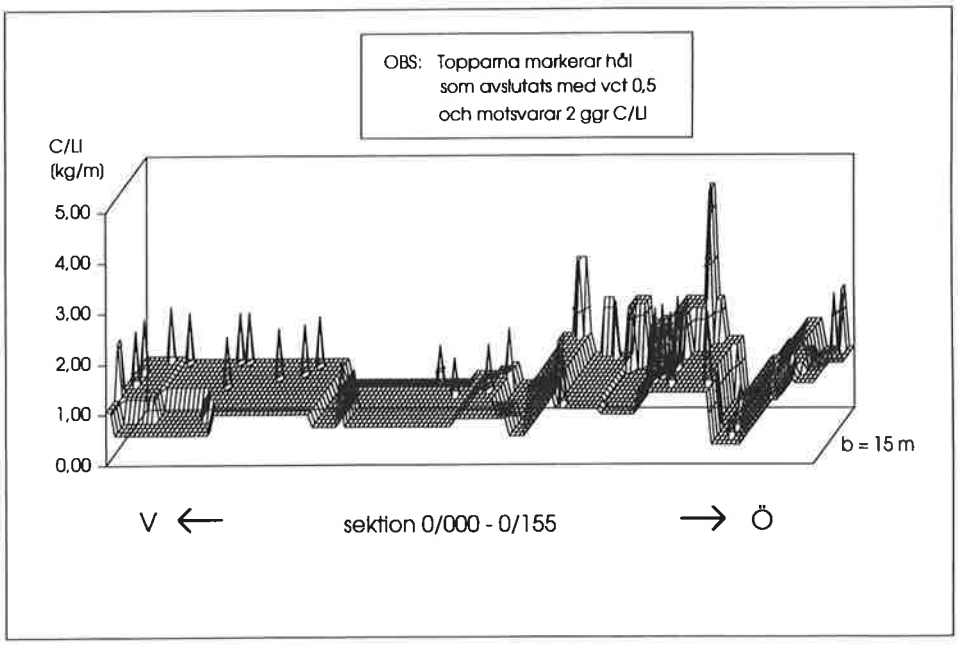
Sammanfattningsvis konstateras att kvoten mellan åtgång cement och åtgång cementsuspension, för samtliga byggnadsdelar med ett undantag, låg på ca 1:2,5, dvs 1 kg cement motsvarade ca 2,5 liter suspension (motsvarande ett vct = 2 i medeltal). Undantaget utgörs av mellanpallen i bergrum 2, där motsvarande kvot mellan cement och cementsuspension är ca 1:1. Anledningen till detta var att injekteringen där till stor del utfördes med det låga vattencementtal, här med vct = 0,5 – 1,0, som Stråbrukens nya mikrocement blandas med.

Botteninjektering

Redovisningen av botteninjekteringen var av praktiska skäl inte lika detaljerad som den övriga förinjekteringen. Materialåtgången redovisades som en totalsumma i kg cement för dels injektering, dels hålfyllnad, för ett på ritning markerat område. De hål där injekteringen avslutats med vattencementtal 0,5 markerades särskilt.

Eftersom redovisningen var odetaljerad blir sammanställningen av botteninjekteringen av generell karaktär där enbart tendenser i materialåtgång kan skönjas. Som indata i sammanställningen användes injekterad mängd cement och total borrlängd för varje delområde, vilket gav ett medelvärde av åtgång cement per borrhålsmeter. Hålen som avslutats med vct 0,5 markeras i figurerna genom att medelvärdet dubbleras.

Sammanställningen för bergrum 2 presenteras grafiskt i figur 1.17; tabeller med indata samt figurer för båda bergrummen finns i bilaga 6. För bergrum 1 var medelvärdet för åtgången cement per meter borrhål maximalt 2,73 kg/m mellan sektion 0/145 - 0/155, för bergrum 2 var maxvärdet 2,22 kg/m mellan 0/118-0/127.



Figur 1.17 Åtgång injekteringsmaterial för botteninjektering i bergrum 2 (kg cement per meter borrhål)

1.3.4 Efterinjektering

Om efterinjektering uttrycker handlingarna följande;

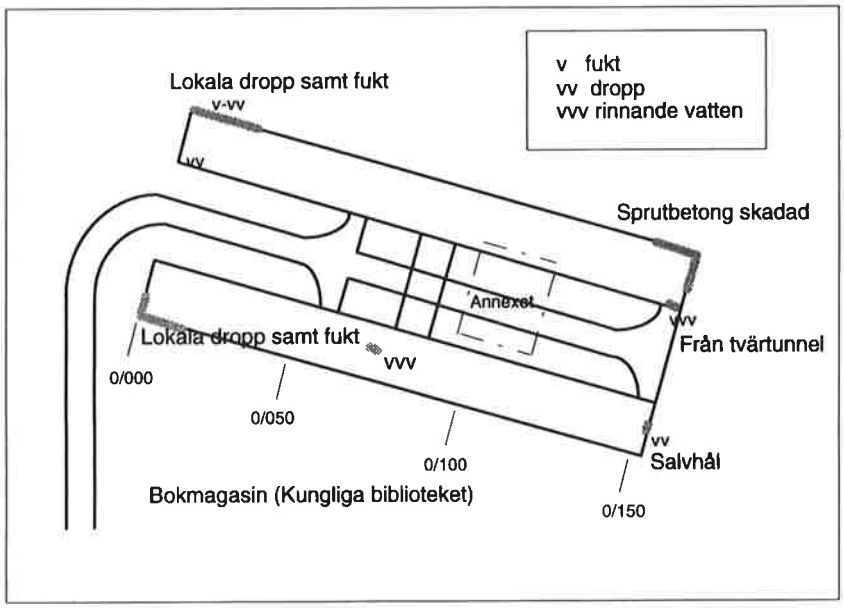
> "Efterinjektering beordrad av KBS skall utföras omgående med cementbruk efter det att läcka(or) observeras." (C5.3)
> "Efterinjektering utförs där läckage observeras." (C5.33)
> "Sluttrycket skall normalt vara 0,5 MPa. Vid behov görs anpassning till lokala förhållanden." (C5.331)

Efterinjektering har utförts i tre olika faser i bergschakten; under utsprängningsskedet, före respektive efter NCCs avetablering i november 1993. Den systematiska förinjekteringen gjorde att relativt lite efterinjekteringsinsatser krävdes.

Den mest omfattande efterinjekteringen under utsprängningsskedet utfördes i mars 1993 mellan sektion 0/045 - 0/055 i bergrum 1. Cementsuspension med vanlig SH-cement (start-vct = 3,0), och tillsats av bentonit och Intraplast användes. Av de totalt 11 hål med längd 4,5 m som borrades, tog endast ett hål emot mycket suspension (18 liter per borrhålsmeter). I övriga hål var åtgången i genomsnitt 3 liter per meter.

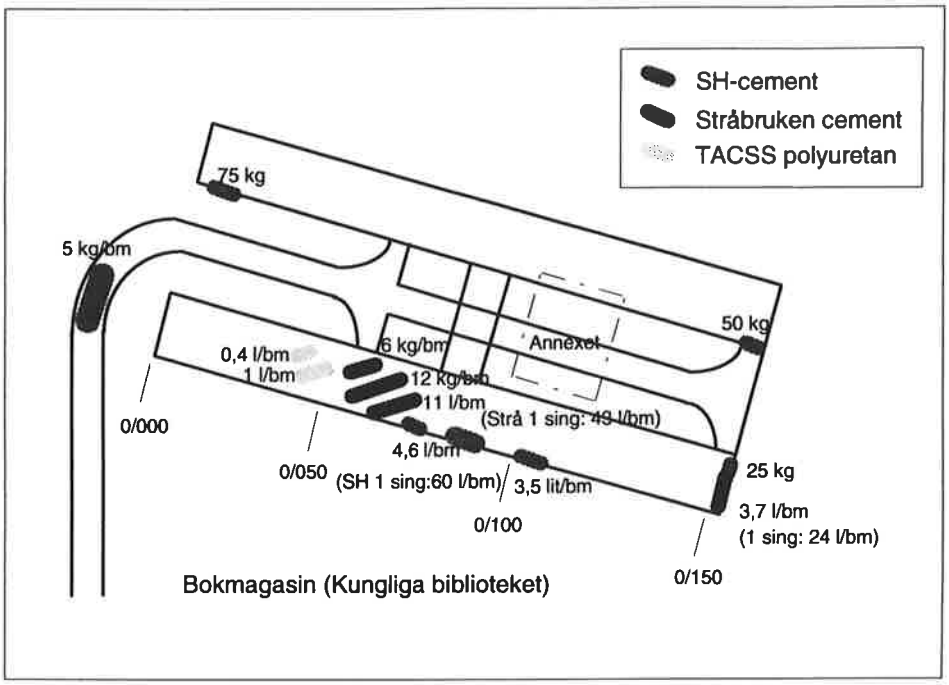
Före avetablering

Före NCCs avetablering i november 1993 utfördes en mer intensiv efterinjekteringsinsats. Under synförrättningar hade fukt och droppande vatten observerats på ställen enligt figur nedan.



Figur 1.18 Brister och fel avseende injekteringsarbeten som skall åtgärdas av entreprenören. (enligt Synförrättning nr 5. 28 okt 1993)

I figur 1.19 visas en översikt över de efterinjekteringsinsatser som utfördes i fas två, dvs före avetablering, av NCC. Tre olika injekteringsmaterial användes; vanlig SH-cement, Stråbrukens mikrocement samt polyuretanen TACSS/FLEX.



Figur 1.19 Injekteringsarbeten utförda före avetablering hösten 1993

I figuren är de områden i anläggningen som injekterades med respektive material, samt ungefärligt i vilka mängder, schematiskt markerat. Injekteringsmängder för efterinjekteringen redovisades vanligen i total mängd, i liter eller kg, per injekterat område. Längd på borrhålen var mellan 3 - 5 m. Längden injekterat borrhål har inte kompenserats för manschettens placering i borrhålet, därav benämningen 'bm' istället för 'L_i'.

Totalt 19 hål, varav 3 st läckande bulthål, injekterades med SH-cement i södra väggen av bergrum 1, under september månad. Ett av hålen tog emot så mycket som 60 liter suspension per borrhålsmeter, men i medeltal var åtgången endast 3,5 l/bm respektive 4,6 l/bm, för två olika områden. Övrig injektering med SH-cement utfördes i slutet av oktober och gällde lokala läckage ur salv- respektive bulthål, samt ett område i kurvan i transporttunneln. Totalt 20 hål i kurvan injekterades med i genomsnitt 5 kg/bm.

Stråbrukens mikrocement med vattencementtal 0,5 eller 1,0, användes en period i slutet av september - början av oktober. I östra gaveln i bergrum 1 injekterades 19 hål, varav ett läckande bulthål. Ett av hålen tog emot 24 liter per borrhålsmeter, men övriga endast ca 3,7 l/bm.

Ett besvärande läckage var en punktläcka i taket i bergrum 1 vid sektion 0/070 ungefär. Stråbrukens mikrocement injekterades vid tre tillfällen. Vid första försöket borrades 11 st 2,4 m långa hål i taket. Ett av hålen tog emot så mycket som ca 80 kg cement (drygt 30 kg per meter), medan de övriga i genomsnitt tog ca 8 kg/bm, dvs ca 11 liter per meter (vct 0,5).

Efter första tätningsförsöket tycks läckaget ha flyttats närmare bergrummets centrumlinje. Ytterligare 13 respektive 11 st 3 m långa borrhål injekterades, där cementåtgången blev ca 12 kg/bm respektive 6 kg/bm.

Vattnet fann dock nya vägar och läckaget kvarstod. Polyuretanen TACSS användes i två omgångar. Först borrades 15 hål (längd 4 m), i vilka totalt 25 kg TACSS injekterades, fördelat på antalet hål ca 1,7 kg (kg ~ liter) per hål. Med den håldimension som användes (~ 30 mm) inses att åtgången motsvarade föga mer än hålfyllnaden. Därefter borrades ytterligare 8 hål, i vilka ungefär den dubbla mängden gick åt.

Ovanstående visar på några av de svårigheter som måste överkommas för att åstadkomma en lyckad efterinjektering. Största svårigheten är naturligvis att hitta den vattenförande sprickan bakom sprängskadezonen. Alltför vanligt är att hålen borras för korta för att nå utanför skadezonen, varvid vattnet har stora möjligheter att med tiden hitta nya läckagevägar.

Likaså minskar naturligtvis möjligheten att hitta vattenförande sprickor när berget hunnit täckas in med sprutbetong. Storleken på fuktgenomslag behöver inte heller motsvara verklig fuktutbredning.

Efter avetablering

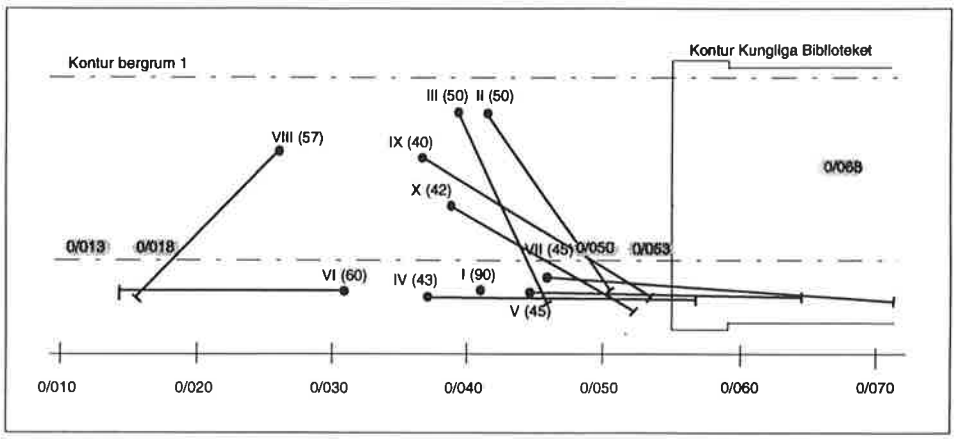
I november 1993, när bergarbetena var avslutade och NCCs avetablering påbörjats, utfördes en mer omfattande efterinjektering, eftersom viss oacceptabel inläckning av grundvatten kvarstod trots entreprenörens insatser avseende efterinjektering beskrivna ovan.

Inläckaget omfattade framförallt ett närmast horisontellt stråk vid anfanget mellan sektion 0/000 - 0/055 i södra väggen, samt punktläckaget i takmitt (ca sektion 0/068), i bergrum 1. Läckaget i takanfang hade uppstått först vid utsprängning av bottenpallen. Ett flackt liggande skikt med uppkrossat och vattenförande berg hade påträffats strax ovanför bergrummets tak. I en rapport från GECON AB (Lindblom, 1993) förs en teori fram om att pallsprängningen orsakat deformationer i väggen, varvid injekterade sprickor öppnats på nytt och börjat läcka vatten.

Den tekniska uppläggningen av arbetet planerades gemensamt av GECON och NCC, borrnings- och injekteringsarbetet pågick mellan 17-23 november 1993 och utfördes av entrepenören NCC i samarbete med Hercules.

Injektering från markytan

Avsikten med denna injekteringsmetod var att söka tvära de vattenförande flacka sprickorna med vertikala alternativt riktade borrhål. Hålen borrades från markytan, genom jordlagren med s k ODEX-borrning, varefter foderrör slogs fast någon meter i berg. Hammarborrning med diameter 64 mm avslutade borrningen av de totalt tio hålen. Figur 1.20 nedan visar hålens placering i plan; hålen är numrerade med romerska siffror i den ordning de borrades och numret inom parentes är vinkeln från horisontalen. I figuren är även markerat de områden i den flacka zonen vid takanfang (sektion 0/013, 0/018, 0/050 och 0/053), samt i takmitt (sektion 0/068) där läckage i form av rinnande vatten förekom.



Figur 1.20 Läge av injekteringshål för efterinjektering från markytan

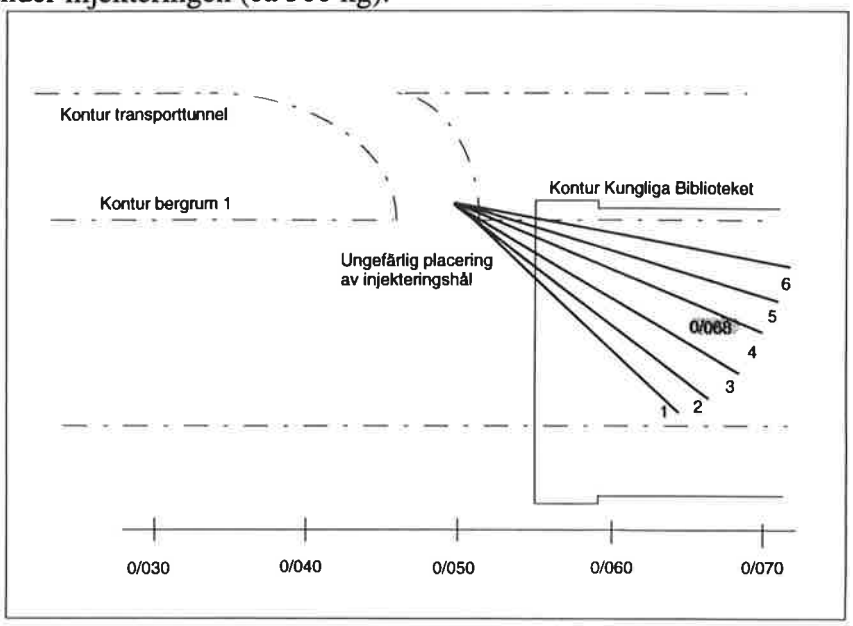
Injekteringen inleddes med vattenförlustmätning, varefter cementsuspension av Strå-brukens mikrocement alternativt SH-cement pumpades under tryck ned i bergborrhålet. Cementbrukets konsistens och injekteringstryck kunde varieras löpande, sluttryck var 2,0 MPa.

Under injekteringen kontrollerades effekten av injekteringen genom okulär bedömning av vatteninläckning inne i bergrum 1. Likaså hölls grundvattenytorna i närliggande observationshål (T35U och T47U) under uppsikt.

Injekteringsinsatserna från markytan redovisas i en rapport från GECON (Lindblom, 1993), med data för varje enskilt borrhål. Tre huvudsakliga lägen för läckande zoner konstaterades genom vattenförlustmätning; på nivåerna ca –8 m, –5 m samt –1 m. Injekteringsmanschetterna placerades vanligen på nivå ca –5 m . Sammanfattningsvis mottog de tio injekteringshålen som minst 125 kg Strå-cement och som mest 1700 kg SH-cement. Vanligtvis låg åtgången kring 1000 kg cement per hål.

Injektering från transporttunneln

För att söka nå läckaget i takmitt i sektion 0/068 borrades 6 hål i solfjäderform, från den ytligast belägna tvärtunneln i transporttunneln. Hålen hade diametern 51 mm, var riktade ca 20° uppåt och var 25-27 m långa. Figur 1.21 nedan visar placeringen i plan av dessa hål. Endast ett hål (nr 6) mottog vatten under vattenförlustmätningen, respektive cement under injekteringen (ca 500 kg).



Figur 1.21 Läge av injekteringshål för efterinjektering från transporttunneln

Resultat av efterinjektering

Efterinjekteringen kan delas i i tre delar; injektering av hål I-III, hål IV-V samt hål VI-X och solfjädern. Injektering av de tre första hålen, som injekterades med Strå mikrocement med vattencementtal mellan 0,5 och 1,0, förbättrade situationen såtillvida att läckaget minskade mellan sektion 0/018 - 0/050. I sektion 0/018, 0/050 och 0/068 kvarstod läckaget i form av rinnande vatten.

Hål IV-V (figur 1.21) injekterades därefter med motsvarande cementsuspension, varvid ytterligare förbättring av tätheten erhölls. Rinnande vatten förekom endast i sektion 0/018 och läckaget i takmitt i sektion 0/068 hade reducerats till lätt dropp. Måttligt dropp förekom även mellan sektion 0/044 - 0/062.

Målsättningen med de återstående hålen från markytan (hål VI-X), samt solfjäderhålen från transporttunneln (figur 1.21), var att söka borra rakt på de kvarstående läckagen enligt ovan. Hålen injekterades dels med Stråbrukens mikrocement, dels med SH-cement. Efter injektering av dessa fem hål kunde en avsevärd reducering av inläckningen i bergrum 1 konstateras. En lokal spricka i sektion 0/018 förde dock

fortfarande vatten, och droppet i takmitt vid sektion 0/068 fanns kvar men hade minskat betydligt.

En viss ökning av läckaget i västra gaveln i bergrum 1 kunde dock konstateras. En möjlig förklaring till detta gavs i rapporten från GECON (Lindblom, 1993); nämligen att grundvattenytan stigit pga utförda injekteringsarbeten varvid inläckning i ofullständigt injekterade bergpartier i västra gaveln ökat.

Avslutningsvis bör nämnas att ytterligare efterinjektering av lokala inläckage inte kan uteslutas trots redan utförda insatser beskrivna ovan. Beställarens starka krav avseende inrinning i bergrum, samt ett bra klimat i bokmagasinen, gör vidare att efterinjekterings-insatser prioriteras i innevarande byggnadsskede.

2. INJEKTERINGSFÖRSÖK

2.1 Inledning

Testerna ägde rum i fyra injekteringsskärmar i nedre delen av transporttunneln, i skärmarna 20-21 samt 23-24, på mellan 23-28 m djup under markytan. De två senare skärmarna låg delvis inne i en mer permeabel zon med kraftigt uppsprucken röd granit, medan de första två skärmarna låg i berg av det tätare slaget.

2.1.1 Frågeställningar

Uppföljningen av injekteringsarbetena i transporttunneln, som presenterats i kapitel 1, visade att topparna i materialåtgång var relativt få. Mottryck erhölls vanligtvis redan med vattencementtal 3,0 och ett fåtal liter suspension. Den geologiska karteringen dittills visade på generellt bra bergkvalitet med få sprickor.

Även i en relativt tät bergmassa finns sprickor som behöver tätas och det är idag regel att dessa tätas på bästa sätt, speciellt vid drivning av tunnlar under en stadskärna.

Mot bakgrund av ovanstående väcktes under planeringen av forskningsskärmarna ett antal frågeställningar:

- Är sprickorna i allmänhet sådana att föreskrivet injekteringsmaterial, dvs SH-cement, har en maximal kornstorlek som är avpassad för att tränga in i och täta sprickorna i berget?
- Är föreskrivet antal injekteringshål för 25 m^2-tunneln lämpligt (dvs 44 st med det inbördes avståndet 1 m i skärmens utkant)?
- Medför injektering med vattencementtal 3,0 i starten oönskad sedimenterings- eller filtreringseffekt?

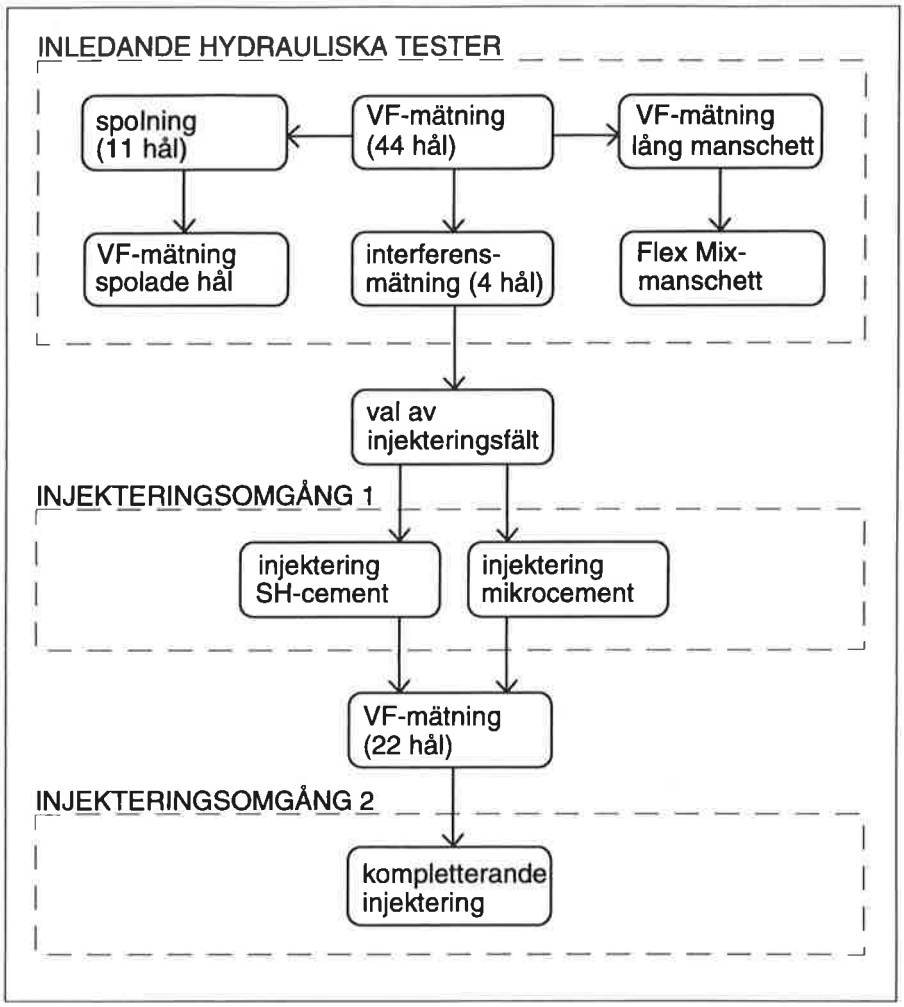
En av de viktigaste frågorna inför injekteringstesten gällde huruvida kornstorleken på föreskrivet cement var avpassat att kunna tränga in i och täta sprickorna i berget. Denna del av undersökningen syftade främst till att utröna om användande av s k mikrocement skulle optimera injekteringsresultatet i detta projekt.

En annan intressant fråga var om antalet hål var befogat. Den konservativa design-filosofin, baserad på ett stokastiskt synsätt, syftade till att minimera risken att missa någon starkt vattenförande zon, som skulle leda till stort inläckage av grundvatten i anläggningen och problem med efterinjektering.

Slutligen skulle vattencementtalets inverkan på suspensionens stabilitet avseende sedimentering- och filtrering studeras.

2.1.2 Arbetsgång

Arbetsgången för injekteringstesterna i skärmarna 20-21 samt 23-24, beskrivs schematiskt i figur 2.1 nedan.



Figur 2.1 Arbetsgång för injekteringstesterna

Ovanstående figur tjänar endast som en översikt, de olika ingående delarna i arbetsgången beskrivs närmare i det följande.

I programmet för planerade forskningsinsatser sammanfattades målsättningen med injekteringstesterna med tre frågor, nämligen;

- Har effektiv, riktad spolning av injekteringshålen före injektering en avgörande betydelse för inträngningsförmågan hos cementsorter med olika finmaldhetsgrad?
- Vad innebär injektering med Flex Mix-manschett? Framtida användningsområden?
- Vilket är det optimala injekteringsförfarandet i detta bergbyggnadsprojekt?

De två första punkterna kan sägas utgöra fristående undersökningar (se även fig. 2.1), medan det övergripande målet med undersökningen sammanfattas i den sista punkten. Svaret på sista frågan var betydelsefullt inte bara specifikt för detta projekt, utan kanske framförallt inför andra projekt med höga täthetskrav.

2.1.3 Singulära hål

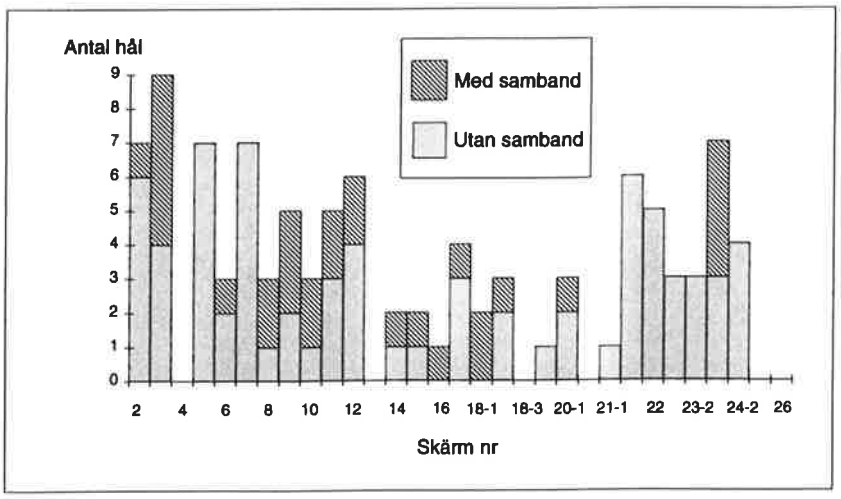
Den intressanta "svansen" till höger i frekvensdiagrammet i figur 1.16 i avsnitt 1.3.3, innehåller de få hål som, med eller utan samband med andra hål, tagit emot mycket material. Med *singulära hål* menas hål i en för övrigt relativt tät skärm, i vilka mycket injekteringsmaterial gick in. Vissa av dessa tog emot mycket stora mängder injekteringsmedel, vilket som sagt borde kunna styras på ett mer effektivt sätt.

Ett sätt att styra utbredningen av cementsuspension, är att använda en Flex Mix-manschett och att injektera med polyuretan vid behov. Denna nya typ av injektering användes i ett fåtal hål, vilket beskrivs i avsnitt 2.3.1.

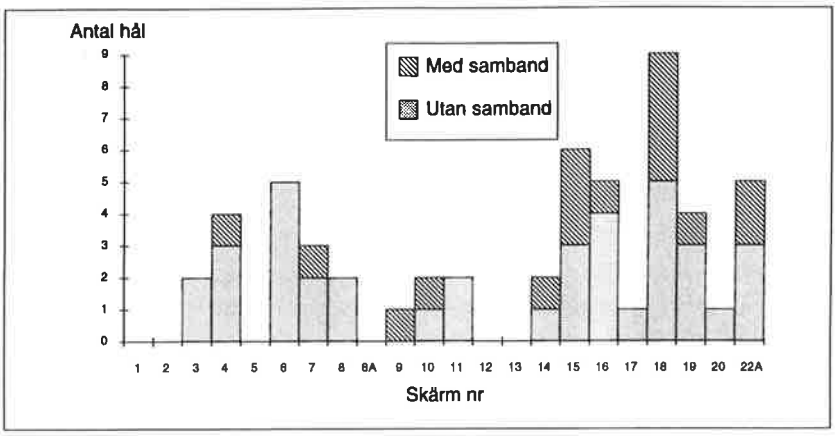
Eftersom en orsak till den täta hålplaceringen var att risken att missa vattenförande zoner skulle minimeras, togs antalet s k singulära hål fram, med relativt stor åtgång suspension, med respektive utan konstaterat samband till omkringliggande hål.

Förekomsten av s k singulära hål, definierat som hål med en åtgång av cementsuspension större än 100 liter (ca 6 lit/Li), presenteras i figurerna på följande sida. Med tanke på s k split spacing, dvs förtätning av hålen efter en första injekteringsomgång, är antalet singulära hål *utan* konstaterat samband till andra hål naturligtvis av störst intresse; dessa var i medeltal i transporttunneln 2 - 3 st, i bergrum 1 nära 2 st och i bergrum 2 bara 1 st per skärm.

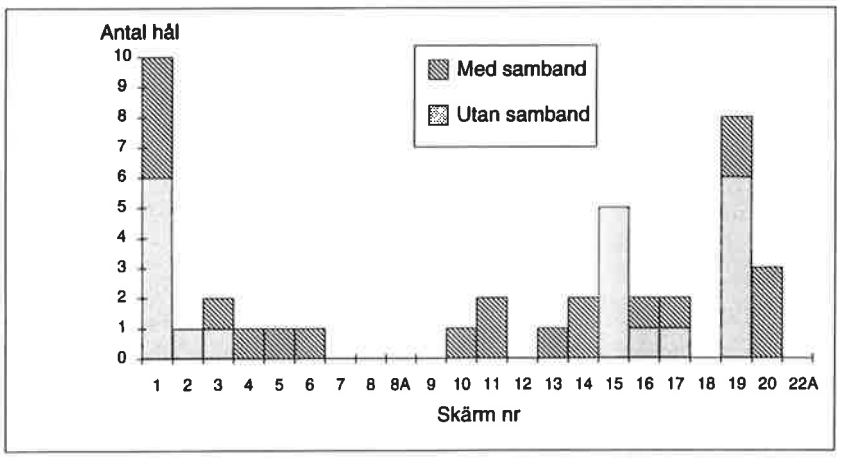
Huruvida antalet singulära hål motiverar det stora antalet injekteringshål som använts totalt sett, är en bedömningsfråga av komplex art. I bedömningen kommer även drivningstekniska frågor, som att en jämn arbetscykel underlättar arbetet, samt ekonomiska/juridiska frågor, förutom rent injekteringstekniska. I föreliggande undersökning studerades frågan ur injekteringstekniskt perspektiv och inga kopplingar gjordes till ekonomi eller dylikt.



Figur 2.2 Singulära hål i transporttunneln



Figur 2.3 Singulära hål i bergrum 1 galleri



Figur 2.4 Singulära hål i bergrum 2 galleri

2.2 Inledande hydrauliska tester

Med tanke på att varje skärm i transporttunneln bestod av 44 st hål och en vattenförlustmätning med enkelmanschett i tid kunde bedömas ta ca 15–30 min, insågs att en fullständig vattenförlustmätning före respektive efter spolning med ett riktat munstycke (uppskattad tidsåtgång ca 15 min/hål), samt efter utförd injektering som kontroll, skulle ta mycket tid i anspråk.

En tidplan upprättades för arbetena i testserien, där de inledande hydrauliska testerna beräknades kräva totalt en vecka och injekteringen cirka en vecka. Tidplanen kunde hållas i de fall externa störningar inte inverkade på arbetet. Arbetet vid de två sista skärmarna forcerades och tiden kortades med hjälp av helgarbete.

2.2.1 Pumputrustning

Inför de hydrauliska testerna togs en pumputrustning fram. Målet var att bygga en hanterlig, mobil utrustning för vattenförlustmätning med reglerbart tryck 0–10 bar, samt med flödesmätare. Bilden nedan visar pumpen nere i tunneln, bredvid syns även den skylift som användes för att nå till manschetterna.

Figur 2.5 Pumputrustning samt skylift i transporttunneln

Pumpen var en Grundfos centrifugalpump CR2. Vattentrycket reglerades med hjälp av dels en shunt med nålventil förbi pumpen, dels en tryckreduceringsventil. Större flöden mättes med en vanlig vinghjulsmätare, mindre flöden mättes med en serie flödesmätare

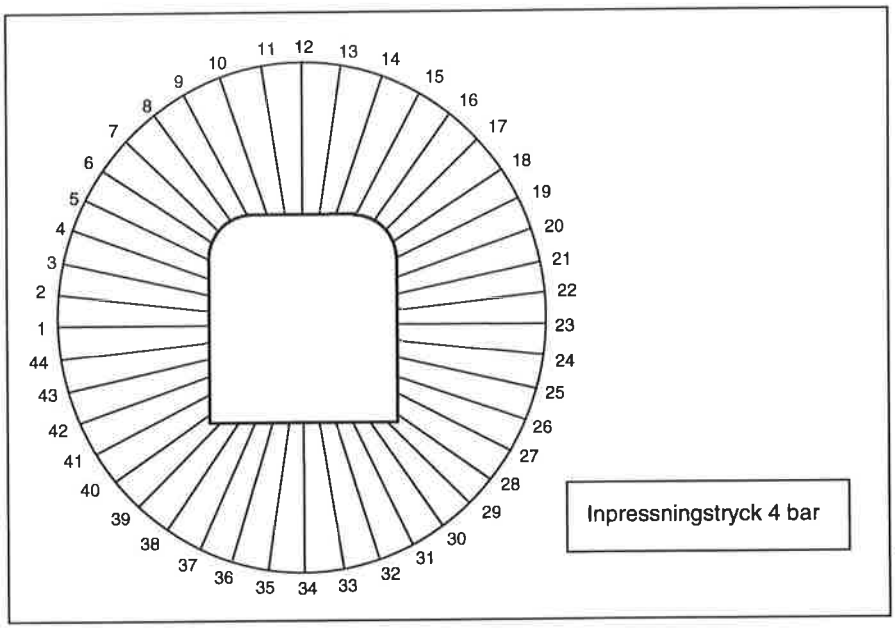
av svävkroppstyp. Utrustningen var försedd med en manometer vid inloppet, en vid tryckreduceraren, samt en vid utloppet.

2.2.2 Testmetoder

Vattenförlustmätning med enkelmanschett

Inledningsvis utfördes för varje skärm om 44 hål en vattenförlustmätning med enkelmanschett av samtliga hål (se figur 2.6). Mätningarna utfördes med ett inpressningstryck på 4 bar, dvs ungefär dubbla grundvattentrycket. Mättiden varierade mellan 10–40 minuter, beroende framförallt på om hålet varit vattenfyllt vid mätningens början eller inte.

Syftet med den inledande vattenförlustmätningen, var att erhålla en uppfattning om den hydrauliska bilden för skärmen, samt att identifiera hål med stora förluster.



Figur 2.6 Geometrisk utformning av injekteringsskärmen i testskärmarna

Spolning av hål

Efter grundmätningen utfördes högtrycksspolning med specialmunstycke av vart fjärde hål, samt vattenförlustmätning igen av de spolade hålen. Tiden det tog att spola hålen, inklusive demontering respektive montering av manschetter, var ca 30 minuter.

Högtryckssspolningen utfördes med en roterande dysa med bakåtriktade respektive radiella strålar, för effektiv rensning av borrkax alternativt lera ur sprickköppningar. Vattenförlustmätningen efter spolningen gav en uppfattning om värdet av densamma.

Figur 2.7 Spolning av bottenhål, bredvid en Flex Mix-manschett

I det här fallet hade dock inte spolningen någon avgörande betydelse. Som mest ökade transmissiviteten i 45% av de spolade hålen (i skärm 21), men för många hål var den mer eller mindre oförändrad. Kort sagt – ökningen av transmissiviteten motiverade i det här fallet inte det extra arbetet med spolningen.

I bilaga 8 finns diagram över transmissiviteterna för skärmarna nr 20, 21, 23 och 24. $T_m1.1$ utgör transmissiviteten utvärderad enligt Moyé (Carlsson och Olsson, 1986) från grundmätningen, $T_m1.2$ motsvarande efter spolning.

Vattenförlustmätning med lång enkelmanschett

De hål som i grundmätningen haft stora vattenförluster mättes med en lång enkelmanschett i etapper om 3 m för att fastställa djupet för de stora förlusterna, dvs för identifiering av krosszoner eller slag. I några av hålen placerades sedan inför injekteringen en sk Flex Mix-manschett, med innerröret placerat vid förmodad sprickzon eller slag. Vid behov kunde då injekteringsförloppet styras med polyuretan.

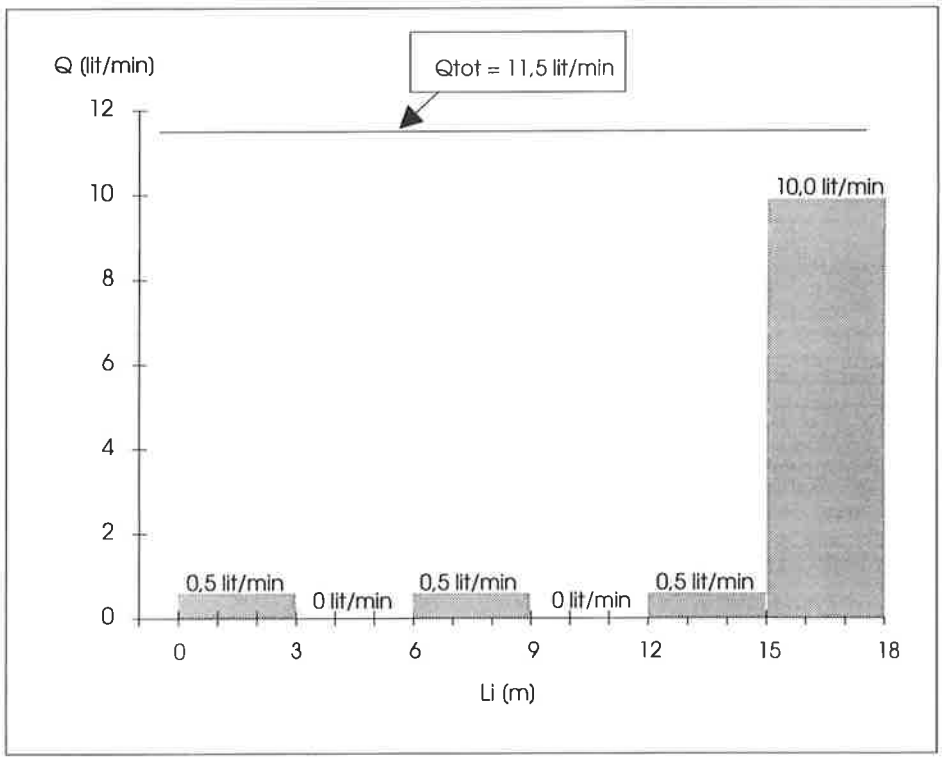
Nedan presenteras mätningsförfarande samt några av resultaten från långmanschettmätningarna, fullständig presentation av resultaten finns i bilaga 7. Placeringen av innerrören på Flex Mix-manschetterna presenteras vidare i avsnitt 2.3.1.

Skärm 20

I skärm 20 hade relativt stora vattenförluster konstaterats i hål nr 2, 5, 23, 34 och 44. Mätning med lång enkelmanschett utfördes av praktiska skäl endast i hål nr 5 och 34.

En enkel mekanisk manschett med förlängningsstänger användes, vilket visade sig vara svårare än beräknat. Gängorna i skarvstängerna slets mycket snabbt och både manschett och hål riskerade att gå förlorade genom fastsättning. Inför kommande mätningar anskaffades en tryckluftsmanschett.

Innan arbetet avbröts konstaterades dock läget för förmodad sprickzon eller slag för hål nr 5 ligga mellan 15-18 m (se figur 2.8) och för hål nr 34 mellan 9 - 18 m (se bilaga 7). Anledningen till det oprecisa resultatet för hål nr 34 var att arbetet avbröts vid 9 m djup.



Figur 2.8 Vattenförlustmätning med lång enkelmanschett hål nr 5 skärm 20

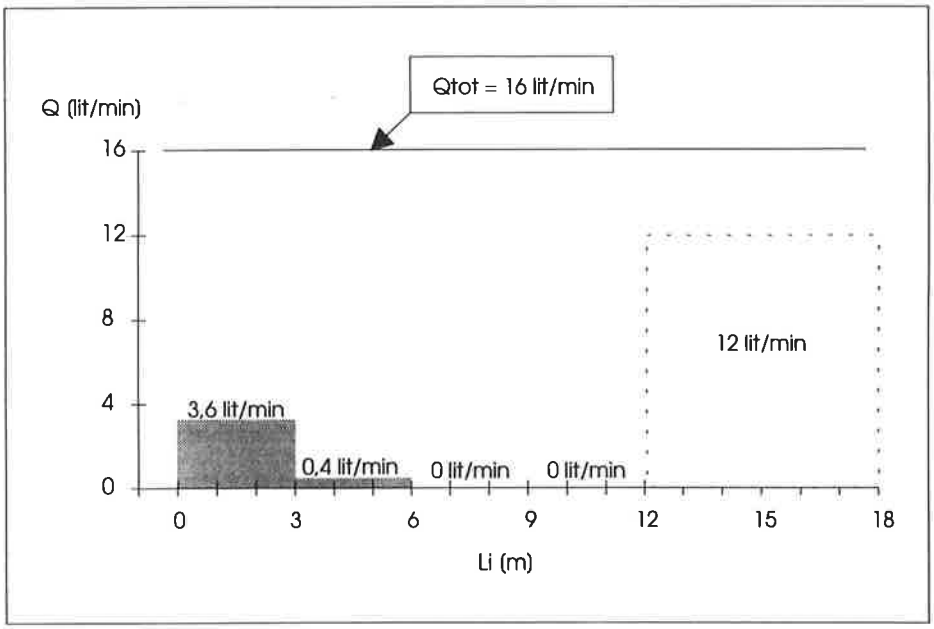
I båda de mätta hålen i skärm 20 konstaterades således den vattenförande zonen ligga i änden av hålen.

Skärm 21

Relativt stora vattenförluster hade konstaterats i hål nr 20 och 24 i skärm 21. Dessa vattenförlustmättes därför med lång enkelmanschett. Efter problemen med den mekaniska manschetten, hade en manschett med en tätning som pumpas upp med tryckluft eller vatten anskaffats.

När mätningarna påbörjades visade det sig att trycket på luften som fanns på arbetsplatsen (7 bar) inte räckte till, utan en kompressor inhyrdes. Kompressorns maxtryck på 10 bar var på gränsen till att inte räcka till, men mätningarna klarades av.

I hål 20 läckte vatten under mätningen förbi manschetten redan vid ca 3 m djup. Eftersom läckaget förbi manschetten var tillsynes oförändrat stort, antogs hålet ha en längsgående spricka med början vid 3 m. Diagram med mätresultatet finns i bilaga 7.



Figur 2.9 Vattenförlustmätning med lång enkelmanschett hål nr 24 skärm 21

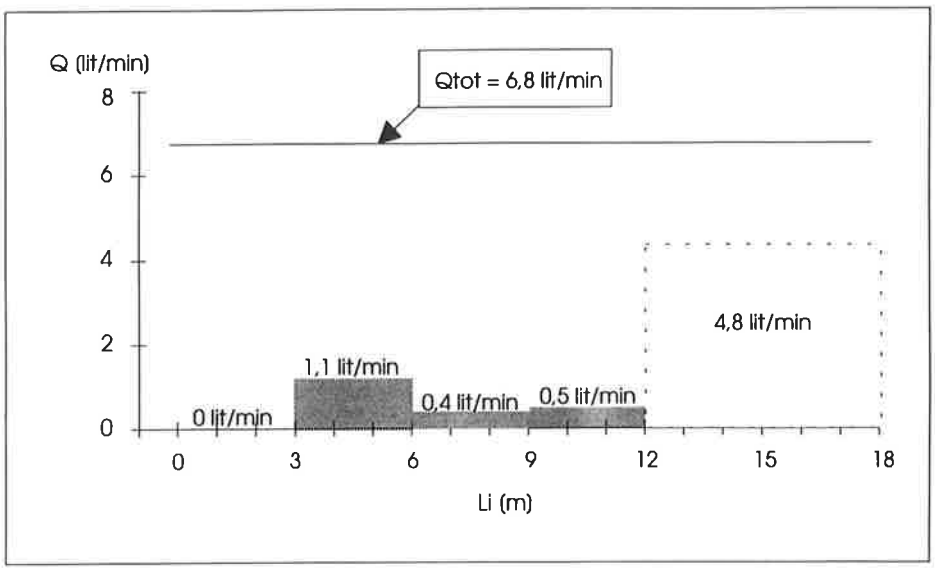
Det relativt stora flödet i hål 24 (16 lit/min) var uppdelat i ca 4 lit/min i ytberget närmast stuff och 12 lit/min i änden av hålet. de sista 3 m i hålet testades inte pga stenkänning på ca 14,5 m djup. Vattenförande zon eller slag låg mellan 12 - 18 m (se figur 2.9).

Skärm 23

Den inledande vattenförlustmätningen visade generellt mer permeabelt berg i skärm 23 jämfört med skärmarna 20 och 21. Tidplanen medgav dock endast vattenförlustmätning med lång enkelmanschett i ca 4 hål per skärm.

I skärm 23 utfördes mätning med lång manschett i hål nr 1, 2, 26 och 27. Tryckluftsmanschetten manövrerades med luft från gasflaska, så problemen med för litet gastryck undveks.

Hål nr 1 och 2 mättes inte djupare än till ca 9 m djup, eftersom hålen gått ihop under borrningen och manschetten kunde sättas fast. Vattenförlusterna fram till 9 m visade att de stora förlusterna låg i de sista 5-6 m av hålen. Diagram över vattenförlusterna för hål nr 1 presenteras i figur 2.10, medan diagrammet för hål nr 2 finns i bilaga 7.



Figur 2.10 Vattenförlustmätning med lång enkelmanschett hål nr 1 skärm 23

I hål nr 26 och 27 erhölls stora utflöden ur borrhålen vid ca 9 m, varefter mätningarna avbröts. Diagrammen över vattenförlustmätningarna i hål nr 26 och 27 presenteras i bilaga 7.

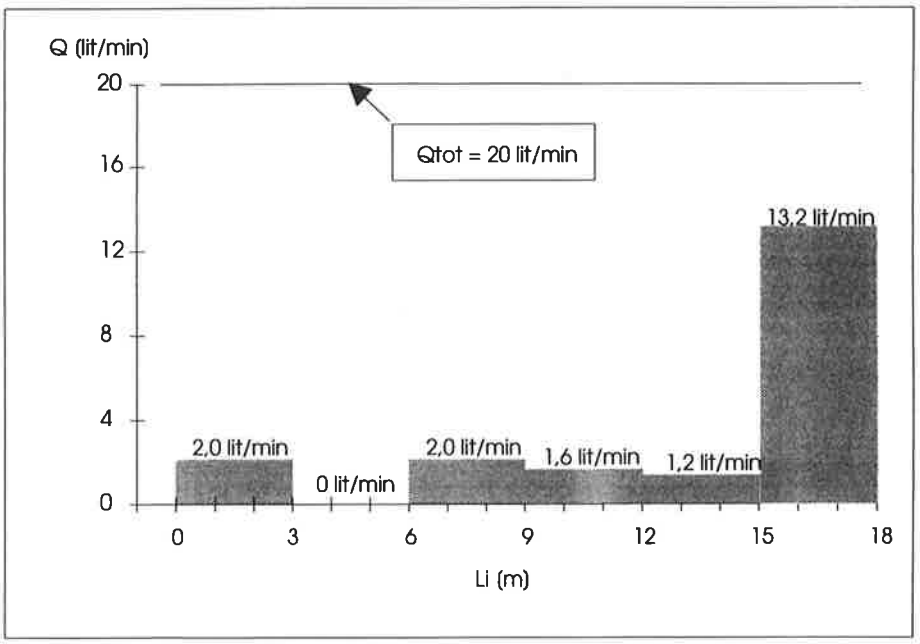
Läckageställena låg alltså i samtliga 4 hål i skärm 23 någonstans mellan 9-18 m. Med tanke på den överlappning på ca 9 m som tillämpades avseende injekteringen, var det ett rimligt och väntat resultat.

Skärm 24

Skärm 24 var den mest permeabla skärmen i testserien, speciellt i skärmens nedre del erhölls stora vattenförluster i den inledande mätningen. Tidplanen tillät endast mätning av 4 hål och dessa valdes till hål nr 30, 33, 40 och 41. Tryckluftsmanschetten driven med luft från gasflaska användes även här.

Mätningen av hål nr 30 avslutades tidigt, endast två 3 m etapper mättes pga känning av slag eller dylikt mellan 6-9 m. I hål nr 33 uppgick vattenförlusten till ca hälften av det totala mellan 9-12 m, men mätningen avslutades vid 12 m djup pga tidsbrist. Diagrammen över vattenförlustmätningarna i hål nr 30 och 33 presenteras i bilaga 7.

Mätningen i hål nr 40 avbröts vid djupet 15 m, eftersom det var svårt att föra in manschetten och den riskerade att fastna. Merparten av totala vattenförlusten låg enligt figur i bilaga 7 mellan 12-18 m.

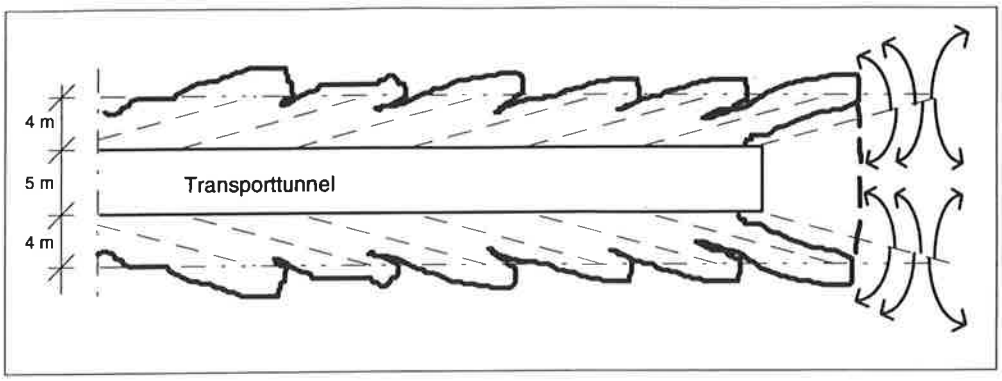


Figur 2.11 Vattenförlustmätning med lång enkelmanschett hål nr 41 skärm 24

Hål nr 41 kunde mätas längs hela hålet och fördelningen av vattenförlusterna visas i figur 2.11. Vattenförlusterna var fördelade längs hålet men de stora vattenförlusterna låg alltså i änden av hålet.

Både för hål nr 40 och 41 erhölls en större vattenförlust totalt i mätningen med lång manschett jämfört med den inledande mätningen med enkelmanschett, vilket tyder på att urspolning skett genom mätningarna.

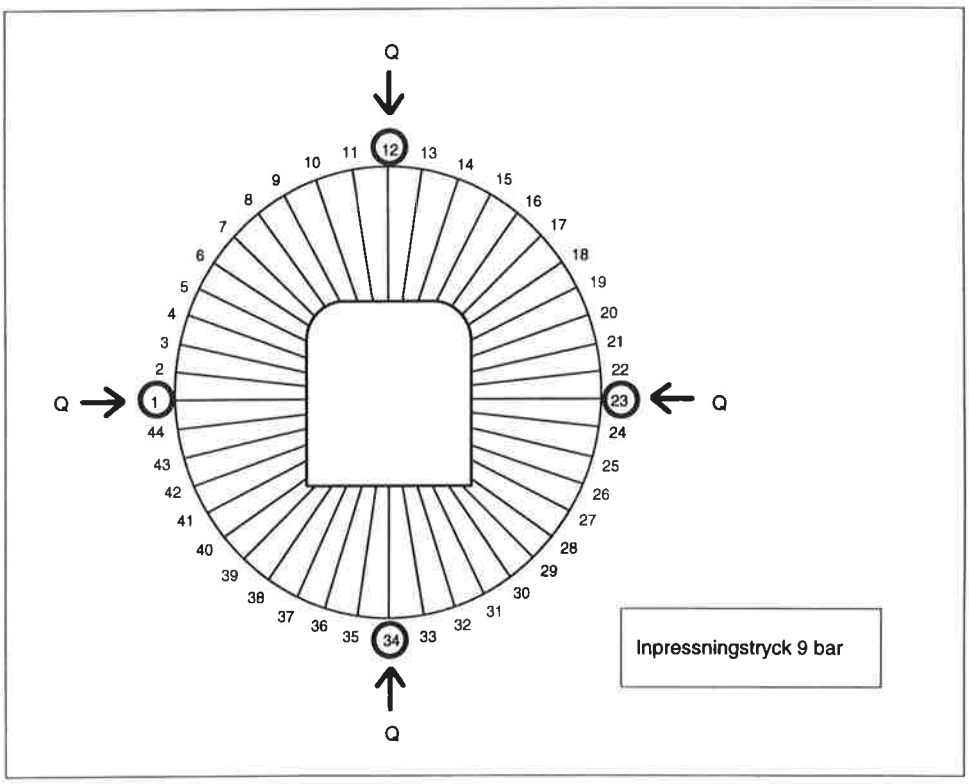
Samtliga ovanstående tester utfördes med ett inpressningstryck på 4 bar och mättiden hölls så kort som möjligt. Sammanfattningsvis kan konstateras att utförd injektering 9 m framför stuff uppenbarligen påverkat bergets permeabilitet, eftersom merparten av vattenförlusterna låg i änden av de mätta hålen (se figur 2.12).



Figur 2.12 Överlappning av injekteringsskärmar i transporttunneln

Interferensmätning

De hydrauliska testerna avslutades med interferensmätning i fyra hål per skärm, där inpressningstrycket var 9 bar och mättiden varierade mellan 30 min och flera timmar, beroende på hur tätt berget var. De hål som tjänade som inpressningshål under interferensmätningarna var hål nr 1, 12, 23 och 34 (enligt fig 2.13).



Figur 2.13 Interferensmätning i fyra hål per skärm; ett i taket, ett i botten, samt ett i vardera väggen

Samtliga manschetter hade försetts med manometrar med olika mätnoggrannhet (10, 6 och 4 bar). Manometrarna placerades under interferensmätningen enligt ett mönster för mesta möjliga mätnoggrannhet; med 10-bars-manometrarna närmast inpressningshålet och med ökande mätnoggrannhet längre bort.

Syftet med interferensmätningen var att konstatera samband mellan hål, samt att erhålla information om hela bergmassans permeabilitet (Gustafson, 1986).

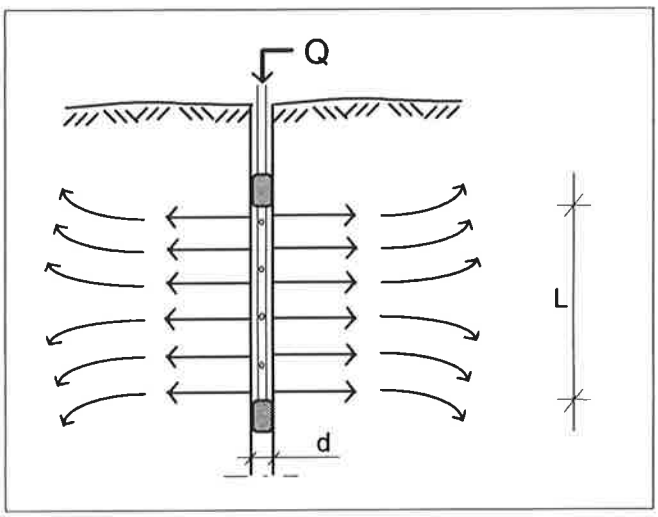
2.2.3 Transmissivitet - utvärdering

Utvärderingen av transmissiviteter gjordes först med Moyés metod (T_m), med antagande om radiellt flöde under vattenförlustmätningen (Carlsson och Olsson, 1986). Därefter användes resultaten från interferensmätningarna för utvärdering med Jacobs metod (T_j) och avstånd/avsänkningsanalys (T_a), (Gustafson, 1986; Carlsson och Gustafson, 1991).

Moyés metod (Lugeon)

Resultaten från vattenförlustmätningarna med enkelmanschett, med inpressningstrycket 4 bar, utvärderades enligt Moyés steady state-metod (stationära förhållanden). Enkelmanschettmätningarna omfattade den inledande grundmätningen (44 hål per skärm), mätningen efter spolning av vart fjärde hål, samt mätningen av vartannat hål efter injekteringsomgång 1.

Under mätningarna registrerades vattenflödet in i hålet, med konstant inpressningstryck på 4 bar, och när flödet in i hålet stabiliserats till ett visst värde avbröts testet. Teorin enligt Moyé antar att berget är homogent, isotropt och har oändlig utbredning.



Figur 2.14 Antagande om flödets utseende enligt Moyé

Under ytterligare antaganden; om att flödet närmast testsektionen är radiellt för att sedan övergå i ett sfäriskt flöde (enligt fig 2.14), deriverade Moyé fram följande uttryck för den hydrauliska konduktiviteten K;

$$K = \frac{Q}{L \cdot H}\left[\frac{1 + ln\left(L/d\right)}{2\pi}\right] \qquad (1)$$

där K = hydraulisk konduktivitet [m/s]
Q = vattenflöde [m^3/s]
L = testsektionens längd [m]
H = tryckhöjdsskillnad (injekteringstryck - grundvattentryck) [m]
d = borrhålets diameter [m]

Carlsson och Gustafson (1991) definierar transmissiviteten T som integralen av den hydrauliska konduktiviteten över den vattenmättade delen b av en akvifer, och om K är isotropt och konstant längs b blir T = K·b [m^2/s].

Gustafson (1986) framhåller att den spruckna kristallina berggrunden är heterogen i hydrauliskt avseende, och att bruttostorheter som gäller borrhålets närmaste omgivning bör betraktas. I fallet med manschettmätningar i bergborrhål brukar b sägas utgöra mätsektionens längd L, varvid uttrycket för transmissiviteten T blir som följer;

$$T = \frac{Q}{H}\left[\frac{1 + ln\left(L/d\right)}{2\pi}\right] \qquad (2)$$

med beteckningar enligt ovan.

Jacobs metod

Resultaten från interferensmätningarna, med inpressningstrycket 9 bar, utvärderades dels med Jacobs approximativa lösning, dels genom passning mot Theis typkurvor. Passningen kan i det här fallet betraktas som en bakåtkontroll, då passningen utfördes efter beräkningen av transmissiviteten med Jacobs metod.

Under antaganden om konstant uttag, Q, och stationära förhållanden före pumpstart kan Theis ekvation anges till (Gustafson, 1986);

$$s = \frac{Q}{2\pi \cdot T} \cdot \frac{1}{2} \int_{\theta_r/4}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx \tag{3}$$

där s = avsänkning [m]
Q = uttag [m^3/s]
T = transmissivitet [m^2/s]

och $\theta_r = \frac{T \cdot t}{r^2 \cdot S}$ som beror av bl a pumpningstid, t, och avstånd från brunnen, r.

Gustafson (1986) visar vidare hur Jacobs approximativa lösning, som gäller vid stora värden på pumpningstid, alternativt små avstånd från brunnen, erhålls ur Theis ekvation som;

$$s = \frac{Q}{2\pi \cdot T} \cdot \frac{1}{2}(0,8091 + ln\,\theta_r) \tag{4}$$

om $\theta_r = \frac{T \cdot t}{r^2 \cdot S} > 100$

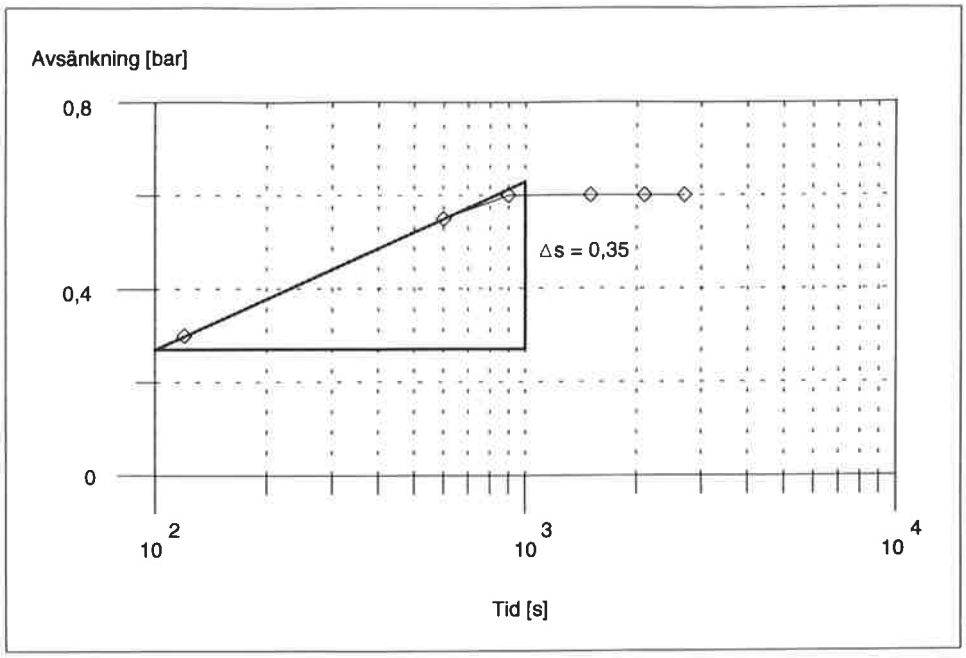
För utvärderingen plottas logaritmen för pumpningstiden, log t, mot avsänkningen s, i ett halvlogaritmiskt diagram. Skillnaden i avsänkning, Δs, över en dekad tecknas;

$$\Delta s = s_{10t} - s_t = \ldots = \frac{Q}{4\pi \cdot T} \cdot ln\,10 \tag{5}$$

varur transmissiviteten från tid - avsänkningsanalysen fås som;

$$T = \frac{0,183 \cdot Q}{\Delta s} \tag{6}$$

Exemplet i figur 2.15 visar den halvlogaritmiska avbildningen av avsänkning mot tid för interferenstestet i skärm 24 med inpumpning av vatten i hål 23 och avläsning av tryckförändring i hål 28. En rät linje har lagts in över en dekad och avsänkningen läses av som 0,35 bar, dvs 3,5 meter vattenpelare. Flödet Q var då konstant $3,17 \cdot 10^{-4}$ m^3/s, varvid transmissiviteten enligt ovan räknas ut till T = $1,65 \cdot 10^{-5}$ m^2/s.



Figur 2.15 Exempel på utvärdering av pumpningsdata med tid - avsänknings-analys från halvlogaritmisk avbildning av hål 28 i skärm 24

C-O Söder beskriver (1994) förfarandet med kurvpassning av logaritmisk avbildning över avsänkning, s, mot tiden, t, mot Theis typkurva W(u). Sambandet mellan avsänkningen s och W(u) tecknas;

$$s = \frac{Q}{4\pi \cdot T} W(u) \tag{7}$$

Om ovanstående samband logaritmeras och arrangeras om erhålls;

$$\log s = \log \frac{Q}{4\pi \cdot T} + \log W(u) \tag{8}$$

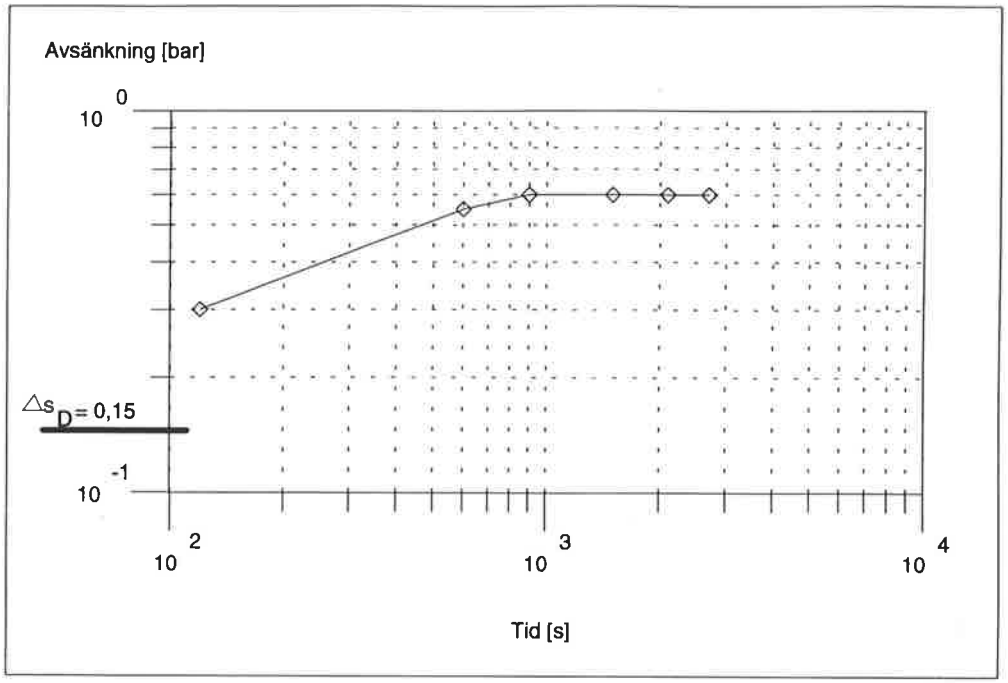
Transmissiviten, T, erhålls ur skillnaden mellan log s-kurvan och typkurvan log W(u) genom;

$$T = \frac{Q \cdot \Delta s_M}{4\pi \cdot \Delta s_D} \tag{9}$$

där Δs_D är avsänkningen förändring i tryckhöjd då typkurvans matchpunkt $\Delta s_D = 1{,}0$.

I figur 2.16 visas som exempel på logaritmisk avbildning av avsänkning mot tid, samma hål som tidigare (hål 28 i skärm 24). Transmissiviteten beräknas enligt sambandet ovan

med Δs_D = 1,5 mvp och flödet Q = $3{,}17 \cdot 10^{-4}$ m^3/s till T = $1{,}68 \cdot 10^{-5}$ m^2/s, vilket kan jämföras med T = $1{,}65 \cdot 10^{-5}$ m^2/s enligt Jacobs lösning ovan.



Figur 2.16 Exempel på logaritmisk avbildning utvärdering av hål 28 i skärm 24 för pumpningsdata genom kurvpassning mot Theis typkurva

Avstånd - avsänkningsanalys

Resultaten från interferensmätningarna, med inpressningstrycket 9 bar, utvärderades även med avstånd - avsänkningsanalys. Gustafson (1991) visar hur avsänkningen, s, vid stora värden på pumpningstid, t, alternativt små avstånd från brunnen, r, kan tecknas m h a Theis ekvation (ekv 3) som;

$$s = \frac{Q}{2\pi \cdot T} \cdot \frac{1}{2}\left(-0{,}5772 - \ln u\right) \qquad (10)$$

om $$u = \frac{r^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t} < 0{,}01$$

För utvärderingen plottas logaritmen för avståndet mellan inpressningshål och avläsningshål, log r, mot avsänkningen, s, i ett halvlogaritmiskt diagram. Skillnaden i avsänkning, Δs, över en dekad tecknas (Gustafson, 1991);

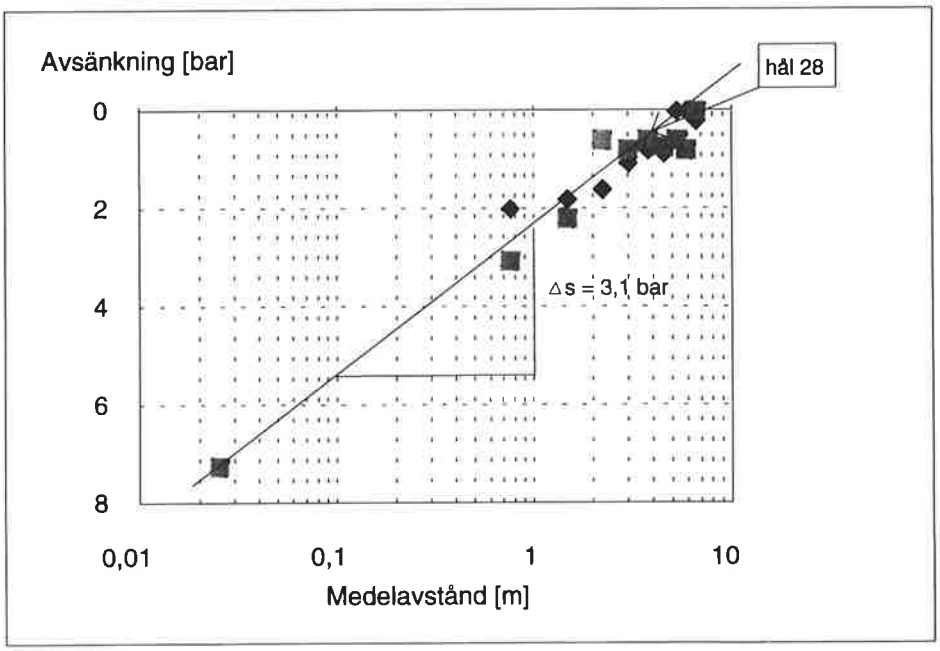
$$\Delta s = s_r - s_{10r} = \ldots = \frac{Q}{4\pi \cdot T} \cdot \ln 100 \qquad (11)$$

varur transmissiviteten från tid - avsänkningsanalysen fås som;

$$T = \frac{0{,}366 \cdot Q}{\Delta s} \qquad (12)$$

Exemplet nedan (figur 2.17) visar resultatet från interferenstestet med inpumpning av vattnet med ca 9 bars tryck i hål 23 i skärm 24. Tryckökningen i omkringliggande hål är markerat i diagrammet, observera att trycket utgör skillnaden mellan inpressningstryck och grundvattentryck.

Med flödet Q = $3{,}17 \cdot 10^{-4}$ m^3/s och Δs = 30,1 mvp ger sambandet ovan en transmissivitet på T = $3{,}78 \cdot 10^{-6}$ m^2/s, dvs ett tydligt lägre värde än beräknat med både Moyés och Jacobs metod (se bilaga 8).



Figur 2.17 Exempel på utvärdering av pumpningsdata med avstånd - avsänkningsanalys från halvlogaritmisk avbildning av hål 28 i skärm 24

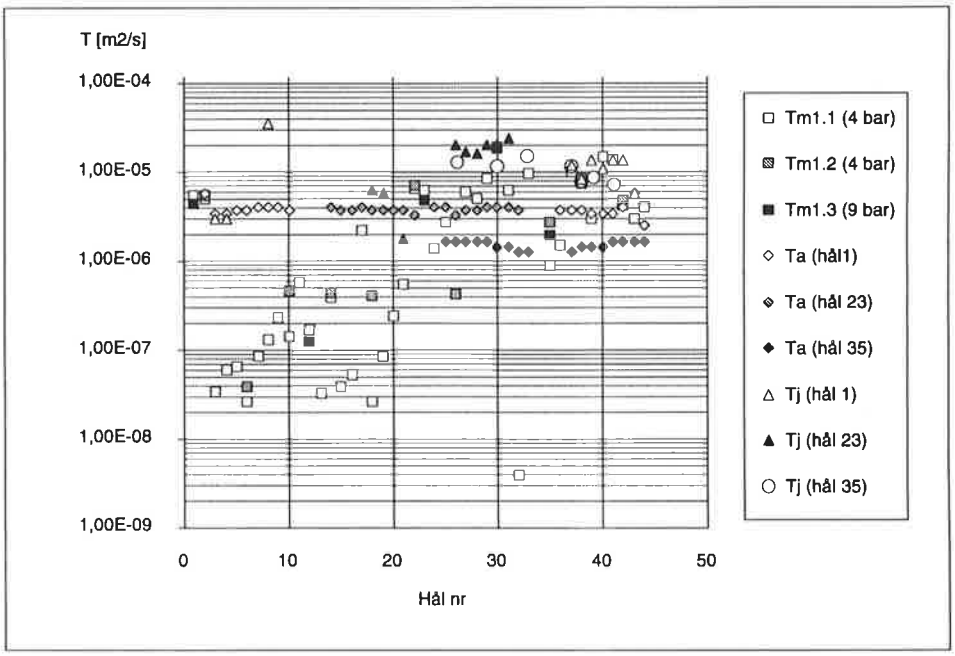
2.2.4 Diskussion kring resultat

Sammanfattning

Sammanfattningsvis låg transmissiviteterna för skärmarna 20 och 21 kring 10^{-7} m^2/s, med ett par högre värden, representativt för bra, tätt urberg. För skärmarna i rödbergszonen (23 och 24) låg transmissiviteten mestadels mellan 10^{-7} och 10^{-5} m^2/s.

I bilaga 8 redovisas transmissiviteten för de fyra skärmarna med diagram, där transmissiviteten erhållen med olika utvärderingsmetoder plottats. Spannet för de enstaka hålen varierar och uppgår som mest till ca två 10-potenser. Nedan visas (figur 2.18) ett sådant diagram, för skärm 24, som exempel.

För utvärdering enligt Jacobs metod (T_j) och avstånd-avsänkningsanalys (T_a), markeras inom parentes det hål som under interferenstestet tjänade som inpressningshål. Indexen för transmissiviteterna utvärderade enligt Moyés metod står för; 1.1 - 'grundmätning', 1.2 - 'efter spolning', samt 1.3 - 'under interferenstest'.



Figur 2.18 Jämförelse av utvärderingsalternativ för transmissiviteten - skärm 24

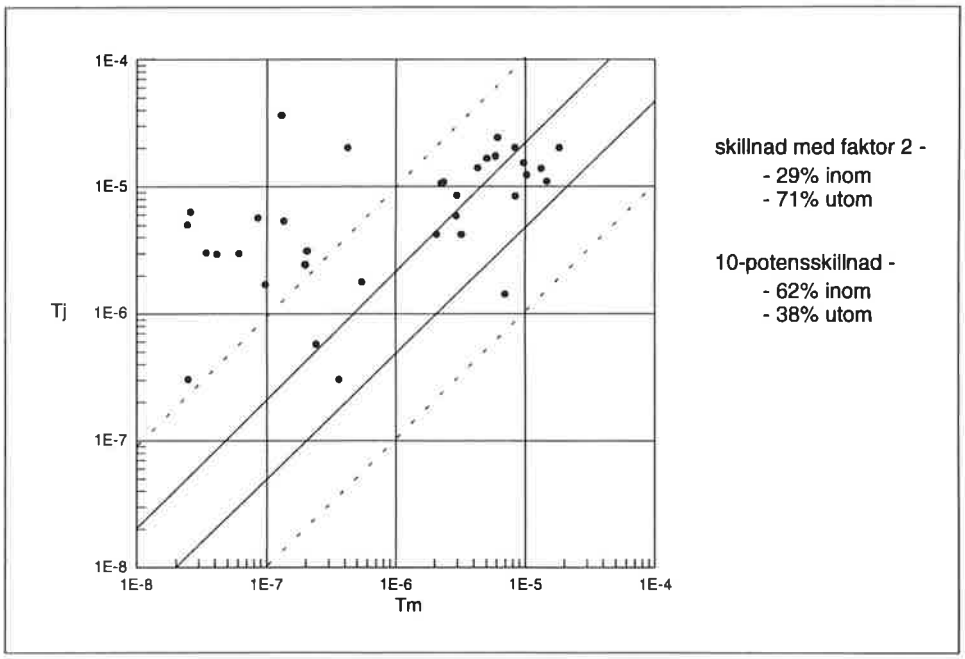
Exemplet i figur 2.18 innehåller mycket information, men är svårt att tyda och jämförelsen mellan olika utvärderingsalternativ utvecklades därför enligt nästa avsnitt. Mest intressant att jämföra var värdena för transmissiviteten utvärderad enligt det enkla förfarandet med Moyés metod, T_m, med de två övriga, mer komplicerade utvärderingsalternativen, T_a och T_j.

Jämförelse av olika utvärderingsmetoder

Överensstämmelsen mellan de olika sätten att utvärdera transmissiviteten illustreras med sk cross plots i diagrammen nedan. I diagrammen är två intervall markerade; heldragna linjer motsvarar en skillnad med faktor 2 mellan utvärderingarna av transmissiviteten, streckade linjer motsvarar en skillnad på en 10-potens.

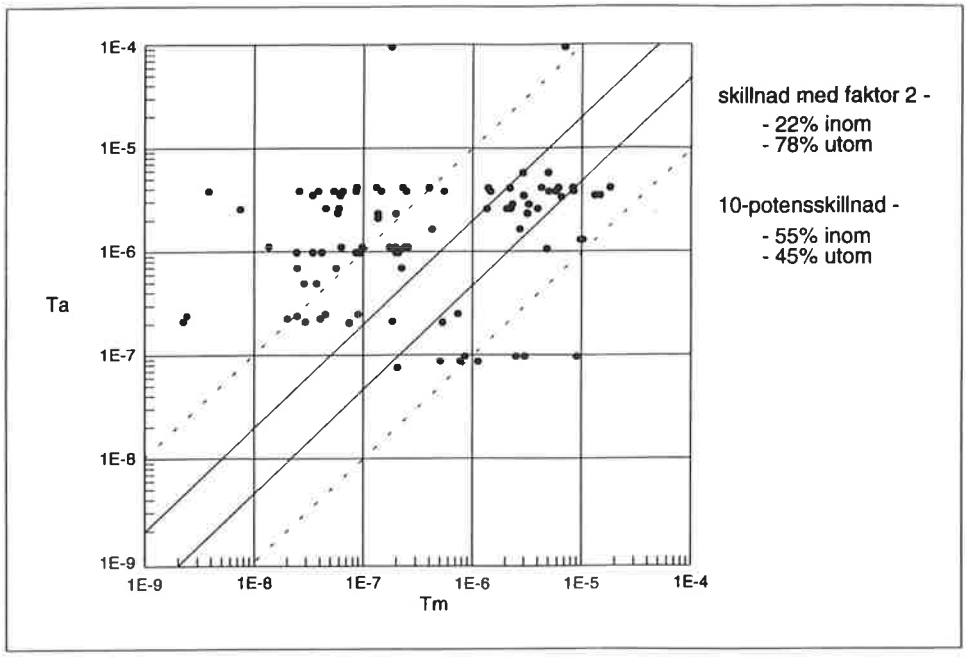
Figur 2.19 visar överensstämmelsen mellan transmissiviteter utvärderade enligt Moyés metod och Jacobs metod för transienta tester; tid - avsänkningsanalys. Överensstämmelsen är relativt god då T ligger mellan 10^{-6} och 10^{-5} m^2/s, men dålig för lägre värden på T_m.

Överensstämmelsen av transmissiviteten, utvärderad med Moyés respektive Jacobs metod, var 29% om en faktor 2 accepterades i skillnad, och 62% om en 10-potens i avvikelse accepterades.



Figur 2.19 Jämförelse mellan utvärdering av transmissiviteter T_m och T_j

Överensstämmelsen mellan transmissiviteter utvärderade enligt Moyés metod och med avstånd - avsänkningsanalys visas i figur 2.20. Fortfarande är överensstämmelsen relativt god då T ligger mellan 10^{-6} och 10^{-5} m^2/s, men dålig för lägre värden på T_m. Om en faktor 2 accepteras i skillnad ligger 22% inom intervallet och 55% om en 10-potens i avvikelse accepteras.

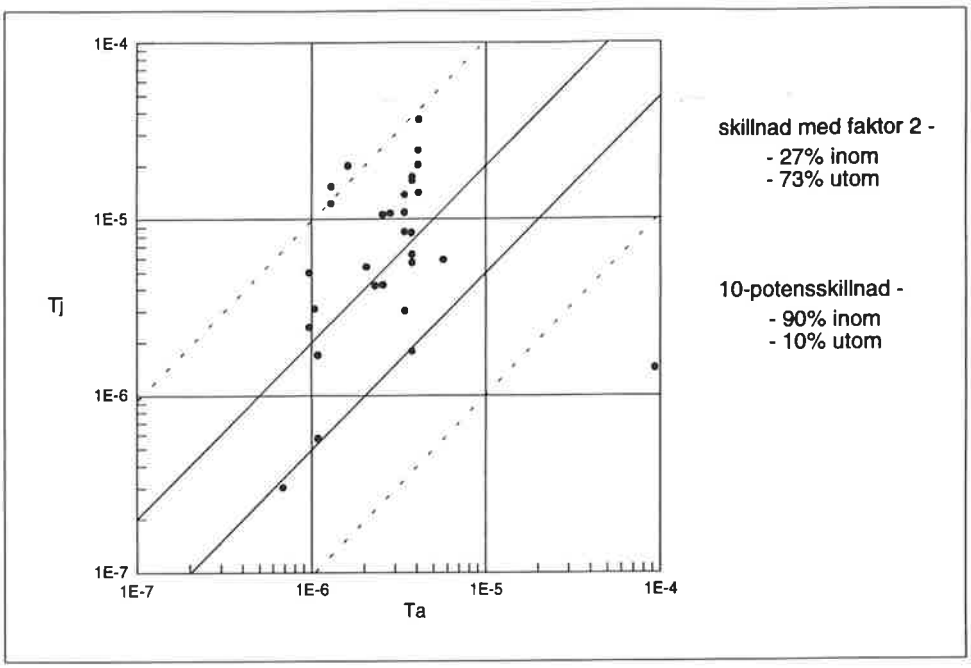


Figur 2.20 Jämförelse mellan utvärdering av transmissiviteter T_m och T_a

Genomgående tycks här utvärdering av transmissiviteten enligt den enklare Moye-metoden, som för övrigt är snarlik Lugeons metod, ge lägre värden på T än utvärdering av transienta tester. Detta torde dels bero på den relativt sett kortare mättiden, dels de antaganden om testsektionens längd som gjorts. Jämförelser av samma slag diskuteras i en SKB-rapport (Follin, 1992) där dubbelmanschettester simulerats numeriskt. Vidare är mätning av mycket små vattenförluster svåra att utföra av mättekniska skäl.

Figur 2.21 visar att överensstämmelsen mellan transmissiviteter utvärderade enligt Jacobs metod för transienta tester, tid – avsänkningsanalys, och med avstånd – avsänkningsanalys, båda med värden från interferenstesterna, är relativt god då T ligger mellan 10^{-6} och 10^{-5} m^2/s. En skillnad med faktor 2 ger en överensstämmelse med 27% och om en avvikelse på en 10-potens accepteras ligger 90% inom intervallet.

Påpekas bör slutligen att samtliga mätningar inte gick att utvärdera på båda sätten, samt att rittekniska faktorer under utvärderingen kan påverka resultaten av utvärderingen.



Figur 2.21 Jämförelse mellan utvärdering av transmissiviteter T_a och T_j

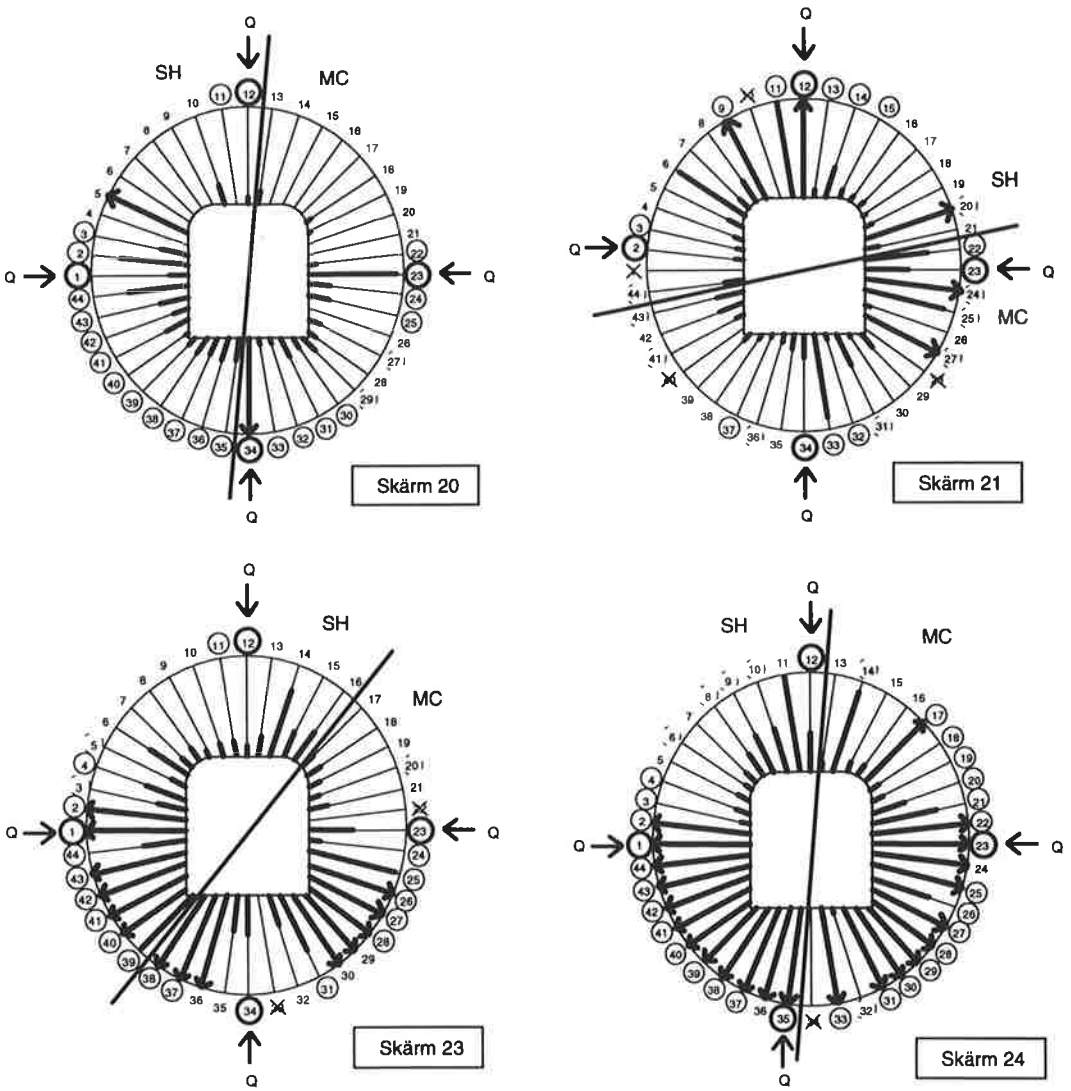
Ulf Håkansson höll vid injekteringskonferensen i Salzburg ett mycket intressant föredrag (Håkansson o. Hässler, 1993) om relevansen i att korrekt bedöma vilken typ av flöde som råder (1D, 2D eller 3D?), och konsekvensen avseende storlek på transmissiviteten i de olika fallen. Beroende på förmodad influenslängd ligger exempelvis transmissiviteten erhållen utifrån ett antagande om endimensionellt istället för tvådimensionellt flöde en faktor ca 20 högre.

2.3 Injekteringstester

2.3.1 Utförande

Val av injekteringsfält

Skärmarna delades in i två injekteringsfält (se figur 2.1), likartade avseende bergets karaktär och uppmätta vattenförluster. Halva skärmen injekterades med SH-cement enligt föreskrifter i handlingarna, dvs med vattencementtal 3,0 vid start, andra halvan med Mikrodur P-F med vattencementtalet 1,5 vid start.



Figur 2.22 Uppdelning av skärmarna i två likartade injekteringsfält

Figur 2.22 illustrerar den hydrauliska bilden för skärmarna, dvs schematisk fördelning och storlek av vattenförlusterna, samt vilka hål som under interferensmätning konstaterats ha kontakt med omkringliggande hål.

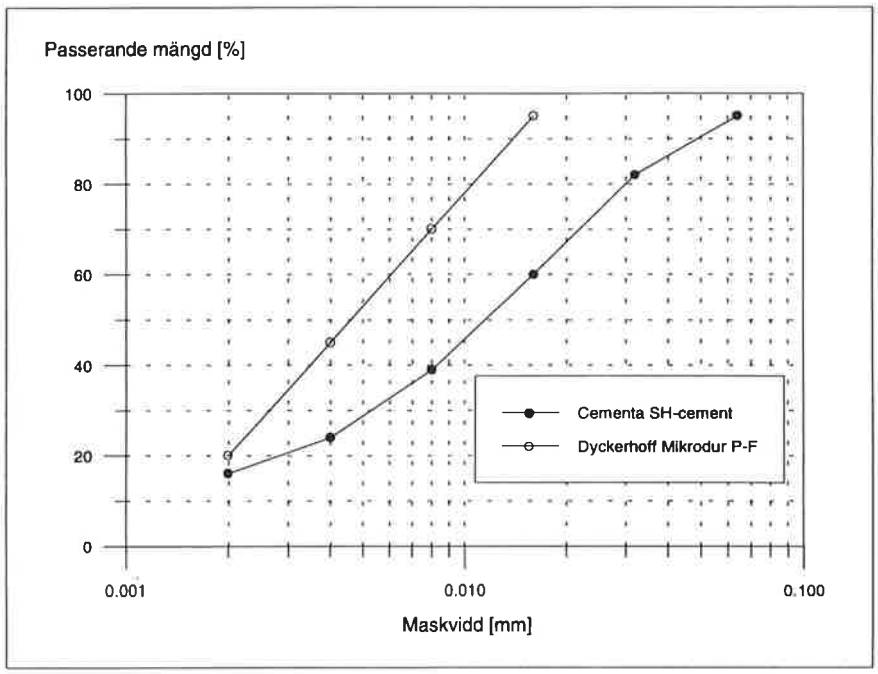
Väsentligt att nämna är att endast vartannat hål i skärmen sedan injekterades, mellanliggande hål hölls öppna med vatten och tillslutning med manschett. Dessa hål tjänade som kontrollhål och vattenförlustmättes igen efter injekteringen.

Denna avslutande vattenförlustmätning, tillsammans med den kompletterande injekteringen (med SH-cement) av de mellanliggande hålen, låg som underlag för bedömningen av resultatet av första injekteringsomgången av respektive skärmhalva.

Injekteringsmaterial- och blandningar

En vanlig tumregel vid cementinjektering säger att suspensionen inte tränger in i sprickor finare än 3-5 gånger större än cementens maximala kornstorlek. I praktiken anges dock ofta d_{95} motsvara den maximala kornstorleken, dvs den kornstorlek i siktkurvan där 95% av cementen passerar.

Kornstorleksfördelning för Cementas SH-cement och Dyckerhoffs Mikrodur P-F illustreras i figur 2.23.



Figur 2.23 Kornstorleksfördelning för Cementas SH-cement och Dyckerhoffs Mikrodur P-F

För SH-cement som dittills använts i projektet, med ett d_{95} på ca 0,06 mm, ger tumregeln en inträngningsförmåga på ca 0.3 mm. För den mikrocement som valdes för testen; Mikrodur P-F, med ett d_{95} på ca 0,016 mm, ligger den teoretiska gränsen för inträngning på ca 0.06 mm. Nedanstående tabell visar några egenskaper för de två cementsorterna.

Tabell 2.1 Egenskaper för Standard-cement SH och Mikrodur P-F

Egenskaper	Cementa SH-cement	Dyckerhoff Mikrodur P-F
Cementtyp	Portlandcement	Portlandcement
Specifik yta	ca 5000 cm^2/g	ca 12000 cm^2/g
Kompaktdensitet	ca 3,15 g/cm^3	ca 3,1 g/cm^3
Kornstorleksmått d_{95}	ca 58 µm	ca 16 µm
Hållfasthet efter 1 dygn	ca 15 MPa	ca 42 MPa

Beskrivning av injekteringsarbetet

I förberedelserna av injekteringsarbetet vid testskärmarna ingick etablering av utrustning för cementinjektering (se avsnitt 1.3.2), samt SH-cement (Snabbt Hårdnande Portlandcement) tillverkat av Cementa och Mikrodur P-F från Dyckerhoff. Som tillsatsmedel till SH-cementen användes bentonit från Ahlsell Mineral samt Intraplast-A (injekterings/expandertillsats) från Svenska Sika. Tillsatsmedel till Mikrodur P-F var flytmedlet Tricosal BV.

Vidare etablerades utrustning för polyuretaninjektering, samt polyuretanen TACSS 020 NF och dess katalysator C-852. Rengöringsmedlet för injekteringspumpen kallas Washing Agent. Samtliga ingående komponenter för injektering med polyuretan införskaffades från DE NEEF Scandinavia AB.

Ca fyra s k Flex Mix-manschetter iordningställdes före injekteringen och installerades i de hål som uppvisat stora vattenförluster. Injekteringen av dessa hål beskrivs närmare i nästa stycke.

Injekteringsarbetet inleddes med blandning av en sats SH-cement, som blandades precis i enlighet med övrig injektering i projektet. Dvs med ett inledande vattencementtal på 3,0, samt med tillsats av 4 vikts-% bentonit och 0,5 vikts-% Intraplast. Vartannat hål i halva skärmen injekterades med trehålsutrustningen, och de hål som inte erhöll mottryck med vct 3,0 injekterades till stopp med vct 1,0.

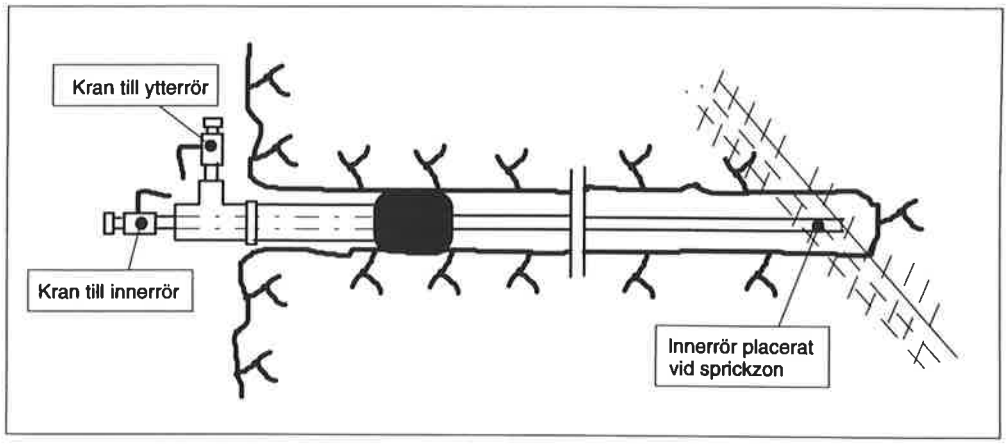
Efter rengöring av utrustningen injekterades den resterande delen av skärmen sedan med mikrocementen Mikrodur P-F, som blandades med ett inledande vattencementtal på 1,5 och tillsats av 1,5 vikts-% Tricosal BV. De hål som inte erhöll mottryck med vct 1,5 injekterades till sluttrycket 20 bar med vct 0,5.

Under injekteringen registrerades tiden för injektering, samt åtgång cementsuspension, för varje hål. Cementåtgången erhölls med hjälp av ett räkneverk monterat på pumparna, som räknade antalet kolvslag. Varje kolvslag motsvarade 0,6 liter suspension.

Stoppkriterie (dvs då 20 bars mottryck erhållits) motsvarade, enligt leverantören av pumputrustningen, att tiden mellan två kolvslag översteg 2 minuter.

Beskrivning av Flex Mix-injekteringen

En Flex Mix-manschett består av en traditionell manschett med tätande gummi som spänns upp mot borrhålsväggen. Borrhålet utgör det s k ytterröret medan en mindre plastslang av lämplig längd utgör det s k innerröret. Konstruktionen inkluderar alltså två kranar; dels till ytterröret, dels till innerröret. Figuren nedan visar en principskiss av Flex Mix-manschetten.



Figur 2.24 Principskiss av Flex Mix-manschetten

Injektering med Flex Mix-manschetten innebär därmed att injekteringshålet kan evakueras på luft och stående vatten före injektering, vilket är viktigt vid all injektering men framförallt vid injektering i vertikala hål. Evakueringen åstadkoms genom att kranen till innerröret hålls öppen tills ren cementsuspension kommer ut, varefter kranen stängs.

Manschetten medger även injektering av två material samtidigt. Om exempelvis mottryck inte erhålls med cementsuspension, kan polyuretan injekteras genom innerröret som placerats vid förmodad vattenförande zon, varvid injekteringen av cementsuspension styrs upp och utbredningen begränsas.

Skärm 20

Flex Mix-manschetter placerades i båda hålen (nr 5 och 34) som vattenförlustmätts med lång manschett, samt i ett tredje som också haft stora vattenförluster men inte mätts med långmanschett av praktiska skäl (hål nr 23). Innerrören placerades på lite olika djup beroende på resultatet av vattenmätningen längs hålen (se avsnitt 2.2.1); 14 m in i hål nr 5, 16 m in i hål nr 34 och 13 m in i hål 23.

Hål nr 23 (T_m= $7 \cdot 10^{-7}$ m^2/s) injekterades med mikrocement (vct = 1,5) sist i injekteringsomgång 1. Bara ca 25 liter (= 14 kg cement) cementsuspension gick åt innan stopp erhölls, således måste hålet haft kontakt med omkringliggande hål eftersom hålet i sig har en volym på drygt 30 liter.

Hål nr 34 (T_m= $2{,}6 \cdot 10^{-6}$ m^2/s) injekterades också med mikrocement (vct = 1,5) i injekteringsomgång 1. Tyvärr fungerade inte Flex Mix-manschetten eftersom berget var trasigt i sulan och suspensionen läckte förbi manschetten som bara är 60 cm lång. En två meter lång traditionell manschett krävdes innan injekteringen kunde fortsätta. Ca 85 liter cementsuspension (= 47 kg cement) behövdes innan mottryck erhölls.

Hål nr 5 (T_m= $4{,}9 \cdot 10^{-6}$ m^2/s) injekterades av praktiska skäl inte i injekteringsomgång 1, utan relativt sent i omgång 2. Trots det svalde hålet mer suspension än något annat i skärmen; efter ca 68 liter suspension av SH-cement (vct = 3, ca 20 kg cement) byttes till vct = 1. Efter ytterligare drygt 180 liter suspension (= 137 kg cement) erhölls stopp utan att polyuretan behövde användas. Hål nr 5 benämndes *singulärt hål* (se avsnitt 2.1.3), dvs hålet hade stora vattenförluster och stor åtgång suspension utan konstaterad kontakt med omkringliggande hål.

Under injekteringen fanns beredskap för injektering av polyuretan i form av en injekteringspump för polyuretan (TACSS) samt injekteringsmaterial, men i skärm 20 behövdes inte styrning av injekteringsförloppet för att mottryck skulle uppnås.

Skärm 21

Flex Mix-manschetter placerades i båda hålen (nr 20 och 24) som vattenförlustmätts med lång manschett. Vattenförlustmätningen med lång manschett hade inte gett en definitiv placering för innerröret (se avsnitt 2.2.1), så de placerades ca 2/3 in i hålen.

Hål nr 20 (T_m= $2{,}5 \cdot 10^{-6}$ m^2/s) injekterades sent i injekteringsomgång 1 med SH-cement (vct = 3). Sluttryck erhölls efter 57 liter suspension (= 17 kg cement). Efter inpumpning av 27 liter suspension erhölls cement ur innerröret, varefter kranen stängdes. Mängden motsvarar ungefär hålfyllnaden.

Hål nr 24 (T_m= $1{,}3 \cdot 10^{-5}$ m^2/s) skulle injekteras med mikrocement (vct = 1,5), men pumpen nådde märkligt nog sluttryck efter bara ett par kolvslag. Det visade sig att

mikrocementen lagrats utomhus, blivit fuktig och därför förstörd. Det fiktiva stoppet var ett resultat av igensättning i systemet. Eftersom hålet var försett med en Flex Mix-manschett kunde det lätt spolas rent med vatten och injekterades sedan med SH-cement.

Åtgången cementsuspension blev 184 liter (= 55 kg cement) med vct 3 och 72 liter (= 54 kg cement) med vct = 1,0. I hål 24 erhölls cement ur innerröret först efter 48 liter, dvs mer än hålfyllnaden, vilket visade på förekomst av en spricka eller sprickzon som svalde bruk.

Skärm 23

Flex Mix-manschetter placerades före injekteringen i omgång 1, i hål nr 2 och 26. I båda hålen var innerröret ca 12 m långt, dvs 2/3 in i hålen.

Hål nr 2 (T_m= $8 \cdot 10^{-6}$ m^2/s) injekterades med SH-cement ganska tidigt. Åtgång cement-suspension med vct 3,0 blev 184 liter (= 55 kg cement), vilket det tog knappt en halv-timma att pumpa in. Efter att ha minskat vct till 1,0, kunde endast drygt 8 liter (= 7 kg) pumpas in under ca 10 min, innan sluttryck erhölls. 21 liter suspension pumpades in innan cement kom ut ur innerröret på manschetten, varefter kranen stängdes.

Hål nr 26 (T_m= $1 \cdot 10^{-5}$ m^2/s) injekterades med mikrocementen Mikrodur P-F ganska tidigt. Hålet fylldes efter ca 22 liter suspension, varefter innerröret stängdes. Efter 235 liter (= 130 kg cement) suspension med vct 1,5 (ca 30 min), byttes till vattencementtal 1,0. Innan mottryck erhölls svalde hålet under 11 min ytterligare 34 liter (= 41 kg).

Beredskap för injektering med polyuretan fanns, men cementinjektering räckte för att er-hålla sluttryck inom rimlig tid och med acceptabel materialåtgång för båda hålen. I den kompletterande injekteringen (omgång 2) användes av praktiska skäl inga Flex Mix-manschetter.

Skärm 24

Inför injekteringsomgång 1 placerades Flex Mix-manschetter i hål nr 30 och 40. Inner-rörens längd var i båda fallen ca 12 m. Gränser fastställdes för injekteringen i form av tillåtet antal kolvslag (1 kolvslag = 0,6 liter) innan blandningen skulle "tjockas på". Exempelvis sattes för SH-cement vct 3 följande riktlinje upp för ändring till vct 1,0; efter ca 3 säckar cement (75 kg) vilket ger ca 240 liter, dvs ca 400 kolvslag.

Hål nr 40 (T_m= $1{,}5 \cdot 10^{-5}$ m^2/s) injekterades sist i injekteringsomgång 1 med SH-cement. Inledningsvis var vct 3,0, efter 142 liter suspension (= 42 kg) med oförminskad pumptakt* under 8 minuter, blandades ny suspension med vct 1,0. Ca 186 liter (= 140

* Den fastställda gränsen frångicks eftersom pumptakten var oförminskad och det endast tog 8 min att pumpa in ca 150 liter suspension.

kg) pumpades in under 11 min, varefter cementinjekteringen avbröts för injektering med polyuretanen TACSS/FLEX (T/F).

Först injekterades 2 liter T/F utan katalysator, för att spara kranarna i Flex Mix-manschetten. Därefter pumpades 4 liter T/F med 4% katalysator C-852 in. Ytterligare en sats på 4 liter T/F (4% C-852) blandades till, men när ca 3 liter var kvar i pumpen läckte T/F ut kring manschetten. Manschetten drogs åt hårdare och injekteringen fortsatte, men när ca 2 liter var kvar rörde manschetten lite på sig och injekteringen avbröts. Eftertryckning med lite cementsuspension utfördes efter en stund, som kontroll av resultatet.

Hål nr 30 ($T_m = 2{,}9 \cdot 10^{-5}$ m^2/s) injekterades med Mikrodur P-F relativt tidigt i omgång 1. Vattencementtalet var inledningsvis 1,5, men minskades ganska tidigt eftersom suspensionen försvann i oförminskad takt. Efter 195 liters åtgång (= 107 kg cement, vct 1,5) på ca 11 minuter, minskades vct till 1,0. Ytterligare 70 liter (= 53 kg) pumpades in på bara 5 min, varefter blandningen tjockades på igen. En suspension med vct 0,5 användes under ca 10 minuter; åtgången blev ca 91 liter (= 110 kg).

Fortfarande var pumptakten oförminskad och beslutet togs att injektera med polyuretan för att styra utbredningen av cementsuspension. Ca 2 liter T/F med 4% C-852 fanns kvar i pumpen sedan injekteringen av hål nr 40. Den späddes med 2 liter T/F till 4 liter T/F (2% C-852) som pumpades in i innerröret på 12 m djup. Ytterligare 4 liter T/F med 2% C-852 pumpades in och efter en stund eftertrycktes hålet med lite cementsuspension.

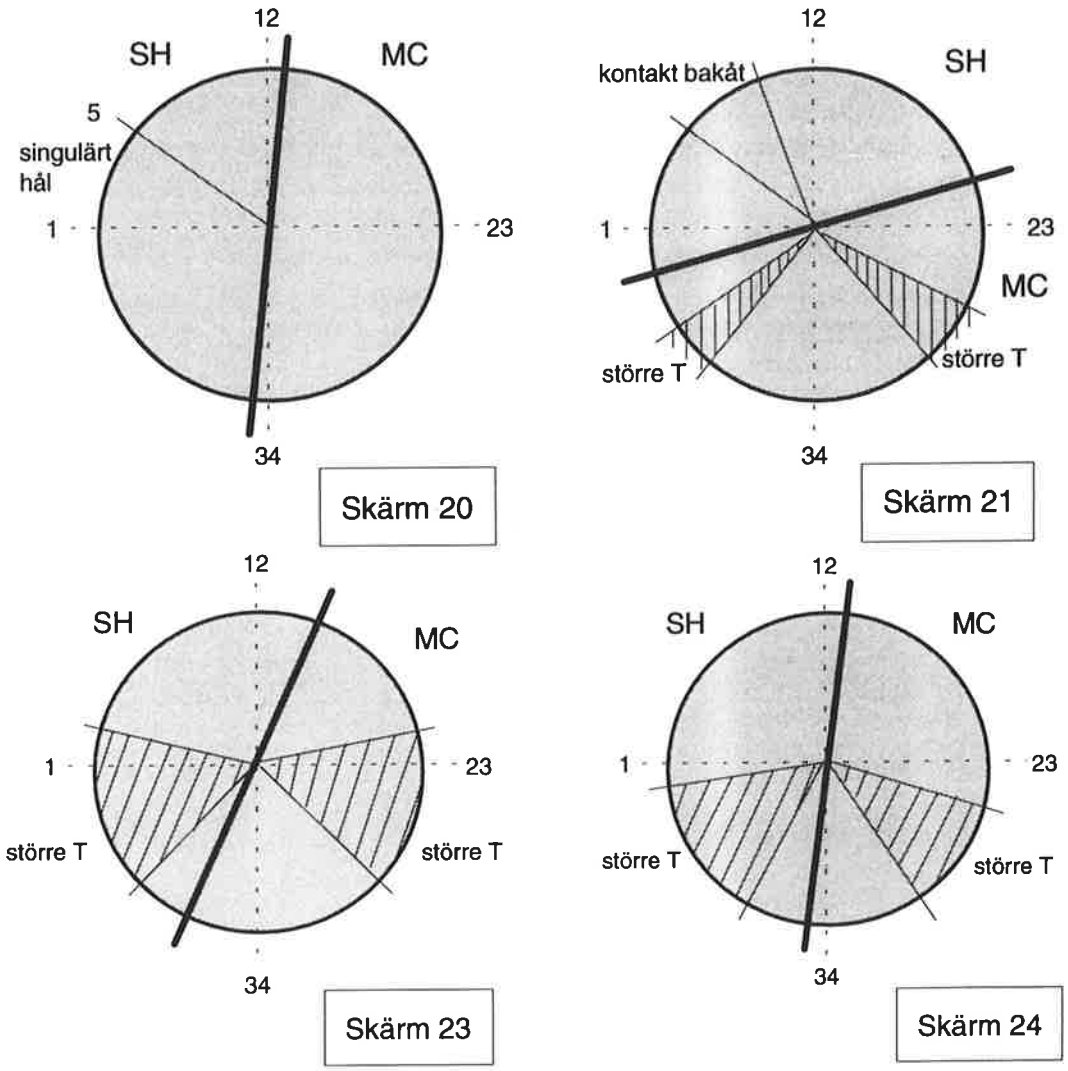
Omfattningen av injektering med polyuretan genom Flex Mix-manschetter, för styrning av cementsuspension, var mycket ringa under injekteringsförsöken. Underlaget är därför för magert för att en regelrätt utvärdering skall kunna göras.

2.3.2 Utvärdering av injekteringsresultat - fält och sektorer

Beskrivning av injekteringsskärmarna

Som tidigare nämndes hade berget vid de två första skärmarna (20 och 21) en annan karaktär än vid de två senare (23 och 24). En fin, grå homogen granit med få sprickor övergick i en röd, kraftigt uppsprucken inhomogen granit.

Figuren nedan visar indelningen i injekteringsfält (se avsnitt 2.3.1), samt information om mer permeabla sektorer etc, för de fyra testskärmarna.



Figur 2.25 Injekteringsfält samt permeabla fält i testskärmarna

I ett berg av den första typen är injekteringsresultatet avhängigt att kontakt uppnås med någon av de få sprickorna. Har kontakt väl uppnåtts är utbredningen av suspension god och begränsas framförallt av friktionen längs sprickans ytor.

För den andra typen berg är infiltrationsförhållandena mer gynnsamma eftersom många sprickköppningar nås med samma borrhål (Borchardt, 1993). Förutom friktion i sprickorna påverkas suspensionens utbredning av faktorer som tryckfall samt sk bridging (överbryggning av cementkorn) vid sprickköppningen.

Utvärderingsmetodik

Utvärderingen baserades främst på jämförelser av materialåtgång (i liter suspension respektive kg cement) mellan injekteringsfälten och mer permeabla sektorer inom dem. Den avslutande vattenförlustmätningen i de kvarvarande, öppna hålen, gav en uppfattning om injekteringens effektivitet, dvs inträngning respektive utbredning i omgång 1.

Materialåtgången för injekteringen i omgång 1 (se avsnitt 2.1.2) med SH-cement respektive mikrocement (MC) jämfördes, vilket gav kvoter mellan injekteringsfälten. Kvoterna presenteras i det följande som "$V_{cs(SH:MC)}$" för åtgång suspension och "$C_{(SH:MC)}$" för åtgång cement.

Slutligen jämfördes materialåtgången i den kompletterande injekteringen (injekteringsomgång 2), där enbart SH-cement injekterades, vilket gav kvoter mellan injekteringsomgång 1 och 2. Kvoterna presenteras i här som "$V_{cs(1:2)}$" för åtgång suspension och "$C_{(1:2)}$" för åtgång cement, och kan sägas representera effekten av injekteringen i omgång 1.

Redovisning av utvärdering

I det följande presenteras, skärm för skärm, utvärderingen av injekteringsresultatet för fält och sektorer i de fyra skärmarna.

<u>Skärm 20</u>

Skärm 20 låg i en homogen grå granit med få sprickor, som hade en låg transmissivitet ($T<10^{-7}$ m^2/s). Hål 5 är markerat i figur 2.25 eftersom det uppfattades som ett singulärt hål, dvs hade en hög transmissivitet men inget samband till omkringliggande hål.

Injekteringen erfordrade genomgående en låg åtgång av suspension, både på SH-och MC-halvan. Totalt i injekteringsomgång 1 åtgick dock mer SH-cement än MC-cement; $V_{cs(SH:MC)}$= 2,7:1, $C_{(SH:MC)}$= 2,0:1. Om det singulära hålet räknades bort blev cementmängden i kg lika stor för båda halvorna i omgång 1, trots högre vattencementtal för mikrocementen (se avsnitt 2.3.1).

Effekten av injekteringen var god för båda halvorna, för SH-halvan var åtgången betydligt större i omgång 1 än i omgång 2, både i liter och kg; $V_{cs(1:2)}$= 3,8:1, $C_{(1:2)}$= 5,1:1. För mikrocementhalvan var motsvarande kvoter $V_{cs(1:2)}$= 2,0:1, $C_{(1:2)}$= 3,2:1.

Valet av cementsort tycktes i det fallet vara betydelselöst vad avser mängden cement, såvida man inte kunde visa att utbredningen av mikrocementen är mindre, dvs att fyllnaden av sprickor är bättre. Bergkärnor för att försöka fastställa utbredningen av injekteringen har tyvärr inte tagits.

Resultatet av vattenförlustmätningen i mellanliggande, icke injekterade hål visade till stor del oförändrade värden på transmissiviteten. Eftersom åtgången i injekteringsomgång 2 dessutom i stort sett motsvarade hålfyllnaden, kan antalet hål anses vara överdimensionerat i det här fallet.

Skärm 21

Liksom vid skärm 20 var berget här en homogen grå granit med få sprickor och med låg transmissivitet (mest kring 10^{-7} m^2/s). Förutsättningarna för jämförelser mellan de båda skärmarna borde alltså varit goda, men pga en rad olika orsaker omöjliggjordes dock en dylik.

I figuren (fig 2.25) är en sektor markerad där kontakt med bakomliggande skärm konstaterades under injekteringen, vilket gav en onödigt stor materialåtgång och försvårade jämförelser. Två sektorer med högre transmissivitet är också markerade. Trots att båda ingår i MC-halvan injekterades den högra med SH-cement.

Anledningen till detta var att när hål 24 (med stora vattenförluster och därför försedd med Flex Mix-manschett), skulle injekteras upptäcktes att mikrocementen var dålig. Den hade tyvärr lagrats utomhus och blivit fuktig. Flex Mix-manschetten möjliggjorde urspolning av hålet och injektering med SH-cement. Den dåliga mikrocementen närmast omöjliggör naturligtvis en rättvis jämförelse.

Ytterligare en märklig företeelse noterades vid denna skärm - vattenförlustmätningen efter injektering gav nämligen högre transmissiviter än före. Detta kan bero på hydraulisk spjälkning under injekteringen, eller på det faktum att arbetet vid skärmen avbröts under drygt en månad, vilket skulle kunna ge effekter pga urspolning eller spänningsrelaxation.

Skärm 23

Berget vid skärm 23 låg i en övergångszon, från homogen grå granit med få sprickor till kraftigt uppsprucken inhomogen röd granit. Transmissiviteten låg mellan 10^{-8}-10^{-5} m^2/s, mestadels mellan 10^{-7} - 10^{-6} m^2/s (se bilaga 8).

Två sektorer med högre transmissivitet, och större cementåtgång i både omgång 1 och 2 än den övriga skärmen, är markerade i figur 2.25. Jämförelser mellan åtgång av cementsuspension med SH-och MC-cement, gjordes dels för skärmen totalt, dels med skärmen uppdelad i de mer respektive mindre permeabla delarna.

Eftersom skärmen består av sektorer med olika karaktär, är inte skillnaden i total åtgång SH-cement kontra mikrocement rättvisande, varför enbart skillnaden mellan sektorerna redovisas här. I den mindre permeabla delen åtgick i omgång 1 mer SH-cement både i liter och kg; $V_{cs(SH:MC)}$= 1,9:1, $C_{(SH:MC)}$= 1,3:1, trots högre vattencementtal för mikrocementen.

I den mer permeabla delen var förhållandet det omvända, mer MC-cement än SH-cement gick åt i omgång 1; $V_{cs(SH:MC)}$= 1:1,3 och $C_{(SH:MC)}$= 1:2,8. Om sektorerna verkligen är jämförbara, tyder alltså detta på att mikrocementen lättare än SH-cementen trängt in i det uppspruckna berget. För att ytterligare undersöka detta jämfördes även effekten av injekteringen, genom jämförelse av åtgången i omgång 2.

För den permeabla sektorn i SH-halvan var åtgången <u>större</u> i omgång 2 än i omgång 1, både i liter och kg; $V_{cs(1:2)}$= 1:1,1 och $C_{(1:2)}$= 1:1,3. Motsvarande kvoter för MC-halvan var $V_{cs(1:2)}$= 1,8:1, $C_{(1:2)}$= 3,5:1. Såvida inte hydraulisk spjälkning ägt rum i SH-halvan, tyder resultatet på en större effektivitet hos mikrocementen.

Valet av cementsort tycktes i det här fallet ha betydelse, inte så mycket avseende mängden cement ty totalmängden mikrocement i kg i omgång 1 var större än mängden SH-cement, men av effektivitetsskäl. Mikrocementen tätade de mer permeabla delarna mer effektivt än SH-cementen.

Resultatet av vattenförlustmätningen i mellanliggande hål visade på lika många hål med oförändrade värden på T som med lägre värden. Eftersom åtgången cementsuspension i omgång 2 i vissa hål var stor, kan antalet hål anses vara motiverat i det här fallet.

<u>Skärm 24</u>

Berget vid skärm 24 bestod mestadels av kraftigt uppsprucken inhomogen röd granit. Transmissiviteten låg mellan 10^{-8} och 10^{-5} m^2/s, ca hälften av hålen kring 10^{-5} m^2/s (bilaga 8).

Två sektorer med högre transmissivitet, och större cementåtgång i både omgång 1 och 2 än den övriga skärmen, är markerade i figur 2.25. Jämförelser mellan åtgång av cementsuspension med SH-och MC-cement, gjordes för hela skärmen, samt med den uppdelad i de mer respektive mindre permeabla delarna. Liksom för skärm 23 redovisas enbart skillnaden mellan sektorerna här.

I den mindre permeabla delen åtgick i omgång 1 mer SH-cement än MC-cement både i liter och kg, trots högre vct för mikrocementen; $V_{cs(SH:MC)}$= 2,8:1 och $C_{(SH:MC)}$= 2,1:1.

I den mer permeabla delen var förhållandet det omvända, mer MC-cement än SH-cement gick åt i omgång 1; $V_{cs(SH:MC)}$= 1:1,1 och $C_{(SH:MC)}$= 1:1,5. Det tycktes således som om mikrocementen lättare än SH-cement trängt in i det uppspruckna berget även här. Eftersom skillnaden i liter här inte var så stor, undersöktes även effekten av injekteringen genom jämförelse av åtgången i omgång 2.

För den permeabla sektorn i SH-halvan var åtgången större i omgång 1 än i omgång 2, både i liter och kg; $V_{cs(1:2)}$= 2,6:1 och $C_{(1:2)}$= 4:1. För MC-halvan var motsvarande kvoter betydligt större $V_{cs(1:2)}$= 6,4:1 och $C_{(1:2)}$= 10:1, varför man kan sluta sig till att mikrocementen liksom för skärm 23 var mer effektivt än SH-cementen i de permeabla sektorerna.

Valet av cementsort tycks i det här fallet ha betydelse, både vad avser mängden cement eftersom totalmängden mikrocement i kg i omgång 1 var mindre än mängden SH-cement, och av effektivitetsskäl. Mikrocementen tätade de mer permeabla delarna mer effektivt än SH-cementen.

Resultatet av vattenförlustmätningen i mellanliggande hål visade även här på ungefär lika många hål med oförändrade värden på transmissiviteten, som med lägre värden. Antalet hål kan anses vara motiverat i det här fallet, eftersom åtgången cementsuspension i omgång 2 i vissa hål i de permeabla sektorerna var stor.

Sammanställning

Den avslutande vattenförlustmätningen i de kvarvarande hålen, redovisas enbart procentuellt i texten ovan, utan att värden eller förändringar presenteras. En sammanställning av transmissiviteten för dessa hål beräknad enligt Moyé, före respektive efter injektering finns i bilaga 9.

I tabell 2.2 sammanställs de kvoter som erhållits efter studium av åtgången cement (i liter och kg) enligt ovanstående. I tabellen ingår för fullständighetens skull, även kvoter som inte kommenterats i texten.

Observera fotnot 1) till tabellen på nästa sida, samt att kvoter för skärm 21 saknas pga dels direktkontakt med skärmen bakom, dels pga förstörd mikrocement. Båda faktorerna gjorde att jämförelser var omöjliga att genomföra.

Tabell 2.2 Sammanställning av kvoter för jämförelsestudier

Skärm nr		Inj.omgång 1 $V_{cs(SH:MC)}$	$C_{(SH:MC)}$	SH-cement $V_{cs(1:2)}$	$C_{(1:2)}$	MC-cement $V_{cs(1:2)}$	$C_{(1:2)}$
20	1)	2,7 : 1,0	2,0 : 1,0	3,8 : 1,0	5,1 : 1,0	2,0 : 1,0	3,2 : 1,0
21	1)	— *)	— *)	—*)	— *)	— *)	— *)
23	1)	1,1 : 1,0	1,0 : 1,7	1,3 : 1,0	1,3 : 1,0	1,6 : 1,0	3,2 : 1,0
23	2)	1,9 : 1,0	1,3 : 1,0	2,0 : 1,0	3,4 : 1,0	1,3 : 1,0	2,6 : 1,0
23	3)	1,0 : 1,3	1,0 : 2,8	1,0 : 1,1	1,0 : 1,3	1,8 : 1,0	3,5 : 1,0
24	1)	2,1 : 1,0	1,5 : 1,0	2,8 : 1,0	4,2 : 1,0	2,7 : 1,0	5,3 : 1,0
24	2)	2,8 : 1,0	2,1 : 1,0	3,0 : 1,0	4,9 : 1,0	1,3 : 1,0	2,8 : 1,0
24	3)	1,0 : 1,1	1,0 : 1,5	2,6 : 1,0	4,0 : 1,0	6,4 : 1,0	10,0 : 1,0

1) hela skärmen jämförs, observera att skärmar 23 och 24 ej bör studeras på detta sätt (se text)
2) gäller mindre permeabel del av skärmar 23 och 24, kan jämföras med 1) för skärmar 20 och 21
3) gäller mer permeabel del av skärmar 23 och 24

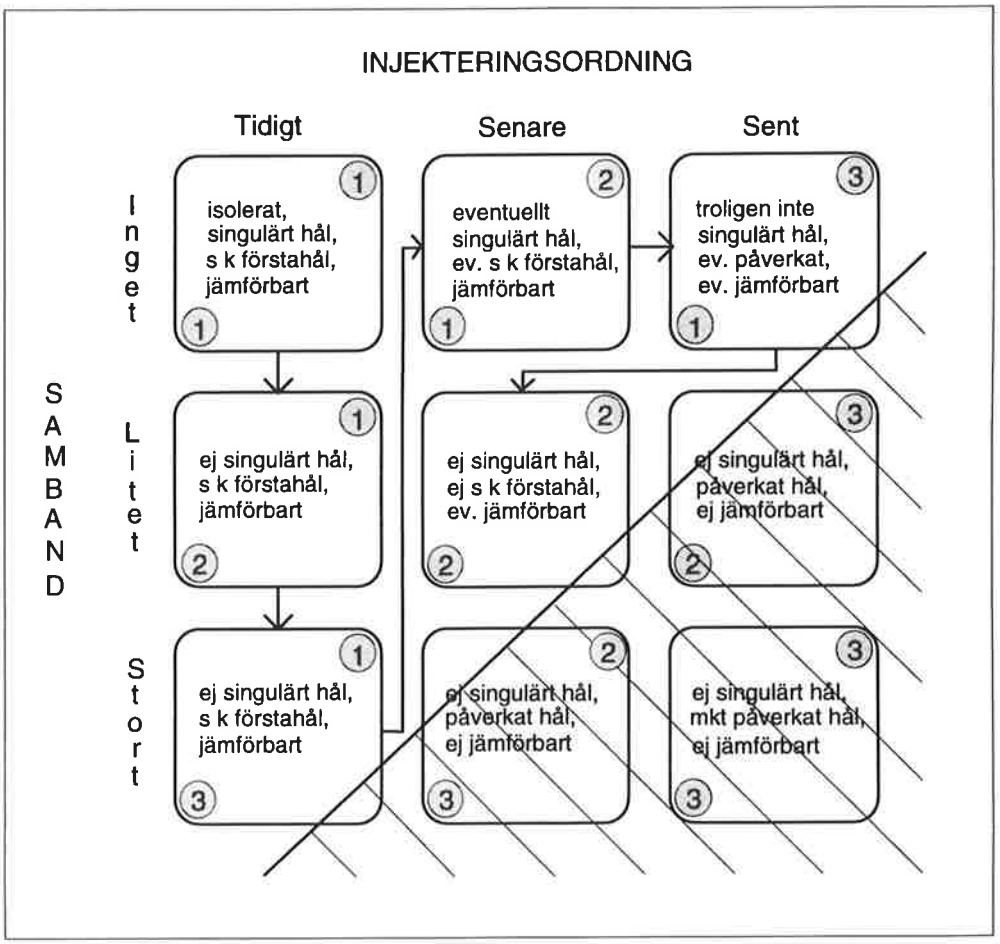
*) pga direktkontakt med bakomliggande skärm, samt förstörd mikrocement, omöjliggjordes jämförelser i skärm 21

2.3.3 Utvärdering av injekteringsresultat - enstaka hål

Förutom en jämförelse av materialåtgången mellan de olika skärmhalvorna totalt, samt sektorer av dessa med större permeabilitet, vilket beskrevs i avsnitt 2.3.2, jämfördes även enstaka hål. Dessa enstaka hål från dels SH-halvan, dels mikrocementhalvan av skärmen, jämfördes med avseende på transmissivitet, injekteringsordning samt samband med andra hål.

Urvalsprincip

Den urvalsprincip som användes för att identifiera jämförbara hål presenteras med matrisen i figur 2.26 nedan.



Figur 2.26 Betydelse av injekteringsordning kontra samband mellan hål - ett jämförelseunderlag

Matrisen är ett försök att klassificera de enskilda hålen avseende injekteringsordning och hydrauliskt samband med omkringliggande hål. Siffrorna i rutornas hörn anger vikter för respektive faktor, ju lägre vikt desto bättre. Pilarna mellan rutorna anger den ordningsföljd som, enligt min mening, är lämpligast att följa för att finna så opåverkade hål som möjligt att jämföra med varandra.

Till att börja med väger således injekteringsordningen tyngst; ett tidigt injekterat hål är troligen mest opåverkat av injektering i andra hål runtomkring. Därefter väger konstaterade samband med omkringliggande hål tyngst; ju senare i injekteringsproceduren för skärmen, desto viktigare att sambandet är ringa.

Slutligen tas ett "lagom-hål" med i urvalet,; ett hål med 'litet' konstaterat samband med andra hål och injekterat i ett 'senare' skede viktas till 2+2. Efter denna sista ruta tas inga fler med, eftersom övriga bedöms vara ojämförbara. Syftet med matrisen var ju att söka finna jämförbara hål, så lite påverkade av injekteringsprocess och hydrauliska samband som möjligt.

Databas

En databas över de enskilda hålen i skärmarna 20-21 och 23-24, injekterade i omgång 1 (se avsnitt 2.1.2) med SH-cement respektive Mikrodur upprättades. Databasen omfattade för varje hål uppgift om skärm- respektive hålnummer, cementtyp och åtgång i liter respektive kg för injektering av hålet, samt transmissivitet utvärderad enligt Moyés metod (se avsnitt 2.2.2). De totalt 85 st hålen klassades därefter i enlighet med matrisen i figur 2.26 ovan, samt sorterades efter transmissivitet.

Urval ur databasen gjordes med avseende på valda intervall för transmissiviteten; intervallen var $<10^{-8}$, $10^{-8} - 10^{-7}$, $10^{-7} - 10^{-6}$, $10^{-6} - 10^{-5}$, $10^{-5} - 10^{-4}$ och $>10^{-4}$ m^2/s. Ett exempel på resultatet av ett urval visas i tabellen nedan.

Tabell 2.3 Exempel på urval; transmissivitet mellan $10^{-7} - 10^{-6}$ m^2/s och vikter 1+1

Skärm	Hål	Cement	V_{cs} (lit)	C (kg)	T_m1.1-2	Samband	Ordning
20	13	MC	43,0	24,0	$1{,}16 \cdot 10^{-7}$	1	1
23	14	SH	41,0	12,2	$3{,}96 \cdot 10^{-7}$	1	1
23	16	SH	51,4	17,8	$1{,}96 \cdot 10^{-7}$	1	1
24	12	SH	48,0	14,3	$1{,}73 \cdot 10^{-7}$	1	1

I exemplet i tabell 2.3 skulle således hålet injekterat med mikrocement kunna jämföras med hålen injekterade med SH-cement. Ungefär lika många liter suspension gick åt för samtliga fyra hål, men suspensionen av mikrocement med det lägre vattencementtalet 1,5 kräver nästan dubbelt så många kg cement.

Dock; med håldiametern 51 mm, dvs 2 liter per borrhålsmeter för hålfyllning av ca 17 m långa hål, inses att föga mer suspension gick in i sprickorna i berget. Efter noggrant studium av samtliga urval ur databasen, konstaterades att ganska många hål föll bort ur jämförelsen av samma orsak.

Redovisning av utvärdering av enstaka hål

Nedan följer en kort sammanställning över de hål som ingick i urvalen för transmissivitetsintervallen. Sammanställningen inkluderar både de hål som kunde jämföras enligt avsikt, och intressanta hål som inte gick att jämföra med kommentar om orsaker.

$T < 10^{-8}$ m²/s: Totalt 10 hål i urvalet, varav 3 st enstaka med olika vikter samt 5 st med åtgång motsvarande hålfyllnad och därmed ojämförbara. Urvalet innehöll dock ett hål, viktat till 1+1, i skärm 21 med stor åtgång (118 liter MC). I injekteringsomgång 2 var åtgången i ett närliggande hål fortfarande stor, varför ett förfarande med s k split spacing i detta fall skulle varit motiverad. Slutligen ett hål viktat till 3+1, dvs mycket samband men injekterat tidigt, med liten åtgång (11 liter MC). Hålet i skärm 21 var antingen påverkat av sambandet eller av den förstörda mikrocementen.

$10^{-8} < T < 10^{-7}$ m²/s: Totalt 19 hål i urvalet, åtgången för 17 hål låg under hålfyllnaden dvs 2 liter per borrhålsmeter. I flera av hålen var dessutom åtgången under 10 liter, dvs tydlig påverkan av samband eller ordningsföljd. Slutligen var åtgången uppåt 70-80 liter mikrocement i två "lagomhål", dvs viktade till 2+2 och på gränsen i matrisen. Det ena hålet låg i den täta skärmen 20, den andra i den mer permeabla skärmen 23.

$10^{-7} < T < 10^{-6}$ m²/s: Totalt 19 hål i urvalet, åtgången för 13 hål låg under hålfyllnaden. Av övriga 6 hål var 2 hål i skärm 20 starkt påverkade av samband med andra hål (stor åtgång). Ett hål i skärm 24 (viktat till 2+2) hade åtgången 50 liter SH, och ett hål i skärm 23 (viktat till 1+3) hade åtgången 92 liter. Sistnämnda hål benämns singulärt (se avsnitt 2.1.3). Slutligen kunde två hål, viktade till 2+1, i skärm 24 jämföras. Det ena injekterades med mikrocement (53 liter, 29 kg), det andra med SH-cement (41 liter, 12 kg).

$10^{-6} < T < 10^{-5}$ m^2/s: Totalt 8 hål i urvalet, varav 4 st enstaka med olika vikter och därmed ojämförbara. Övriga 4 hål hade en åtgång större än hålfyllnaden; tre hål i skärm 23, ett hål injekterat med mikrocement (48 liter, 26 kg), två injekterade med SH-cement (78 liter, 30 kg och 154 liter, 53 kg) samt ett hål i skärm 24 injekterat med mikrocement (170 liter, 99 kg). Hålen hade dock vikten 3+1, dvs stort samband men injekterade i tidigt skede, och hade t o m samband med varann varför jämförelse inte var möjlig.

$10^{-5} < T < 10^{-4}$ m^2/s: Endast ett hål (skärm 23) hade en transmissivitet större än 10^{-5} m^2/s.

$T > 10^{-4}$ m^2/s: Inga hål med så stor transmissivitet.

Kommentarerna i ovanstående sammanställning visar tydligt hur komplex injekteringsprocessen är. Enkla svar var visserligen inte att förvänta, men den grundliga genomgången av varje skärm och urvalsprincipen möjliggjorde framtagande av s k förstahål.

Förstahålen användes sedan i sprickplansmodellerna för prognosticering av volymsåtgång suspension, som Thomas Janson på KTH i Stockholm arbetar med, och som bl a baseras på att bergmassan kring injekteringshålen är ostörd (se avsnitt 2.3.4).

Som introduktion till nästa avsnitt, där undersökningen med sprickplansmodeller presenteras, bör ett par saker om förstahålen påpekas.

För det första var antalet förstahål som undersöktes i sprickplansmodellerna 14 st av 88 möjliga för skärmparet 20 och 21, samt hela 26 st för skärmparet 23 och 24. Således användes betydligt fler än de först injekterade hålen i undersökningen, vilket möjliggjordes genom att samband konstaterade under interferensmätningen beaktades.

Vidare har även hål injekterade under injekteringsomgång 2 (se avsnitt 2.1.2) använts som förstahål, vilket innebär att antagandet om att injekteringen i omgång 1 isolerat kvarvarande hål accepterats.

Transmissiviteten som används i sprickplansmodellerna är den senast uppmätta före den aktuella injekteringsomgången. Slutligen har stor vikt lagts vid i vilken ordning hålen injekterats, både för hål injekterade i omgång 1 och omgång 2.

2.3.4 Utvärdering av injekteringsresultat - sprickplansmodeller*

Cementbaserade injekteringsmedel med tillsatser

Allmänt

Cementbaserade injekteringsmedel är suspensioner, dvs fasta partiklar suspenderade i en vätska (vatten). Partiklarna medför att medlet får helt andra egenskaper än vad som är fallet för en lösning.

Cementpartiklarna har en avgörande inverkan på medlets strömningsegenskaper och inträngningsförmåga. Bindningarna mellan de fasta partiklarna i suspensionen gör att vätskan erhåller en flytgräns (skjuvhållfasthet), som betecknas τ_0. Således kan cementsuspensioner beskrivas med en Binghammodell, med parametrarna τ_0 och viskositeten μ (Hässler, 1991). Dessa två parametrar utmärker medlets reologiska egenskaper, där flytgränsen bestämmer inträngningslängden och viskositeten strömningshastigheten.

En viktig egenskap är även injekteringsmedlets stabilitet, dvs om partiklarna separerar från vätskefasen på grund av tryck- eller gravitationspåverkan. Med instabila medel kan en ansamling av partiklar erhållas, varvid en filterplugg bildas, eller en sedimentation av partiklar på botten av sprickan. Instabila medel medför alltså en ofullständig och framförallt en oförutsägbar injektering.

Tillsatsmedel

- Bentonit

  För att minska separationen hos ett injekteringsmedel tillsätts bentonit, dvs en finmalen vulkanisk lera. Bentoniten absorberar vatten vilket, genom att en minskad mängd vatten är tillgänglig för cementen, medför en fiktiv sänkning av vattencementtalet.

  Detta leder till en generell höjning av flytgräns och viskositet. Skall bentoniten uppnå full effekt krävs att den blandas med vatten i förväg så att de svällande egenskaperna hinner träda i kraft.

- Flytmedel

  Med hjälp av flytmedel kan ett cementbaserat injekteringsmedel ha ett lågt vct-tal, samt innehålla bentonit, och ändå vara lättflytande. Flytmedlet dispergerar cementpartiklarna, dvs motverkar klumpning av enskilda partiklar och förhindrar uppkomsten av nya, samt fungerar som ett smörjmedel mellan kornen.

---

* Avsnitt 2.3.4 har huvudsakligen författats av doktorand Thomas Janson på avdelningen för Jord- och bergmekanik på KTH i Stockholm

I mikrocement är flytmedel nödvändigt på grund av mikrocementens benägenhet till ihopklumpning vid blandning med vatten. Flytmedlet sänker således medlets viskositet och flytgräns, men verkan avtar snabbt med tiden efter blandning och effekten minskar efter cirka en halvtimme. Tillsatsen Intraplast stabiliserar bruket och verkar expanderande (svällande), men påverkar även brukets reologiska egenskaper ungefär som vanligt flytmedel.

Egenskapsmätning av cementbaserade injekteringsmedel

Rotationsviskosimeter

Injekteringsmedlets reologiska egenskaper kan bestämmas med en rotationsviskosimeter. Mätningen sker genom att en cylinder roteras i vätskan och det vridmoment som krävs för att hålla en viss vinkelhastighet mäts. För att skapa ett motstånd mellan vätskan och cylindern, beläggs cylindern med en rå yta. Hastigheten hos cylindern varieras och med hjälp av registrerade mätdata kan egenskaperna bestämmas genom kurvpassning (Håkansson et al, 1991). Mätningen kan pågå en längre tid i samma kärl vilket innebär att egenskapernas förändring med tiden kan registeras.

Fältutrustning

- Stigrör

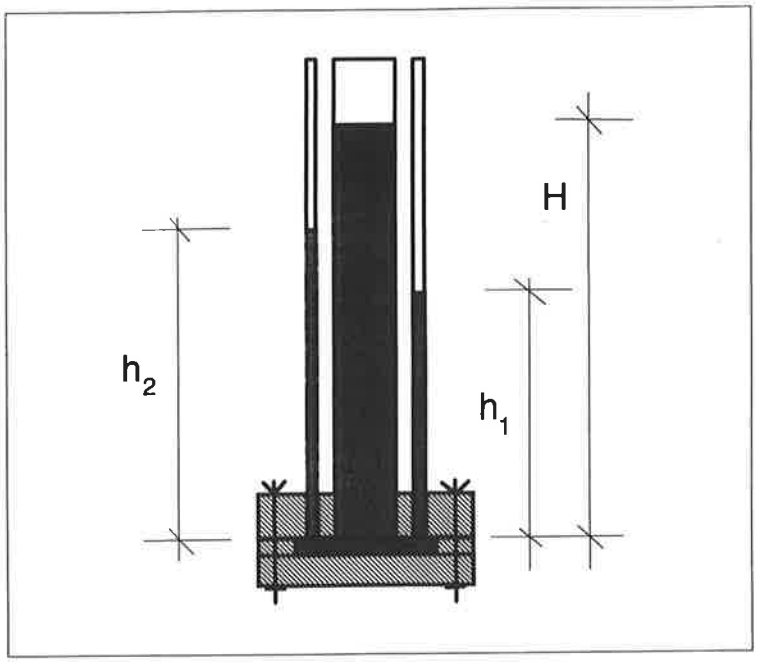
På KTH, Stockholm, har en utrustning för mätning av suspensionernas flytgräns, kallad stigrör (Håkansson, 1993) utvecklats, i samband med BeFo-projekt 423. Instrumentet utnyttjar det faktum att vätskan ej strömmar då skjuvspänningen understiger flytgränsen.

Stigröret består av ett större rör i vilket medlet som skall undersökas hälls (se figur 2.27). När medlet når bottenplattan strömmar det ut radiellt och upp i de finare rören som är utplacerade runt det större. De finare rören, som har olika diametrar, är preparerade invändigt för att skapa en rå yta.

Flytgränsen, τ_0, utläses med hjälp av den nivåskillnad som uppstår mellan det större och de finare rören och bestäms med uttrycket;

$$\tau = \frac{\rho g r}{2}\left(\frac{\Delta h}{H - \Delta h}\right) \qquad (13)$$

där ρ är suspensionens densitet, r är radien på de fina rören, H är nivån i det stora röret och Δh är höjdskillnaden mellan stora röret och fina röret.



Figur 2.27 Principfigur av stigröret

- Marshkon

Marshkonen används för att bestämma medlets reologiska egenskaper. Konen fylls med 1,5 liter suspension och den tid det tar för 1,0 liter av medlet att rinna genom munstycket registreras. Ett problem är dock att för en Binghamvätska mäts en kombination av flytgränsen och viskositeten, eftersom båda egenskaperna påverkar hastighetsprofilen. Om medlets flytgräns och densitet redan är kända kan viskositeten hämtas ur diagram (Håkansson, 1993).

- Mudbalance

Ett enkelt fältinstrument som bestämmer densiteten på medlet, vilken måste vara känd inför utvärderingen av fältmätningarna. Medlet hälls upp i en bägare av känd volym, instrumentet ställs i jämvikt och densiteten kan avläsas direkt på en skala.

- Separation

Ett cementbaserat injekteringsmedel benämns stabilt om maximalt 5% vatten separerar från cementen efter två timmar. Mätförfarandet går till på så sätt att en genomskinlig 1000 ml mätcylinder (60 mm i diameter) fylls med 1,0 liter suspension och efter två timmar avläses separationen.

Mätresultat - fält- och laborationsmätningar

Fältmätningar

Mätningar av injekteringsmedlen utfördes i fält, under injekteringsarbetena i testskärm 24 i transporttunneln. Både fältutrustning och rotationsviskosimeter användes parallellt. Medlen togs direkt från omröraren på injekteringsvagnen, mätningen påbörjades i rotationsviskosimeter och fortsatte med fältutrustningen. Resultaten från mätningen i fält presenteras med en sammanställning i tabell 2.4.

Tabell 2.4 Resultat av utvärdering av mätningarna i fält

	Fältutrustning*			Rotationsviskosimeter*	
Injekterings-medel o. vct	τo [Pa]	μ [Pa·s]	Sedimentation [%]	τo [Pa] (tidsberoende)	μ [Pa·s] (tidsberoende)
SH 3,0	0	— **	38	ca 0,1	0,010 - 0,030
SH 1,0	0,5	0,014	5	ca 2,0	0,020
MC 1,5	0,2	0,015	13	ca 0,6	0,015 - 0,020
MC 0,5	0,3	0,018	2	ca 0,8	0,040 - 0,050

* För kommentater angående skillnader mellan fältutrustning och viskosimeter se avsnittet 'Jämförelse mellan mätningar'.

** Ej möjlig att utvärdera

Mätningarna gjordes endast i samband med injektering av skärm 24, men med samma utrustning, arbetsrutiner och material som för övriga testskärmar (20 , 21 och 23).

Separationen för SH 3,0 och MC 1,5 var för stor för att blandningarna skall kunna kallas stabila. Injekteringen var således inte möjlig att förutsäga med sprickplansmodellerna, som bygger på att stabila bruk används, för SH 3,0 och MC 1,5 (bilaga 10).

Laboratoriemätningar

För att jämföra de värden som erhölls med rotationsviskosimeter i fält gjordes motsvarande mätning i laboratoriet på Jord-och Bergmekanik på KTH. Blandningskomponenter, dvs cement och tillsatser, togs direkt från arbetsplatsen, blandades med en höghastighetsblandare enligt nedan och mättes. Resultaten presenteras i tabell 2.5.

Blandningsordning och tid:	SH-cement	vatten + bentonit	3 min
		cement	2 min
		Intraplast	1 min
	MC-cement	vatten + cement	3 min
		flytmedel	2 min

Tabell 2.5 Resultat av utvärdering av mätningarna i laboratorium

	Rotationsviskosimeter	
Injekterings-medel & vct	τ_o [Pa] (tidsberoende)	μ [Pa·s] (tidsberoende)
SH 3.0	ca 2.0	0.015
SH 1.0	9.0 - 10.0	0.010 - 0.060
MC 1.5	ca 0.5	0.030
MC 0.5	4.0 (-13.0)	0.080 - 0.200

Jämförelse mellan mätningar

- Fältmätningar med rotationsviskosimeter och fältutrustning (tabell 2.4)

Värderna på flytgräns respektive viskositet erhållna med fältutrustning och rotationsviskosimeter med samma blandning i fält, visar på tydliga skillnader. Orsaker till detta är:

I rotationsviskosimeter baseras utvärderingen på approximationen att medlet är en Binghamvätska, dvs har ett linjärt förhållande mellan deformationshastighet och flytgräns.

Rotationsviskosimetern mäter i ett område mellan den dynamiska och statiska flytgränsen (Håkansson, 1993), medan mätningen i stigröret uppskattar den initiella flytspänningen och alltså mäter den så kallade dynamiska flytgränsen.

Ovanstående fakta ger att en viss skillnad i resultat erhållna med fältutrustning och viskosimeter är oundviklig.

- Rotationsviskosimeter, skillnader mellan fält- och laboratoriemätningar (tabeller 2.4 o. 2.5)

Vid jämförelse mellan fält- och laboratoriemätning med viskosimetern visar resultaten på stora skillnader. Orsaken till detta kan vara flera, exempelvis:

Blandningsordning för de olika komponenterna i suspensionen, vilket har stor betydelse för de reologiska egenskaperna.

Vid höga vct-tal kommer de enskilda cementpartiklarna att sedimentera och mätningen sker i en förtunnad blandning, som blir okontrollerbar.

Vid antagande om Binghamvätska kan enligt Håkansson (1993) flytgränsen respektive viskositeten bestämmas i intervallen 0,5 till 25,0 Pa respektive 0,010 till 0,250

Pa·s i rotationsviskosimeter, medan osäkerheten i mätningen blir stor utanför dessa intervall.

Blandningsförfarandet i fält och laboratorium visade sig vara olika för SH-cementen. Bentonittillsatsen tillfördes i fält efter cementen och i omvänd ordning i laboratoriet, vilket har en stor betydelse för egenskaperna (se avsnittet om tillsatser).

Således gjordes en kompletterande mätning av en blandning med SH-cement med vct 3,0 på laboratorie med tillsats av bentonit efter cementen. Mätningen gjordes med rotationsviskosimeter och fältutrustning (se tabell 2.6).

Tabell 2.6 Resultat utvärdering av kompletterande mätning i laboratorie.

	Fältutrustning, se bilaga			Rotationsviskosimeter,	
Injekterings-medel o. vct	τ_0 [Pa]	μ [Pa·s]	Sedimentation [%]	τ_0 [Pa] (tidsberoende)	μ [Pa·s] (tidsberoende)
SH 3,0	0,11	— *	40	0,07 (0,01)	0,020

* Ej möjlig att utvärdera

Jämförelsen av flytgräns och viskositet erhållna i fält respektive laboratoriet stämmer då bättre överens, men sedimentationen är för hög för att kunna påstå att SH 3,0 är stabil.

Sprickplansmodeller

Tre teoretiska sprickplansmodeller har utvecklats på KTH (Janson, 1993) för att kunna förutsäga volymsåtgången vid en injektering. I projektet Kungliga Biblioteket har en jämförelse mellan teoretisk och uppmätt volymsåtgång gjorts.

Volymen kan uppskattas med hjälp av inträngningslängd och bergets sprickköppning för valt injekteringsmedel. Modellerna baseras på :

- Kännedom om injekteringens stopptryck och medlets reologiska egenskaper.
- Bergmassans transmissivitet, utifrån gjorda vattenförlustmätningar.
- Bergets mottaglighet för injektering, dvs kännedom om bergmassan.

Modellerna baseras på att bergmassan kring injekteringshålen är ostörd (jungfrulig) efter vattenförlustmätningen. Således kan endast de s k förstahålen (se avsnitt 2.3.3), där bergmassan ej har påverkats efter vattenförlustmätningen, användas i jämförelsen mellan teoretisk och uppmätt volym.

Injekteringsmedlens egenskaper mättes dels i fält, dels i laboratoriet. Vid jämförelsen har både fält- och laboratorieresultat använts. Injekteringsskärmarna har delats in i två

grupper med olika geologiska förutsättningar (nr 20 o.21 respektive 23 o. 24). Trycket för injekteringen beräknas som skillnaden mellan stopptryck och grundvattentryck.

Modell I

• Allmänt

Injekteringen sker i cirkulära sprickplan med konstant spricköppning, b, som är beräknad utifrån bergets transmissivitet. Utfyllnaden sker med en inträngningslängd och antalet injekterbara sprickplan motsvarar antalet vattenförande sprickplan.

Den förväntade volymen, V_{inj}, kan bestämmas, baserat på förhållandet mellan antagen inträngningslängd, bedömd spricköppning och antal sprickplan, ur följande uttryck;

$$V_{inj} = \left(\frac{\Delta P}{2\tau_0}\right)^2 \frac{12T\mu_w}{\rho_w g}\pi \qquad (14)$$

där ΔP är tryckskillnaden mellan injekterings- och grundvattentrycket, τ_0 brukets flytgräns, T bergmassans transmissivitet och μ_w vattnets viskositet.

• Tillämpning

Transmissiviteten T är i huvudsak utvärderad enligt Moyés metod (se avsnitt 2.2.3), efter resultat från vattenförlustmätningen. Från sprickkarteringen har sprickfrekvensen uppskattats. Beräkningar av hydrauliska spricköppningen har gjorts enligt "cubic law" (Gustafson, 1985).

Spricköppningen för skärmarna 20 och 21 samt 23 och 24 får då värden kring 20 µm respektive 30 µm, dvs spricköppningen är mindre än vad som krävs för att cementkornen ska kunna tränga in. Modellen beaktar inte skillnaden i injekterbarhet mellan vatten och injekteringsmedel, därav de små spricköppningarna.

Modell II

• Allmänt

Injekteringen sker i kanaler som summeras ihop och beskrivs som en sektionsdel i ett cirkulärt sprickplan (Hässler, 1991). Sektionsdelen beskrivs med en vinkel α, som beror på bergets geologi, och en spricköppning, som baseras på vattenförlustmätningen och bergets geologi. Utfyllnaden sker med en inträngningslängd och antalet injekterbara sprickplan motsvarar antalet vattenförande sprickplan.

Den förväntade volymen, V_{inj}, kan bestämmas, baserat på förhållandet mellan inträngningslängden, sprickköppningen, bergets geologi, och antalet sprickplan, ur följande uttryck :

$$V_{inj} = \left(\frac{\Delta P}{2\tau_0}\right)^2 \frac{12 Q_w \mu_w}{2\Delta P_w} ln\left(1 + \frac{\alpha L}{W}\right) \qquad (15)$$

där ΔP är tryckskillnaden mellan injekterings- och grundvattentryck, τ_0 medlets flytgräns, Q_W och ΔP_W är flödet respektive trycket från vattenförlustmätningen samt L influensavståndet,W borrhålets omkrets och μ_W vattnets viskositet.

• Tillämpning

Genom data utifrån vattenförlustmätning samt med uppskattning av spridningsvinkeln och influensavståndet kan volymen beräknas. Spridningvinkeln har bestämts utifrån bergmassans kvalitet och ges värderna 0,4 och 0,8 rad, enligt Janson (1993). Influensradien L uppskattas till 15 m.

Modell III

• Allmänt

Modell III är en utveckling av modell I där hänsyn tas till flera geologiska faktorer, såsom bergets olika beteende vid inträngning av vatten och injekteringssuspension, injekteringens mönster i berget och effekten av sekundära sprickplan.

Den förväntade volymen, V_{inj}, kan bestämmas, baserat på förhållandet mellan inträngningslängden, medelöppningen och kanalöppningen i sprickplanet, antalet injekterbara samt sekundära sprickplan, ur följande uttryck;

$$V_{inj} = \left(\frac{\Delta P}{2\tau_0}\right)^2 \frac{12 T \mu_w}{\rho_w g} \cdot \frac{k_1 k^2 \theta \beta}{k_3^2} \pi \qquad (16)$$

där ΔP är tryckskillnaden mellan injekterings- och grundvattentryck, τ_0 medlets flytgräns, T bergmassans transmissivitet, μ_W vattnets viskositet och k_1, k, k_3, θ och β är korrektionsfaktorer som speglar bergets olika geologiska parametrar (se nedan).

• Tillämpning

Förutom bestämning av transmissiviteten utifrån vattenförlustmätningar, skall de fem geologiska parametrarna bestämmas. De geologiska parametrarna har bestämts enligt följande;

$k = 2 - 5$	:	Sprickplanens råhet samt injekteringmedel.
$k_1 = 0{,}07 - 0{,}15$	:	Bergmassans kvalitet, spricktyp samt injekteringsmedel.
$k_3 = 1{,}5 - 1{,}8$	:	Sprickplanens mönster.
$\theta = 1{,}0$	:	Medelsprickköppningen mot hydrauliska öppningen.
$\beta = 1{,}5$	:	Spricksystemet, här uttryckt som huvudsprickgrupper delat med två.

Resultat av sprickplansmodeller

Endast de så kallade förstahålen (se avsnitt 2.3.3) kan användas för beräkning av teoretisk volymsåtgång suspension. Dessa först injekterade hål hade i stort endast injekterats med blandningar av SH 3,0 och MC 1,5, som inte kan anses stabila (se tabell 2.4 sedimentation). Eftersom en stabil injekteringsfront i sprickplanen saknas, kunde volymsåtgången därför egentligen inte prognosticeras med sprickplansmodellerna.

Resultaten brukar presenteras i form av jämförelse mellan teoretisk och uppmätt volym suspension. För skärmar nr 20 o. 21 respektive 23 o. 24 visas resultaten erhållna med modeller I, II och III i tabeller och diagram i bilaga 10.

Överensstämmelse mellan verklig injekterad mängd (V_{inj}) och beräknad volym (V_{ber}) är inte god, och ligger långt ifrån det kriterium som tidigare använts; $0{,}5<V_{inj}/V_{ber}<2$ (Janson, 1993).

Vid en jämförelse av beräknad mängd injekteringssuspension, med antagna värden på olika faktorer, för de tre sprickplansmodellerna kan en tydlig skillnad utläsas. För skärmparet i det täta berget (skärmar 20 och 21) ger modell III överlägset störst volymsåtgång suspension, därefter modell II och minst åtgång ger modell I.

För skärmparet i det uppspruckna berget (skärmar 23 och 24) ger modell III däremot minst åtgång, modell I därefter och slutligen ger modell II mest volymsåtgång.

Jämförelsen av beräknad åtgång erhållen med de olika modeller är inte intressant med tanke på att instabil suspension använts i detta projekt. Däremot är det av intresse att konstatera att resultatet för sprickplansmodellerna beror av valet av faktorer.

Synpunkter på medel, mätningar och sprickplansmodeller

Injekteringsmedel

För att kunna förutsäga något om injekteringen måste ett stabilt injekteringsmedel användas, som kriterie för stabilitet skall separationen vara maximalt 5% vatten från cementen efter två timmar. Medlen SH 3,0 och MC 1,5 uppfyller således inte kritieriet och risken att filtering samt sedimentation uppstår i sprickorna är stor, vilket medför en ofullständig injektering

Rätt blandningordning av tillsatskomponenter är nödvändig för att uppnå sökt injekteringseffekt. T ex att blanda bentonit med vattnet före övriga komponenter.

Egenskapsmätningar

Skillnader i mätresultat är oundvikliga mellan fältutrustning och viskosimeter. Fältutrustningen ger en god uppfattning om kvaliteten på blandningen, speciellt mellan olika blandningsomgångar i fält. Mycket "blaskiga" blandningar, dvs med mycket låga reologiska egenskaper, är svårmätbara och osäkra både för mätningar med viskosimeter och fältutrustning.

Förslagsvis görs egenskapsbestämningen i laboratorium före injekteringen (med samma blandningsordning som i fält), med viskosimeter och fältutrustning, varefter regelbunden mätning med fältutrustning utföres i fält.

Sprickplansmodellerna

Modellerna förutsätter och kan endast användas för ett stabilt medel, vilket bör vara ett allmänt krav på medlet. Medel med mycket låga flytgränsvärden, som finmalen cement med höga vct-tal och tillsatser av flytmedel, är mycket känsliga att volymsuppskatta (volymen ökar kraftigt exponentiellt vid låga flytgränsvärden).

Modellernas känslighet beror främst på vilken utvärderingsmetod för transmissiviteten som väljs och val av mätningsförfarande för bestämning av flytgränsen. Beroende på utvärderingsmetod kan transmissiviteten variera med en tiopotens. Injekteringsvolymen är omvänt kvadratiskt proportionell mot flytgränsen.

Modell III är mindre känslig för fel antagande av de geologiska parametrarna, produkten av parametrarna är inom intervallet 0,4 till 1,7. Detta förklarar att skillnaden mellan modell I och III ej blir så stor.

Modellernas begränsning till jämförelse av uppmätta volymsvärden av enbart förstahål, måste utvecklas till en jämförelse av hela injekteringsskärmen med någon eventuell korrektion av transmissiviteten och geologin beroende på injekteringspåverkan.

3. SLUTSATSER

Dokumentation

Sammanställningen av geologisk kartering från bergrummen visade huvudsakligen på bra bergkvalitet, dock med partier med svaghetszoner med omvandlad, starkt vittrad röd granit. Den översiktliga presentationen av karteringen omfattar 150 m-avsnitt och utfördes med datorprogrammet Rockware.

Uppföljningen av grundvattennivåerna visade att samtliga brunnar i berggrunden och i jordlagren hade en långsamt avtagande trend. Byggande av undermarksanläggningar i området tycks endast ha påverkat grundvattenytan tillfälligt.

Statistiska parametrar för injekteringen i hela projektet beskrev en mycket skev fördelning, med ett medelvärde större än medianen och med höga värden på standardavvikelse respektive maximum. Sammanfattningsvis konstaterades, för samtliga byggnadsdelar med ett undantag, att kvoten mellan åtgång av cement och cementsuspension låg på ca 1:2,5 (motsvarande ett vct = 2 i medeltal). Undantaget utgjordes av mellanpallen i bergrum 2, där kvoten mellan cement och suspension var ca 1:1. Injekteringen utfördes där till stor del med det lägre vattencementtal (vct = 0,5 – 1,0), som Stråbrukens nya mikrocement skall blandas med.

Tätningsresultatet av den systematiska förinjekteringen var huvudsakligen tillfredsställande. Efterinjektering av lokala inläckage har dock utförts, framförallt för att såvitt möjligt åstadkomma ett torrt framtida klimat i bokmagasinen.

Injekteringsförsök

Resultaten av de inledande hydrauliska testerna visade tydligt hur viktigt det är att vattenförlustmätningar utförs över en tillräckligt lång mättid. Mättiden är bl a avhängig av om hålet konstateras vara vattenfyllt eller inte vid mätningens början. En fullgod hydraulisk bedömning av en bergmassa kräver sannolikt transienta tester; utvärdering enligt Moyé/Lugeon innehåller antaganden om dimensionalitet och influensområde som gör resultaten subjektiva och svårtolkade.

I programmet för planerade forskningsinsatser sammanfattades målsättningen med injekteringsförsöken i tre punkter, varav den första gällde huruvida effektiv, riktad spolning av injekteringshålen före injektering har en avgörande betydelse för inträngningsförmågan för olika cementsorter. Transmissiviteten, utvärderad från vattenförlustmätningar före respektive efter högtrycksspolning med specialmunstycke, ökade som mest i 45% av de spolade hålen (i skärm 21). Slutsatsen blev att ökningen av transmissiviteten, och därmed eventuellt av inträngningsförmågan för cementsuspensionen, i det här projektet inte motiverade det extra arbetet med spolningen.

Punkt två gällde vad injektering med s k Flex Mix-manschett innebär och vilka framtida användningsområden en sådan manschett har. Injektering av polyuretan med Flex Mix-manschetter, för styrning av cementsuspensionen, utfördes vid ett fåtal tillfällen; underlaget var därför för magert för en regelrätt utvärdering.

En Flex Mix-manschett har två kranar, ett inner- respektive ytterrör; vid injektering kan injekteringshålet därför evakueras på luft och stående vatten, vilket är viktigt vid all injektering, men framförallt vid injektering i vertikala hål. Manschetten medger även injektering av två material samtidigt. Om mottryck inte erhålls med cementsuspension, kan polyuretan injekteras i en förmodad vattenförande zon, varvid injekteringen med suspension styrs upp och utbredningen begränsas.

Det övergripande målet med undersökningen sammanfattades i den sista punkten; rörande det optimala injekteringsförfarandet i detta bergbyggnadsprojekt. Svaret är betydelsefullt, inte blott för detta projekt, utan kanske framförallt inför andra projekt med höga täthetskrav. Under planeringen av försöken ställdes frågor angående betydelsen av cementets kornstorlek, lämpligt antal injekteringshål, samt slutligen vattencementtalets inverkan.

En av de viktigaste frågorna inför injekteringsförsöken gällde huruvida kornstorleken på föreskrivet cement var avpassat för att kunna tränga in i och täta sprickorna i berget. Denna del av undersökningen syftade främst till att utröna om användandet av mikrocement skulle optimera injekteringsresultatet i detta projekt.

Resultaten av injekteringsförsöken tyder på att användande av mikrocement hade gjort störst nytta i det mer permeabla berget, dvs i den kraftigt uppspruckna röda graniten. Totala åtgången av cementsuspension i det tätare berget var större vid användning av SH-suspension, jämfört med MC-suspension. Eftersom kärnor för fastställande av suspensionens utbredning inte tagits, kan man inte med säkerhet förorda den ena eller andra cementsorten. Möjligen kan användande av MC-cement förordas jämfört med SH-cement, särskilt om den senares utbredning varit mycket stor (dvs onödigt mycket berg har tätats). Argumentet härför skulle då vara att fyllnaden av sprickorna kan bli bättre på grund av det lägre vattencementtalet.

Vattenförlustmätningen med lång enkelmanschett visade på att injektering av föregående skärm upp till 9 m framför stuff uppenbarligen påverkat bergets permeabilitet, eftersom merparten av vattenförlusterna låg i änden av de undersökta hålen. Detta förhållande gällde oavsett om injekteringen av föregående skärm huvudsakligen utförts med SH-cement eller mikrocementen Mikrodur P-F, och oavsett om berget i föregående skärm varit av den täta eller av den permeabla typen.

På basis av ovanstående är därför en rimlig slutsats att i det tätare berget hade valet av mikrocement framför SH-cement inverkat mindre på tätningsresultatet, jämfört med om mikrocement valts istället för SH-cement i det mer uppspruckna berget.

En annan intressant fråga var om antalet hål var befogat. Den konservativa designfilosofin, baserad på ett stokastiskt synsätt, syftade till att minimera risken att hålen inte skulle träffa någon vattenförande zon.

Ett alternativ till den täta hålsättningen kunde varit utförande med s k "split spacing", dvs en tätare placering av hålen efter en första injekteringsomgång (som visar på var ytterligare injektering krävs), i kombination med en beredskap för effektiv efterinjektering om förekomst av singulära hål förorsakat problem med vatteninläckning.

Förekomsten av s k "singulära hål", definierat som hål med en åtgång av cementsuspension större än 100 liter (ca 6 lit/Li), presenteras i avsnitt 2.1.3. Med tanke på split spacing är antalet singulära hål *utan* konstaterat samband till andra hål naturligtvis av störst intresse; dessa var i medeltal i transporttunneln 2 - 3 st, i bergrum 1 nära 2 st och i bergrum 2 bara 1 st per skärm. Huruvida antalet singulära hål motiverar det stora antalet injekteringshål är en bedömningsfråga av komplex art som, förutom injekteringstekniska frågor, även omfattar bl a drivningstekniska aspekter.

Slutligen ställdes frågan huruvida SH-injektering som startar med vattencementtalet 3,0, skulle medföra oönskade sedimenterings- och filtreringseffekter.

Reologiska egenskaper är svåra att bestämma för blandningar med höga vattencementtal. Skillnader är oundvikliga vid egenskapsmätningar med fältutrustning respektive rotationsviskosimeter. Mätningarna av separationen för suspensionerna SH 3,0 och MC 1,5 visade att medlen inte uppfyllde kriteriet för ett stabilt bruk. Kriteriet är att maximalt 5% vatten skall ha separerat från suspensionen efter 2 timmar.

Man bör vara medveten om att risken för borttransport respektive sedimentation av SH-cementsuspension med vct = 3,0 är större än vid en suspension med större stagnationskoefficient och stabilitet (Håkansson et al., 1992). Zebovitz et al (1989) fastslår efter laboratorieförsök i sand att suspensioner av mer finmald cement har bättre flödesegenskaper, samt bättre stabilitet mot sedimentation, än suspensioner av vanlig Portlandcement. Likaså erhålls lättare s k "bridging-effekt", dvs överbryggning av cementkorn framför sprickköppning, ju större cementkornen är.

För att med sprickplansmodeller kunna förutsäga något om volymsåtgången under injekteringen, måste stabila injekteringsmedel användas, detta villkor var alltså inte uppfyllt för medlen SH 3,0 och MC 1,5.

Sprickplansmodellernas känslighet beror främst av vilken utvärderingsmetod för transmissiviteten som väljs samt vilket mätningsförfarande för bestämning av flytgränsen som används. Modellernas begränsning till jämförelse av uppmätta volymvärden i förstahål måste utvecklas till en jämförelse av hela injekteringsskärmen.

REFERENSER

Borchardt P, 1993: Aktive Eindringung, eine neue Dimension in der Injektionstechnik. Praktische Beispiele für die Nachinjektion mit Feinstbindemittel und Polyurethan. Conference proceedings "Grouting in rock and concrete", pp 131-139, editor Richard Widmann, Salzburg 1993, ISBN 90 5410 350 7.

Carlsson L, Gustafson G, 1991: Provpumpning som geohydrologisk undersöknings-metodik. Reviderad utgåva av R41:1984. Statens råd för byggforskning, rapport R66:1991, ISBN 91-540-5391-9, Stockholm.

Carlsson A, Olsson T, 1986: Large Scale In-Situ Tests on Stress and Water Flow Relationships in Fractured Rock, Vattenfall R,D & D 1986.

Christiansson R, Stenberg L, 1991: Manual for field work in the tunnel, SKB, Progress Report 25-91-10, Stockholm.

Follin S, 1992: On the interpretation of double-packer tests in heterogenous porous media: Numerical simulations using the stochastic continuum analogue, SKB Technical Report 92-36, Lund.

Gustafson G, 1986: Geohydrologiska förundersökningar i berg. Bakgrund - metodik - användning, BeFo 84:1/86, Stiftelsen Bergteknisk Forskning, Stockholm.

He J, 1994: Rock mechanical responses during the excavation of rock caverns at Royal Library, Stockholm. Institutionen för geoteknik, Chalmers tekniska högskola, institutionsrapport 1995, Göteborg.

Håkansson U, 1993: Rheology of Fresh Cement-Based Grouts, Department of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Report No. 93/11, ISSN 1102-1861, Stockholm.

Håkansson U, Hässler L, 1993: The influence of flow geometry on the interpretation of Lugeon tests and the choice of grout material and grouting method. Conference proceedings "Grouting in rock and concrete", pp 417-421, editor Richard Widmann, Salzburg 1993, ISBN 90 5410 350 7.

Håkansson U, Hässler L, Stille H, 1992: Rheological Properties of Microfine Cement Grouts with Additives. Conference proceedings "Grouting, soil improvement and geosynthetics", pp 551-563, editors Borden, Holtz and Juran, New Orleans 1992, ISBN 0 87262 865 5.

Hässler L, 1991: Grouting of Rock - Simulation and Classification, Department of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, ISBN 91-7170-060-9, Stockholm.

Janson T, 1993: Injektering i sprickplan - Äspö-tunneln. Avd för Jord- och Bergmekanik, Kungliga tekniska högskolan, rapport nr 93/10, ISSN 1102-1861, Stockholm.

Klasson H, Ljunggren C, 1992: Bergspänningsmätningar i borrhål BSM1, Humlegården - Slutrapport. RENCO, Rock Engineering Consultants, Luleå.

Lindblom U, 1992: Grundvattensituation vid Kungliga biblioteket med omgivning. GECON, Geotechnical Engineering Consultants, Göteborg.

Lindblom U, 1993: Efterinjektering av bergrum 1. Kungliga biblioteket, Humlegården - Stockholm. Uppdrag diarienr S 43-1037-87. GECON, Geotechnical Engineering Consultants, Göteborg.

Lindblom U, 1994: Grundvattenobservationer februari 1994. Kungliga biblioteket, Humlegården. Grundvattengruppen, Statens Fastighetsverk, Stockholm Vatten. GECON, Geotechnical Engineering Consultants, Göteborg.

Manell G, 1994: Utsprängning av bergrum under Kungliga biblioteket i Stockholm, Diskussionsmöte BK-94, ISSN 0281-9783, Bergsprängningskommittén, Stockholm.

Morfeldt D, 1993: Geologisk korrelationsritning för GECON ang Kungliga biblioteket. Ritning 022, Stockholm.

SMHI, Väder och Vatten, januari 1989 – december 1993. ISSN 0281-9619, Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, Norrköping.

Söder C-O, 1994: Evaluation of the geohydrological characteristics of the rock mass around cavern A at the Röda Sten Rock Laboratory, RSRL, report B94:2, Göteborg.

Zebovitz S, Atmantzidis DK, Krizek RJ, 1989: Injection of Fine Sands with Very Fine Cement Grout. Journal of Geotechnical Engineering - ASCE, vol 115, issue 12, pp 1717-1733, ISSN 0733-9410.

BILAGOR

		antal sidor
1.	Karteringskoder- och protokoll	2
2.	Fullständig sammanställning av geologisk kartering	12
3.	Sammanställning av grundvattenmätningar	8
4.	Exempel på injekteringsprotokoll	2
5.	Komplett statistisk presentation av åtgång injekteringsmaterial	5
6.	Presentation av åtgång injekteringsmaterial för botteninjektering	2
7.	Resultat vattenförlustmätningar med lång enkelmanschett	4
8.	Jämförelse transmissivitet - olika utvärderingsalternativ	2
9.	Jämförelse transmissivitet - före respektive efter injektering	2
10.	Resultat av sprickplansmodeller	3

I karteringsprotokollet ingår bl a följande kodade parametrar:

BERGARTSBESKRIVNING

Bergart:

1. Gnejs
2. Granit
3. Gnejsgranit
4. Pegmatit
5. Diabas

Kornstorlek:

1. Fin <1 mm
2. Medium 1-5 mm
3. Grov >5 mm

Textur:

1. Enhetlig
2. Porfyritisk
3. Slirig
4. Oregelbunden

Vittring:

1. Ingen
2. Någon
3. Medium
4. Kraftig
5. Total

SPRICK- OCH KROSSZONER

Typ:

1. Blockig
2. Lamellär
3. Oregelbunden

Bredd:

1. Fin <1 mm
2. Medium 1-5 mm
3. Grov >5 mm

Frekvens:

Avstånd i dm
mellan sprickor

SPRICKA

Form:

1. Plan
2. Undulerande (ampl. >10 cm)
3. Oregelbunden (ampl. >0.1· sprickläng d)

Typ:

1. Öppen
2. Belagd
3. Fylld
4. Sluten

Yta:

1. Rå
2. Jämn
3. "Slickenside"

Nedan presenteras ett exempel på ett karteringsprotokoll (figur 1.1).

KUNGLIA BIBLIOTEKET
BERGKARTERING KOD 6
Protokoll

Nr	12
Datum	921228
Sekt.	135 – 150
Utf. av	[illegible]

BERGARTSBESKRIVNING

Id	Bergart	Färg	Kornstr	Textur	Vittring	Anm.
I	Gnejs	Grå	2	3		
II	Gnejs	Sv.	2	1		Mörk, glimmerik, Genombruten av gång (P, F)
III	Gnejs	Vit	2,3	anm.		Ögongnejs (P)
IV	Granit	Grå	2	1		
V	Granit	Röd	2	1		

SPRICKA

Nr	Strykn	Stupn.	Form	Typ	Bredd	Fyll/Bel	Yta	Vittring	Anm.
1	10	20 V	1	1	2		2		
2	~300	~20 S	1	3	2	Inj.	2		
3	~230	~35 Ö	2		2	Inj.	1		kontakt I • II
4	130	~80 N	1	3	2	Vit			tak
5	~330	~20 S	1	3	2	kal, Inj	1	2	Rodnad kring
6	~140	N	2				1		tak
7	~310	S	2				1		–"–
8	~210	90	1	4	1		1		
9	90	70 N	1	2,3	2	kl, ka, I	2		Markant spr. pl.
10	250	85 SO	1	2,3	2	kl, ka, I	2		
11	~0	~15 V	2	3	2	kal	1		
12	~340	~15 V	1	3	2	kal	2		~2 cm rodnad kring i granit
13	~180	80 Ö	1	3	2	kal	1		
14	140	80 NÖ	1	3	2	kal			tak

SPRICK - OCH KROSSZONER

Nr	Typ	Vidd	Strykn.	Stupn.	Bredd	Fyll/Bel	Frekv.	Vittring	Anm.
1	3	2 m	~70	~90	1,2	kl	0,5	2	

VATTEN

Karta	Anm.
X	Enligt separat karta

16-Nov-92

Bilaga 2 är en fullständig sammanställning av den geologiska karteringen för bergrummen under Kungliga Biblioteket och är uppdelad enligt följande:

BYGGNADSDEL	SIDA	INNEHÅLL
Transporttunnel - sektion 0/000-0/155	1TR1	Bergarters och sprickors fördelning, samt sprickorientering
— " —	1TR2	Förinjektering och fuktutbredning
Transporttunnel - sektion 0/155-0/275	2TR1	Bergarters och sprickors fördelning, samt sprickorientering
— " —	2TR2	Förinjektering och fuktutbredning
Bergrum 1 - sektion 0/000-0/155	1BR1	Bergarters och sprickors fördelning
— " —	1BR2	Sprickorientering
— " —	1BR3	Förinjektering och fuktutbredning
Bergrum 2 - sektion 0/000-0/155	2BR1	Bergarters och sprickors fördelning
— " —	2BR2	Sprickorientering
— " —	2BR3	Förinjektering och fuktutbredning

Karteringspresentationen var till formen inspirerad av motsvarande från Äspölaboratoriet, som bl a presenteras i SKB Annual Report (1991). Presentationen av den geologiska karteringen vid Kungliga Biblioteket har huvudsakligen utförts som ett examensarbete av Robert Colliander. Arbetet har genomförts med hjälp av datorprogrammet Rockware.

Observera att examensarbetet finns att beställa för de som är intresserade att läsa om vilka val som gjordes inför presentationen av geologiska karteringen, samt studera den i full skala (A3) och färg. Den information som faller bort i sammanställningen på de följande sidorna, på grund av att de är svartvita, är framförallt den röda gnejsen respektive graniten.

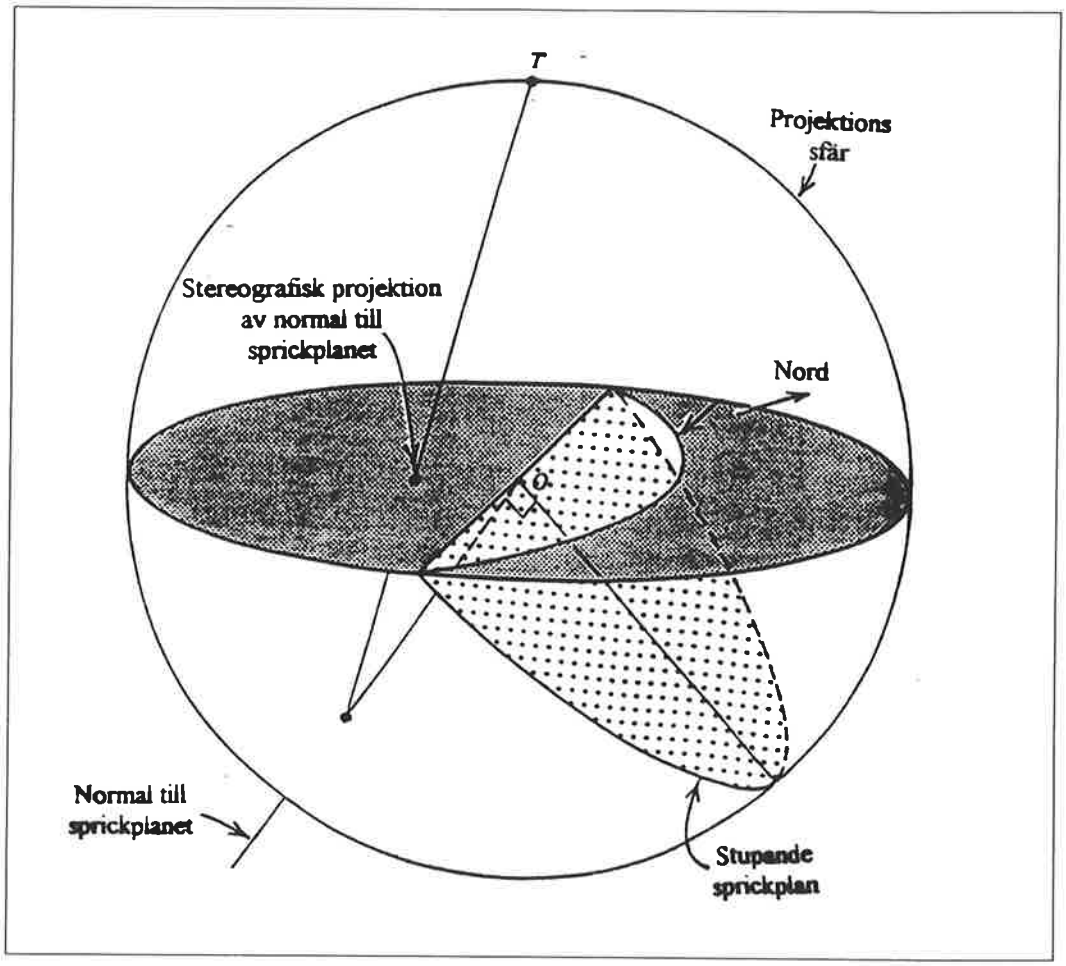
Observera även att sammanställningen av injekteringen (medel-, max - och minvärden) för bergrummen endast omfattar injekteringen av galleriet. Motsvarande sammanställning av injekteringen av mellanpallen finns i avsnitt 1.3.

Stereografisk projektion av sprickplan

Förutom presentation av sprickornas orientering med sprickrosdiagram, redovisas för bergrummen även tredimensionella sprickorienteringsdata genom stereografisk projektion. Detta innebär att sprickplanets strykning och stupning redovisas samtidigt i ett tvådimensionellt diagram.

Figuren nedan förklarar principerna för den stereografiska projektionen. Ett sprickplan (prickat) orienterar genom mittpunkten *O* i en sfär. Från mittpunkten dras en normal (dvs en från sprickplanet vinkelrät linje) nedåt, tills den tangerar sfären. Denna punkt projiceras sedan upp mot horisontalplanet (den mörka ytan), där den avsätts som en punkt. Det är detta horisontalplan, med alla sprickplan representerade som punkter, som sedan presenteras i stereonätsdiagrammet.

I denna rapport redovisas punkterna med hjälp av konturer, dvs ju fler punkter desto tätare konturer.



Figur 2.1 Stereografisk projektion av sprickplan

ROYAL LIBRARY STOCKHOLM

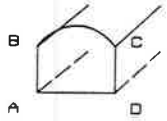
Overview of documentation

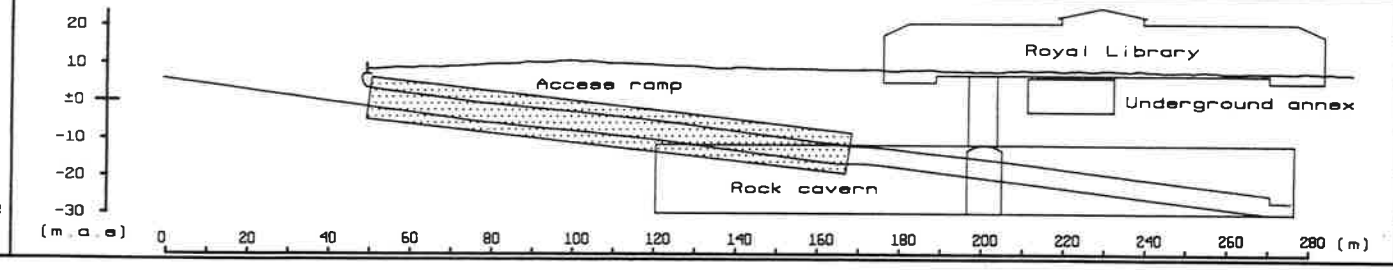
Geology - 1TR1

Access ramp

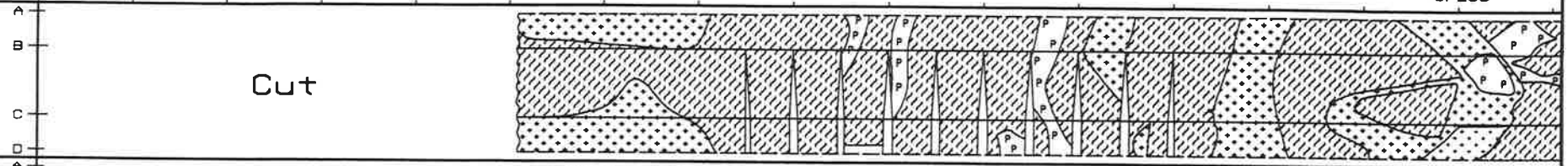
0/0 - 0/155

Tunnel profile

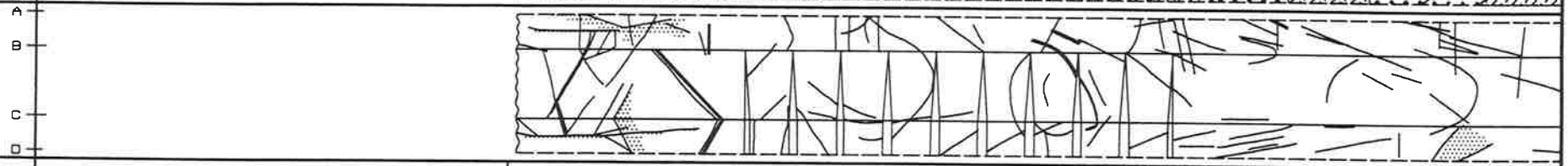


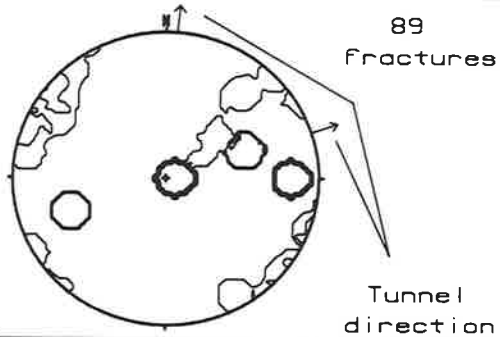
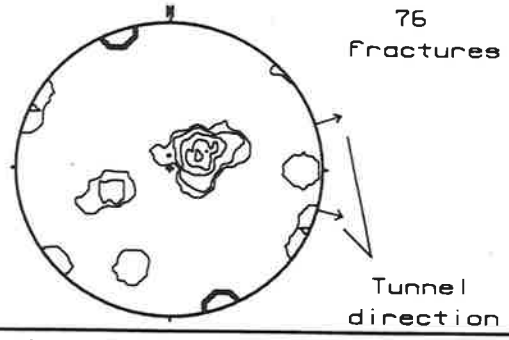


Lithology



Fractures and fracture zones



Fracture frequency		0.35 m/m^2	0.34 m/m^2
Fracture orientation stereonet *			
Fractures minerals	* Detailed expl. see sketch 1BR2	Ca: 51% Cl: 31% Fe: 2% Grout: -	Ca: 60% Cl: 20% Fe: 9% Grout: 11%

Notes

Legend: Granite: Dark - grey; Granite: Red; Pegmatite; Gneiss: Grey and veins; Gneiss: Augen; Fracture zones

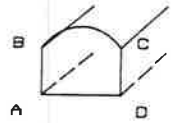
ROYAL LIBRARY STOCKHOLM

Overview of documentation

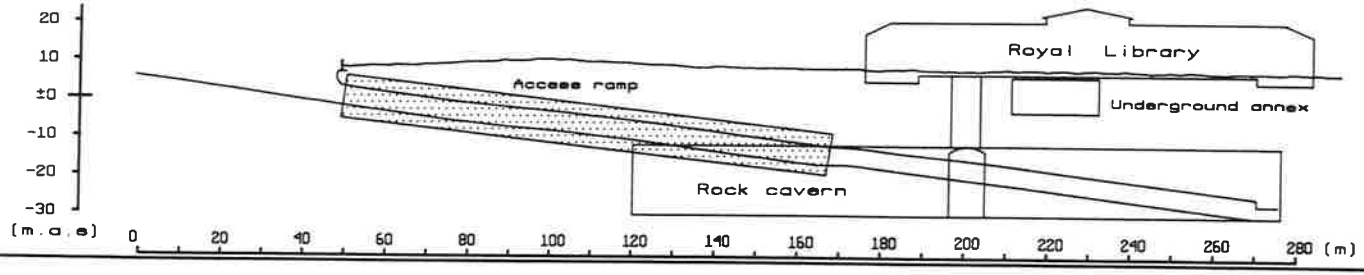
Grouting - 1TR2

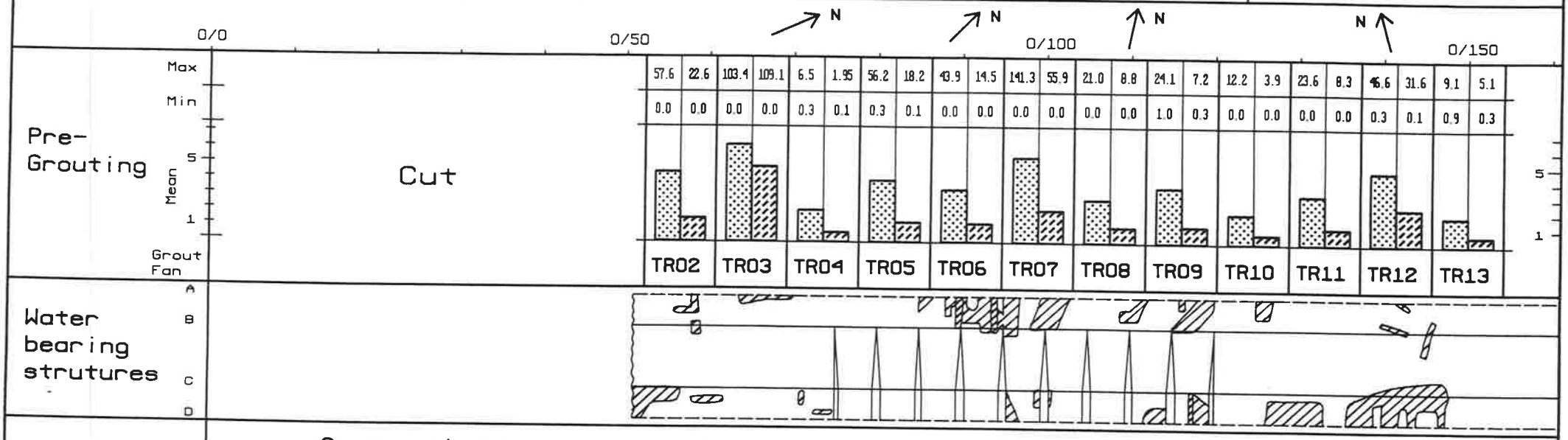
Access ramp

0/0 - 0/150



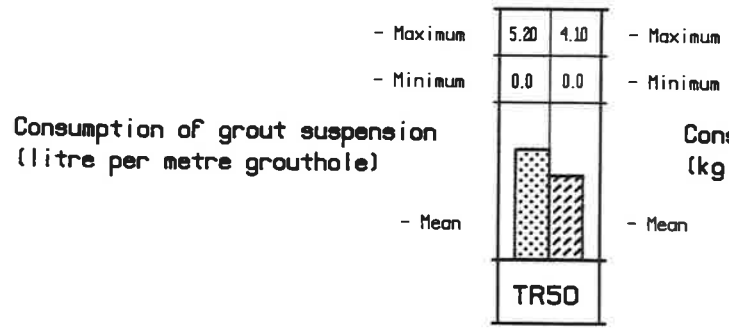
Tunnel profile





Notes

Systematic pre-grouting with cement suspension



Grout fan location

ROYAL LIBRARY STOCKHOLM

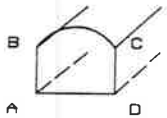
Overview of documentation

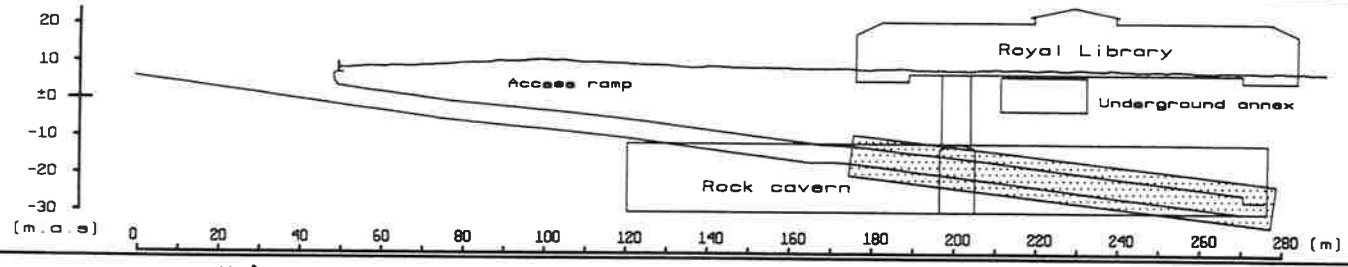
Geology - 2TR1

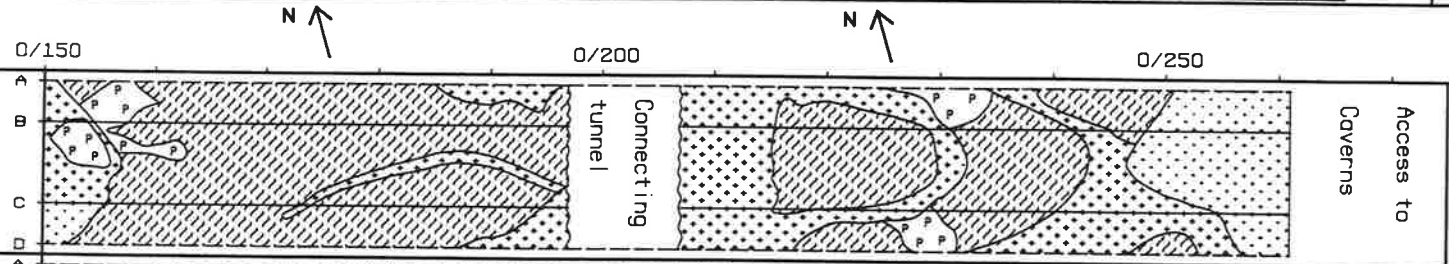
Access ramp

0/150 - 0/261

Tunnel profile

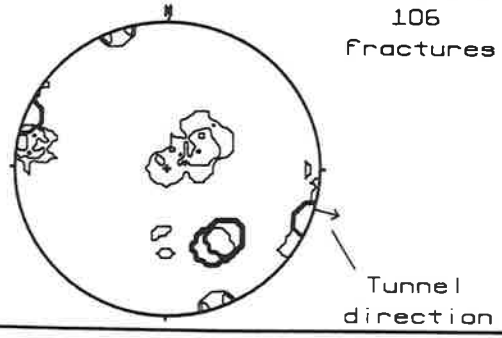
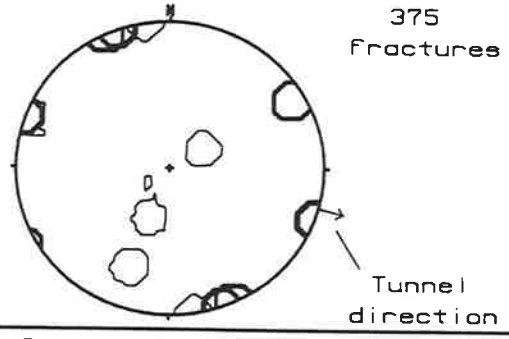






Lithology

Fractures and fracture zones

Fracture frequency	0.35 m/m²	0.33 m/m²
Fracture orientation stereonet *	 106 fractures; Tunnel direction	 375 fractures; Tunnel direction
Fractures minerals	Ca: 47% Cl: 15% Fe: - Grout: 4%	Ca: 83% Cl: 19% Fe: 3% Grout: 43%

* Detailed expl. see sketch 1BR2

Notes

Legend: Granite: Dark - grey; Gneiss: Grey and veins; Granite: Red; Gneiss: Augen; Pegmatite; Fracture zones

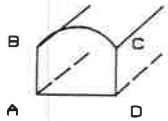
ROYAL LIBRARY STOCKHOLM

Overview of documentation

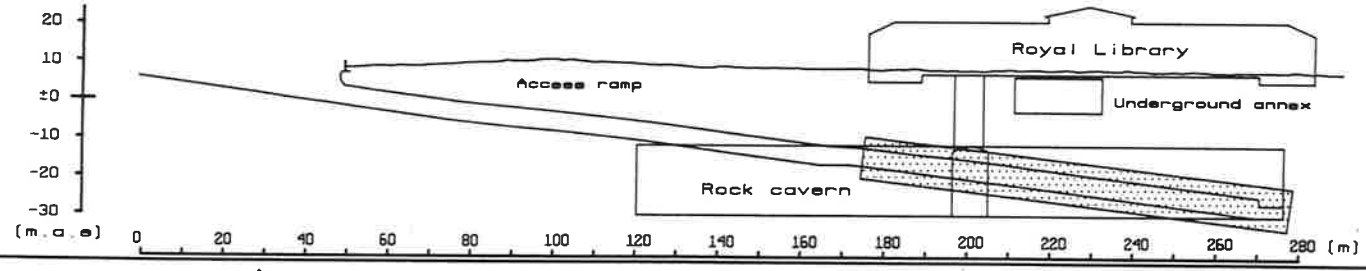
Grouting - 2TR2

Access ramp

0/150 - 0/275



Tunnel profile

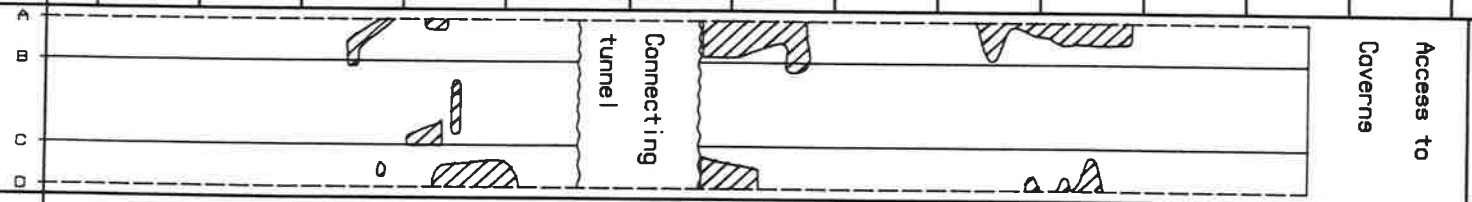


Pre-Grouting

Grout Fan	TR14	TR15	TR16	TR17	TR18	TR19	TR20	TR21	TR22	TR23	TR24	TR25	TR26
Max	16.2	10.9	6.7	2.0	24.5	16.1	76.3	35.9	100.3	39.2	9.2	4.4	16.6	9.1	38.5	13.9	35.3	18.9	17.5	9.8	26.1	16.9	3.8	1.1	4.6	1.4
Min	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.1	1.8	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	1.8	0.5	0.0	0.0

Mean: 5, 1

Water bearing strutures



Notes

Systematic pre-grouting with cement suspension

	TR50	
- Maximum	5.20	4.10
- Minimum	0.0	0.0
- Mean		

Consumption of grout suspension (litre per metre grouthole)

Consumption of grouting cement (kg per metre grouthole)

Grout fan location

Moisture

Drip

Running

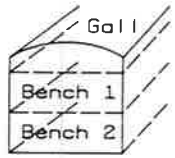
ROYAL LIBRARY STOCKHOLM

Overview of documentation

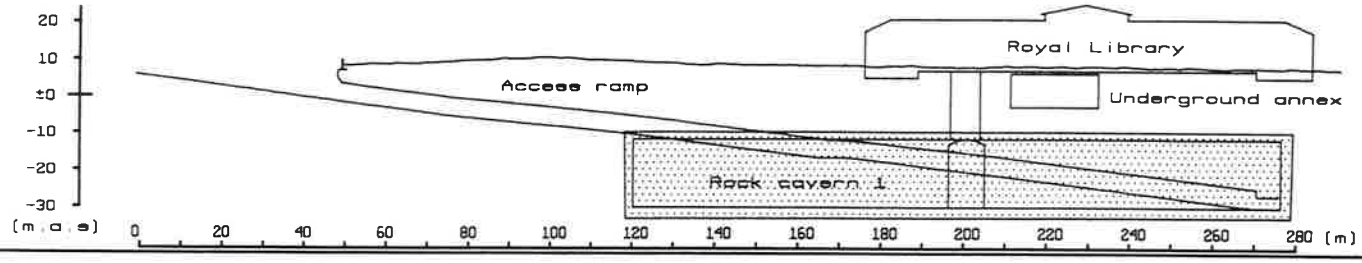
Geology - 1BR1

Rock cavern 1

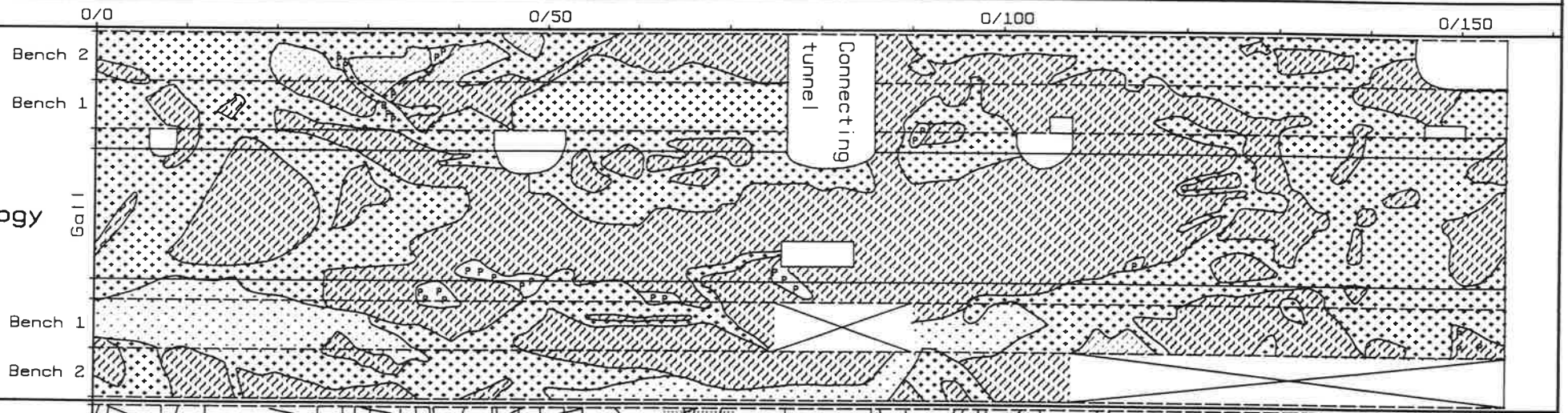
0/0 - 0/155



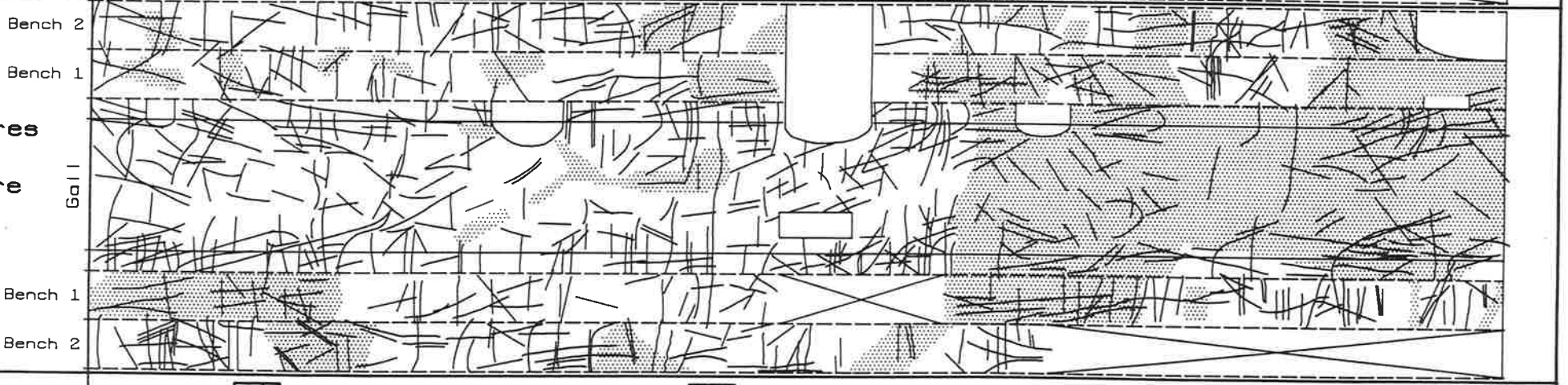
Cavern profile



Lithology



Fractures and fracture zones



Notes

Legend:

- Granite: Dark - grey
- Granite: Red
- Pegmatite
- Gneiss: Grey and veins
- Gneiss: Augen
- Fracture zones

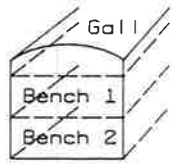
ROYAL LIBRARY STOCKHOLM

Overview of documentation

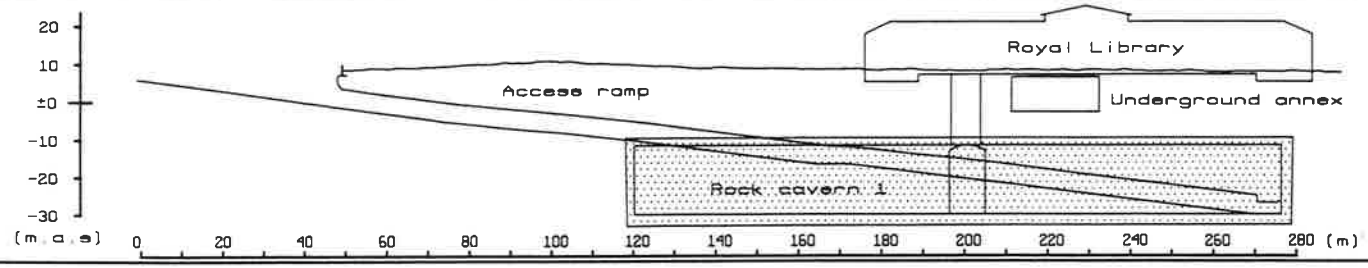
Geology - 1BR2

Rock cavern 1

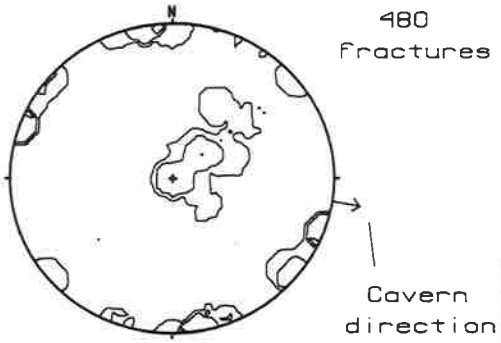
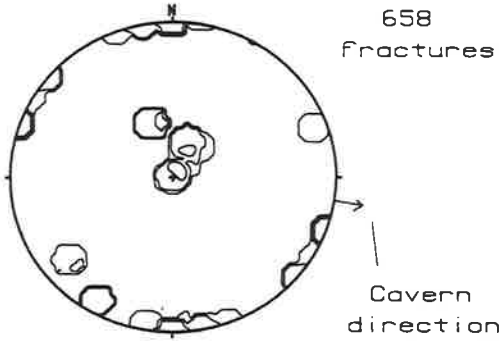
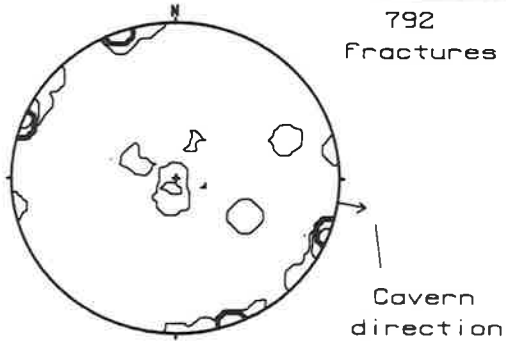
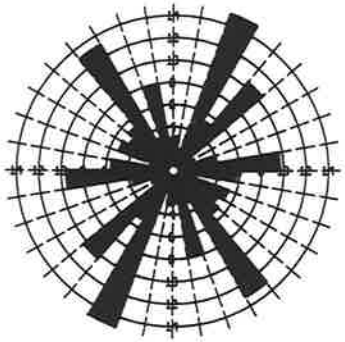
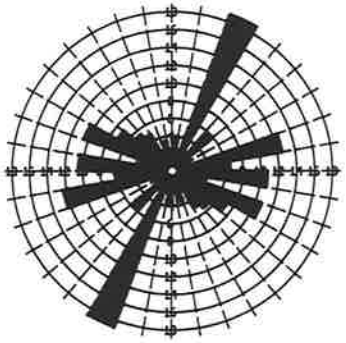
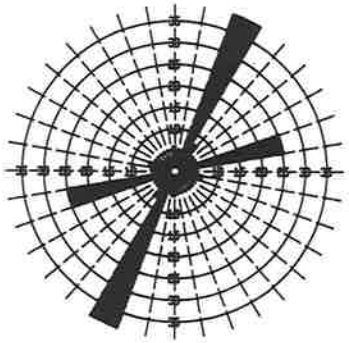
0/0 - 0/155



Cavern profile



0/0 0/50 0/100 0/150

Fracture frequency	0.67 m/m²	0.57 m/m²	0.48 m/m²
Fracture orientation stereonet*	 480 fractures; Cavern direction	 658 fractures; Cavern direction	 792 fractures; Cavern direction
Fracture orientation rose diagram			
Fracture minerals	Ca: 60% Cl: 17% Fe: 0% Grout: 29%	Ca: 72% Cl: 15% Fe: 0.5% Grout: 45%	Ca: 69% Cl: 23% Fe: 17% Grout: 46%

Notes

* Projection: Schmidt net

Type: Step-funktion: Counting stations incremented by integers

Units: Percent: Density values plotted as percentages

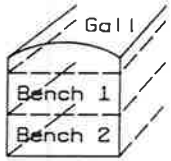
ROYAL LIBRARY STOCKHOLM

Overview of documentation

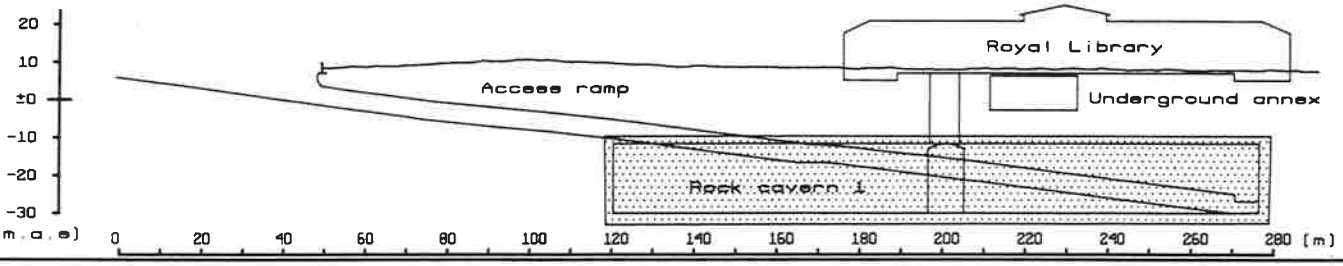
Grouting - 1BR3

Rock cavern 1

0/0 - 0/155



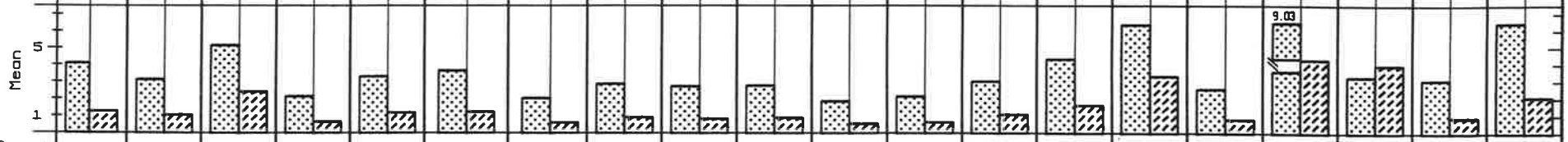
Cavern profile



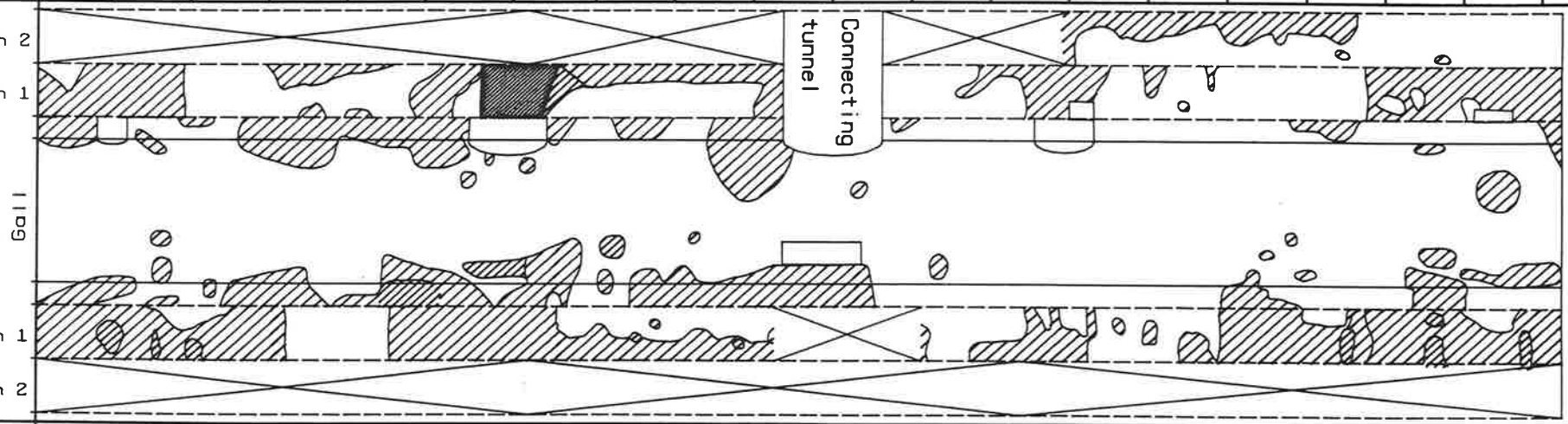
Pre-Grouting

0/0 0/50 0/100 0/150

Grout Fan	1G08	1G07	1G06	1G05	1G04	1G03	1G1-2	1G09	1G10	1G11	1G12	1G13	1G14	1G15	1G16	1G17	1G18	1G19	1G20	1G22A
Max	18.7	7.1	19.4	7.6	47.6	27.9	5.3	2.7	28.9	11.0	36.0	13.6	6.2	1.9	39.7	14.4	28.3	9.3	16.7	6.2	2.2	0.7	4.8	1.4	30.5	15.3	16.2	6.2	76.6	53.0	12.2	5.2	71.0	42.6	26.0	31.5	7.9	2.4	53.2	26.5
Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	0.6	1.4	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



Water-bearing structures



Notes

Systematic pre-grouting with cement suspension of the gallery

Consumption of grout suspension (litre per metre grouthole)

- Maximum
- Minimum
- Mean

Consumption of grouting cement (kg per metre grouthole)

- Maximum 5.20 4.10
- Minimum 0.0 0.0
- Mean

TR50 Grout fan location

Moisture

Drip

Running

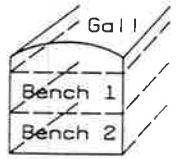
ROYAL LIBRARY STOCKHOLM

Overview of documentation

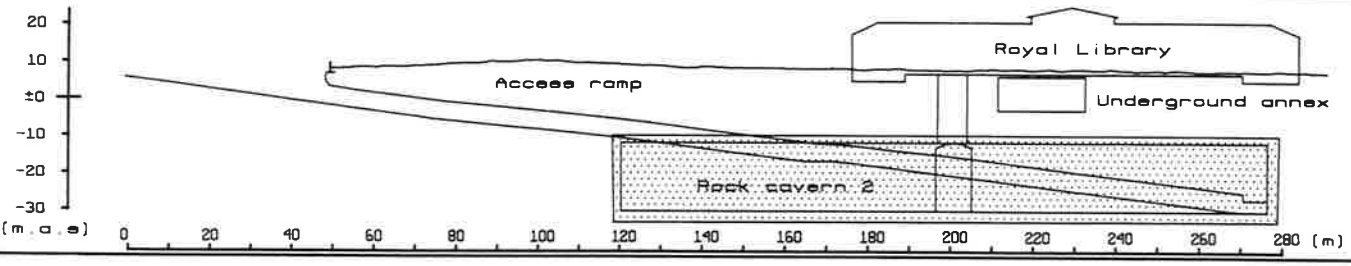
Geology - 2BR1

Rock cavern 2

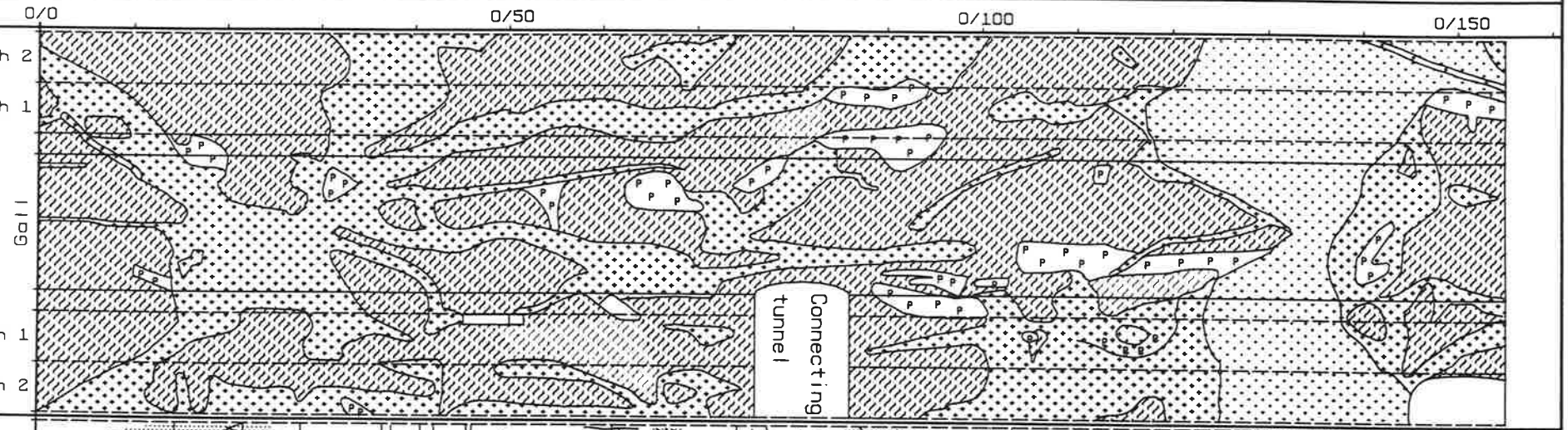
0/0 - 0/155



Cavern profile



Lithology



Fractures and fracture zones

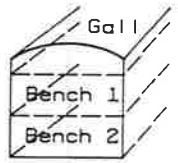
Notes

Legend:

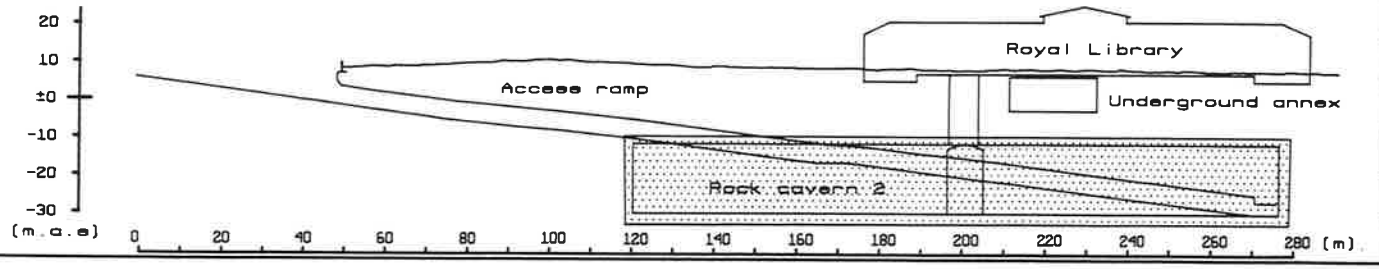
- Granite: Dark - grey
- Granite: Red
- Pegmatite
- Gneiss: Grey and veins
- Gneiss: Augen
- Fracture zones

ROYAL LIBRARY STOCKHOLM

Overview of documentation



Cavern profile

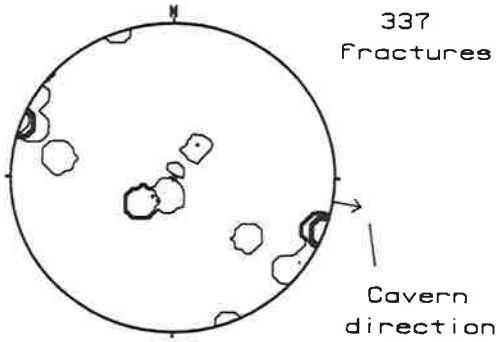
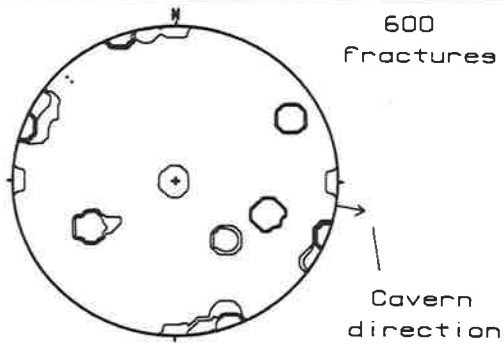
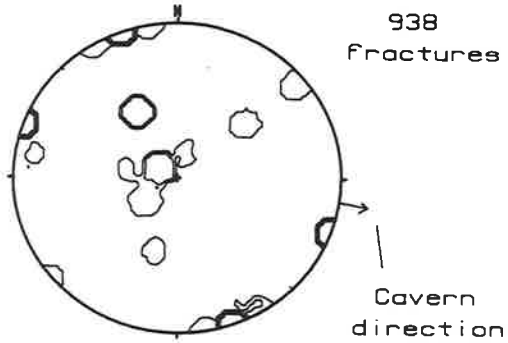
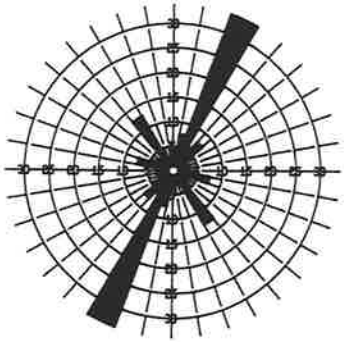
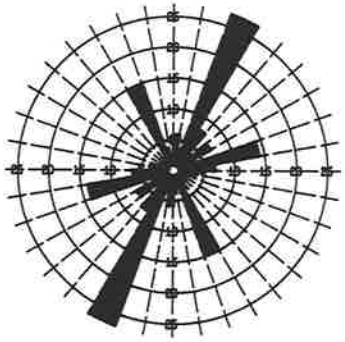
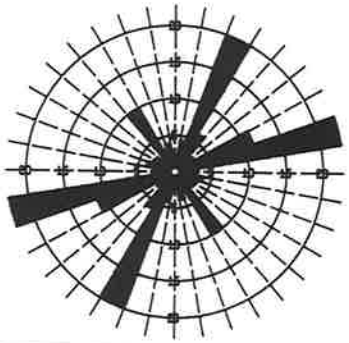


Geology - 2BR2

Rock cavern 2

0/0 - 0/155

0/0 0/50 0/100 0/150

Fracture frequency	0.40 m/m^2	0.47 m/m^2	0.42 m/m^2
Fracture orientation (stereonet) *			
Fracture orientation (rose diagram)			
Fracture minerals	Ca: 65% Cl: 16% Fe: 0% Grout: 22%	Ca: 65% Cl: 14% Fe: 0.5% Grout: 34%	Ca: 76% Cl: 20% Fe: 20% Grout: 42%
Notes	* Projection: Schmidt net Type: Step-Funktion: Counting stations incremented by integers Units: Percent: Density values plotted as percentages		

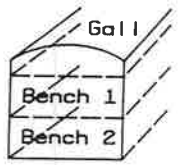
ROYAL LIBRARY STOCKHOLM

Overview of documentation

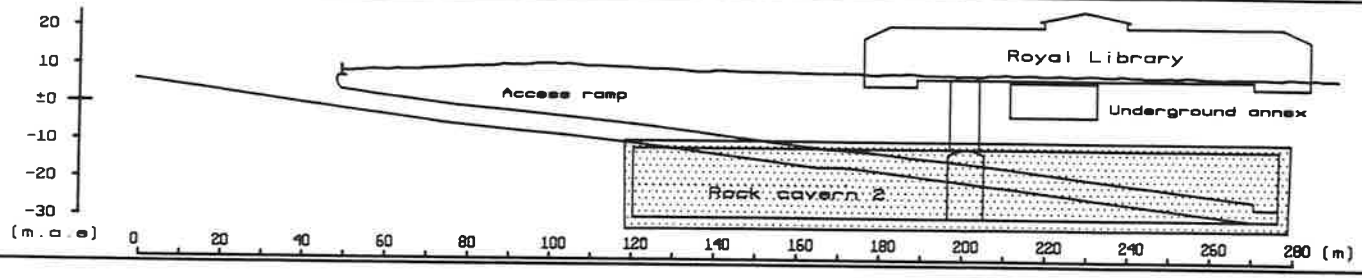
Grouting - 2BR3

Rock cavern 2

0/0 - 0/155

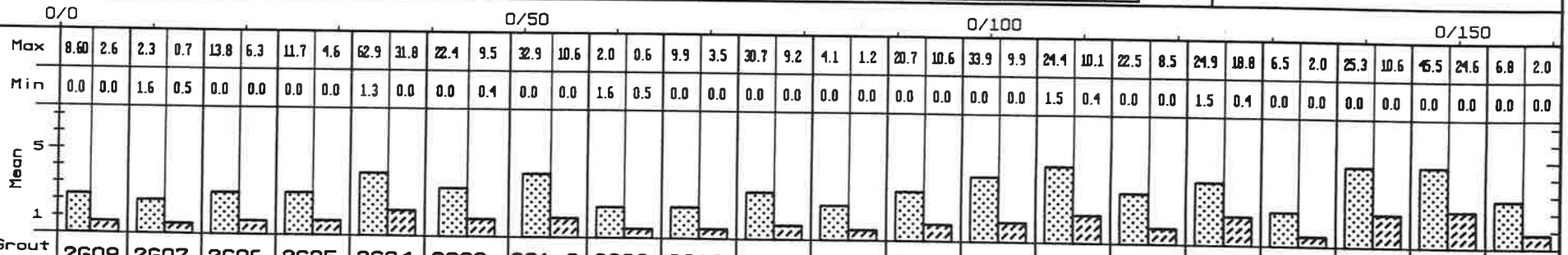


Cavern profile

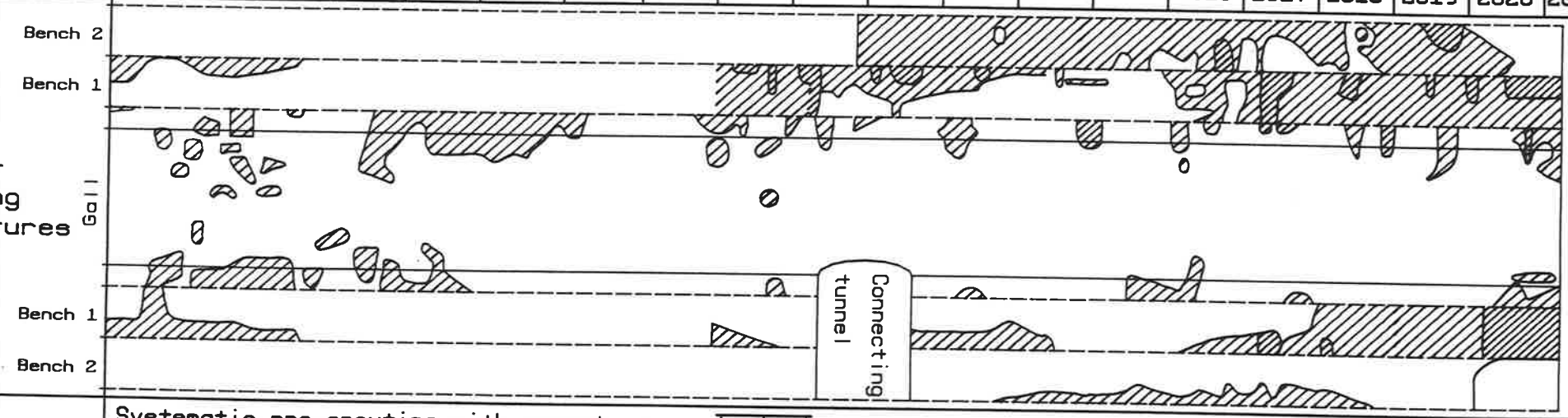


Pre-Grouting

Grout Fan	Max	Min
2G08	8.60	0.0
2G07	2.6	0.0
2G06	2.3	1.6
2G05	0.7	0.5
2G04	13.8	0.0
2G03	6.3	0.0
2G1-2	11.7	0.0
2G09	4.6	0.0
2G10	62.9	1.3
2G11	31.8	0.0
2G12	22.4	0.0
2G13	9.5	0.4
2G14	32.9	0.0
2G15	10.6	0.0
2G16	2.0	1.6
2G17	0.6	0.5
2G18	9.9	0.0
2G19	3.5	0.0
2G20	30.7	0.0
2G22A	9.2	0.0
	4.1	0.0
	1.2	0.0
	20.7	0.0
	10.6	0.0
	33.9	0.0
	9.9	0.0
	24.4	1.5
	10.1	0.4
	22.5	0.0
	8.5	0.0
	24.9	1.5
	18.8	0.4
	6.5	0.0
	2.0	0.0
	25.3	0.0
	10.6	0.0
	16.5	0.0
	24.6	0.0
	6.8	0.0
	2.0	0.0



Water-bearing structures

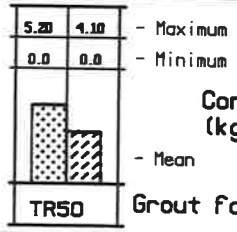


Notes

Systematic pre-grouting with cement suspension of the gallery

Consumption of grout suspension (litre per metre grouthole)

Consumption of grouting cement (kg per metre grouthole)



Grout fan location

Moisture

Drip

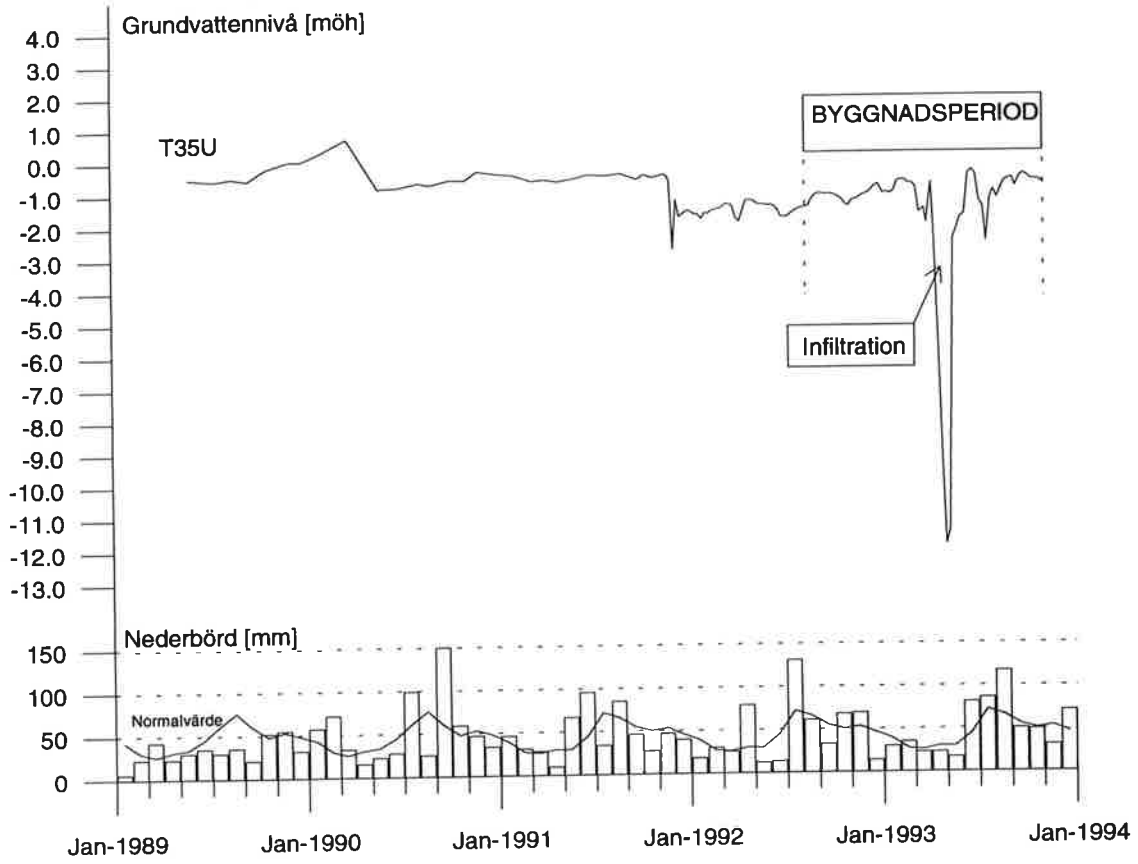
Running

Bilaga 3 är en fullständig sammanställning av uppföljningen av mätningar av grundvattennivån kring bergrummen under Kungliga Biblioteket, mellan juni 1989 och november 1993, och är uppdelad i tre delar enligt följande:

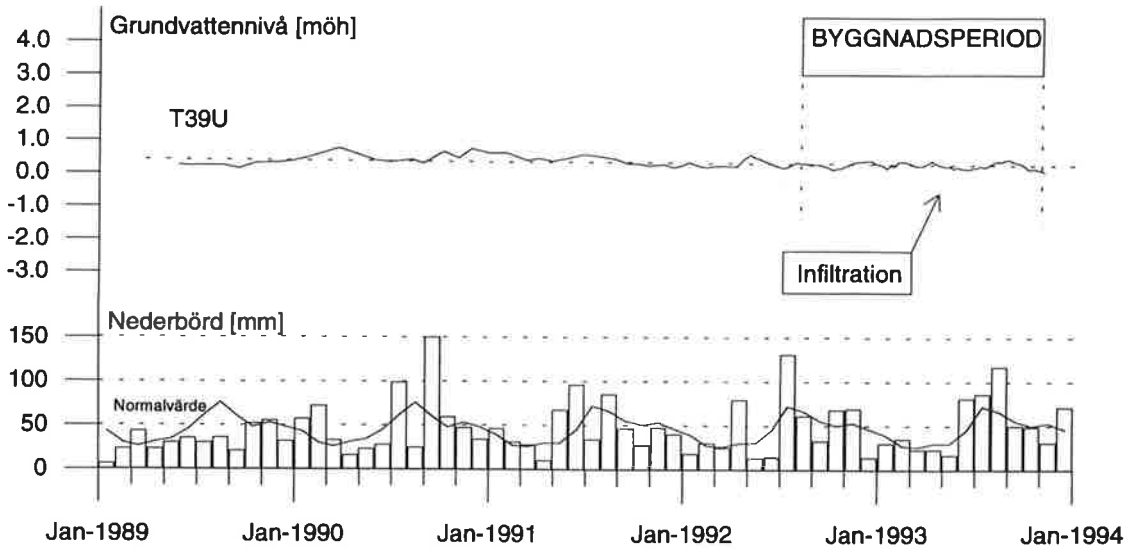
Typ av grundvattenobservationshål:	Hålbeteckning:
- grundvattenyta i berggrunden	T35U, T39U, T40U, T41U, T42U, T43U, T44U, T46U
- undre grundvattenyta i jordlagren	219U, 222U, 445U
- övre grundvattenyta i jordlagren	436Ö, 439Ö, 542Ö

Observera att eventuella kommentarer kring resultaten av grundvattenmätningarna inte ingår i denna bilaga utan presenteras i avsnitt 1.1. Nederbördsobservationerna är hämtade ur Väder & Vatten (SMHI), klimatstation 'Stockholm' vid Observatoriekullen.

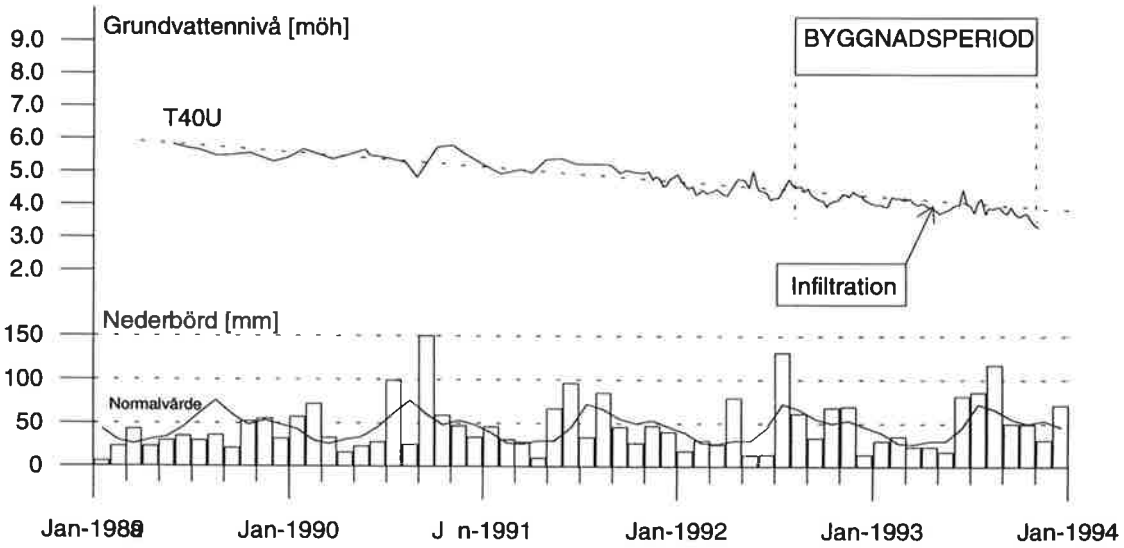
Grundvattenyta i berggrunden



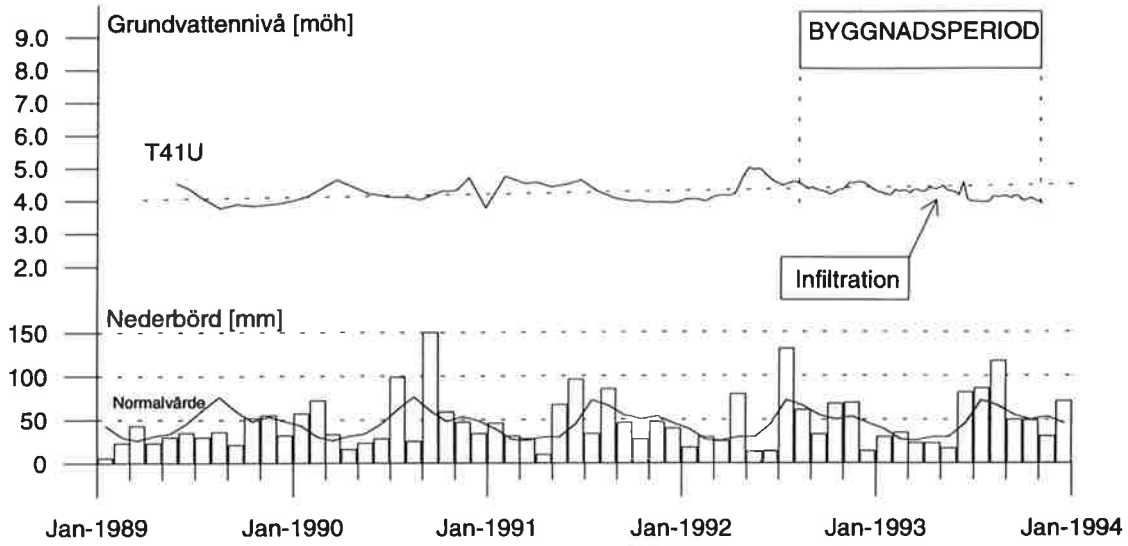
Figur 3.1 Grundvattenvariation i T35U, samt nederbördsobservationer



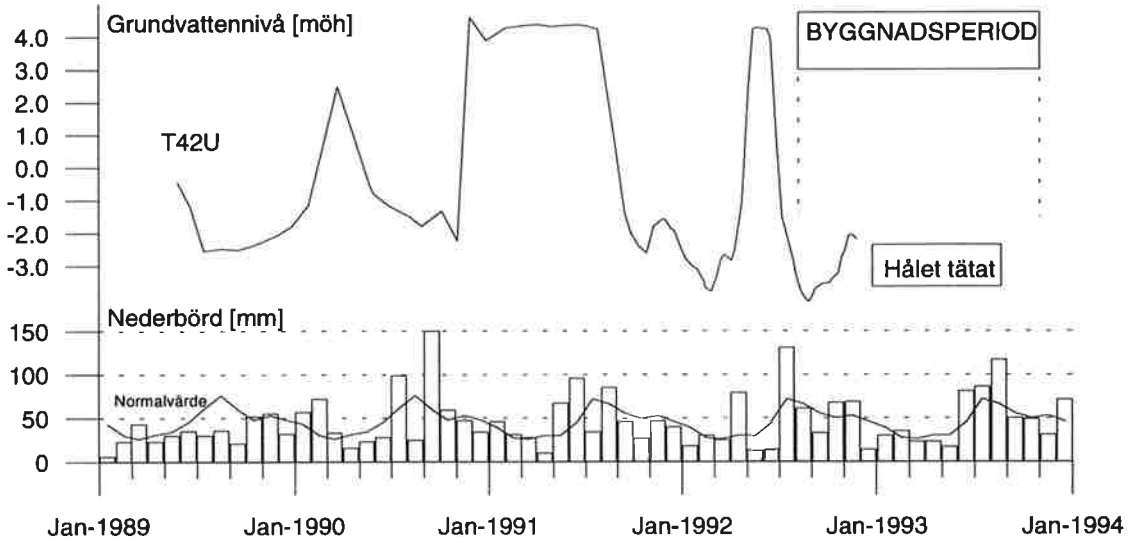
Figur 3.2 Grundvattenvariation i T39U, samt nederbördsobservationer



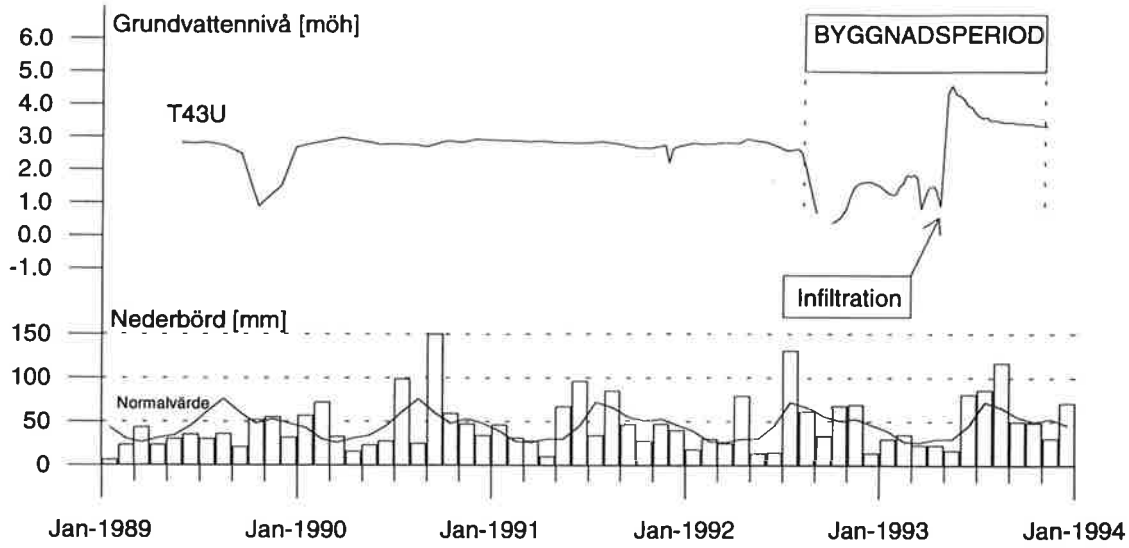
Figur 3.3 Grundvattenvariation i T40U, samt nederbördsobservationer



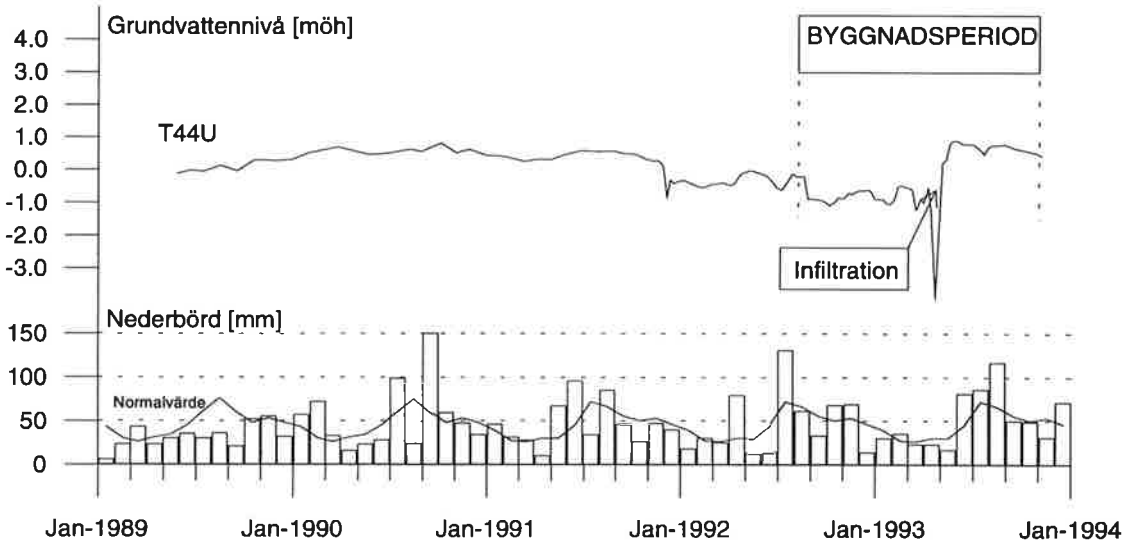
Figur 3.4 Grundvattenvariation i T41U, samt nederbördsobservationer



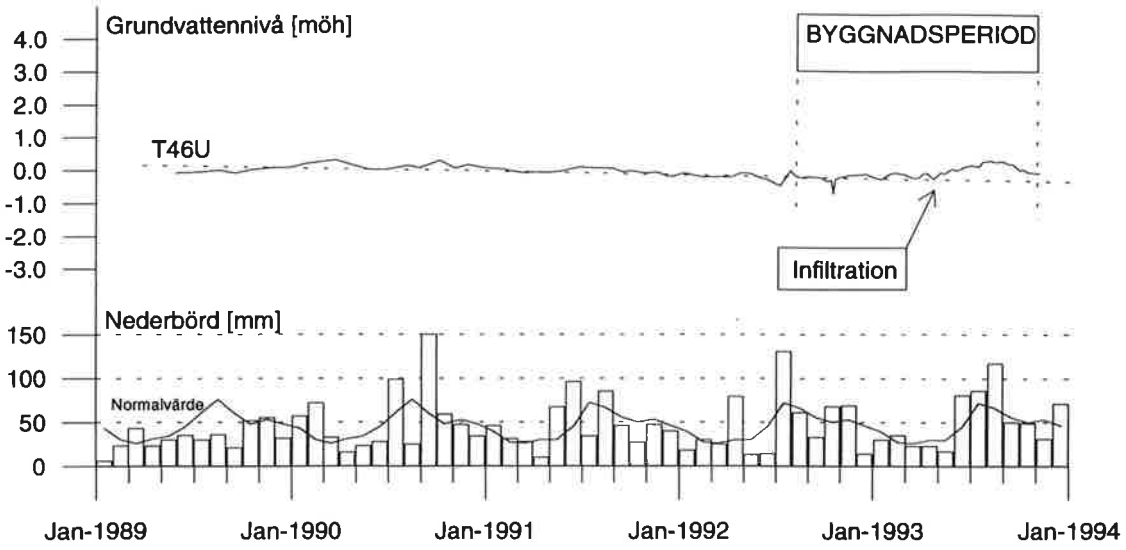
Figur 3.5 Grundvattenvariation i T42U, samt nederbördsobservationer



Figur 3.6 Grundvattenvariation i T43U, samt nederbördsobservationer

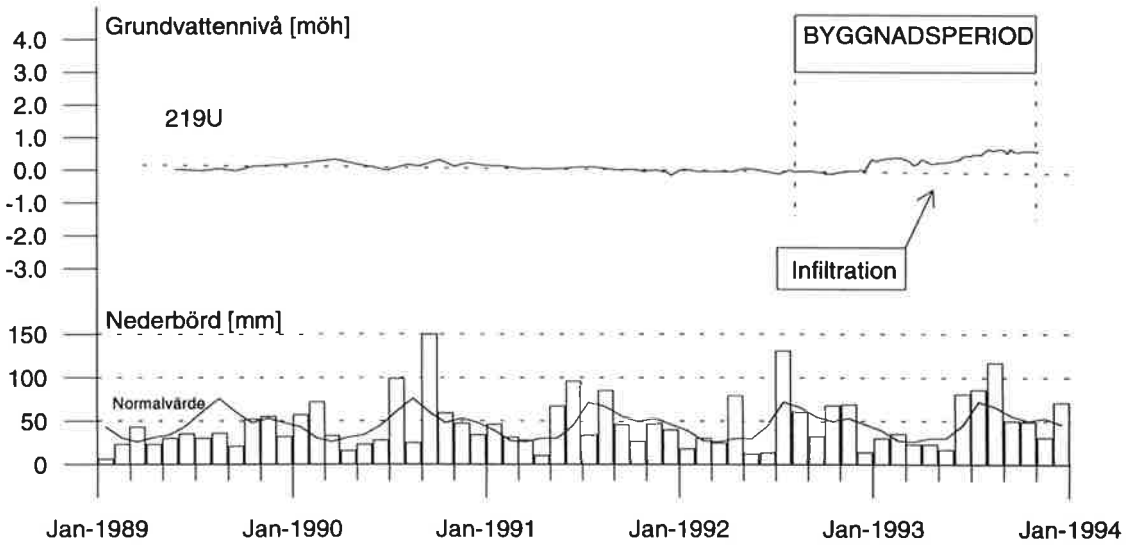


Figur 3.7 Grundvattenvariation i T44U, samt nederbördsobservationer

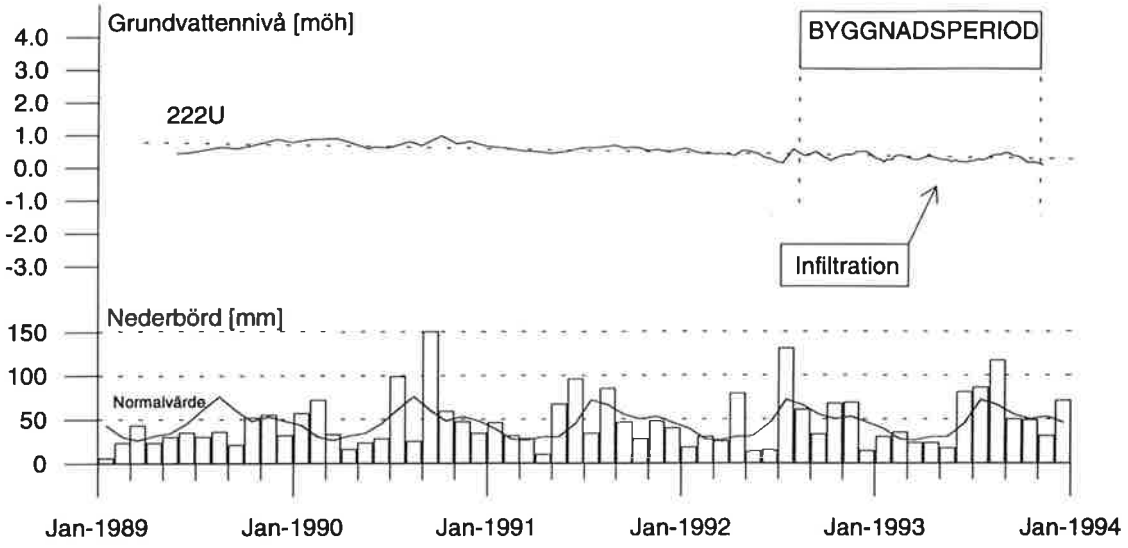


Figur 3.8 Grundvattenvariation i T46U, samt nederbördsobservationer

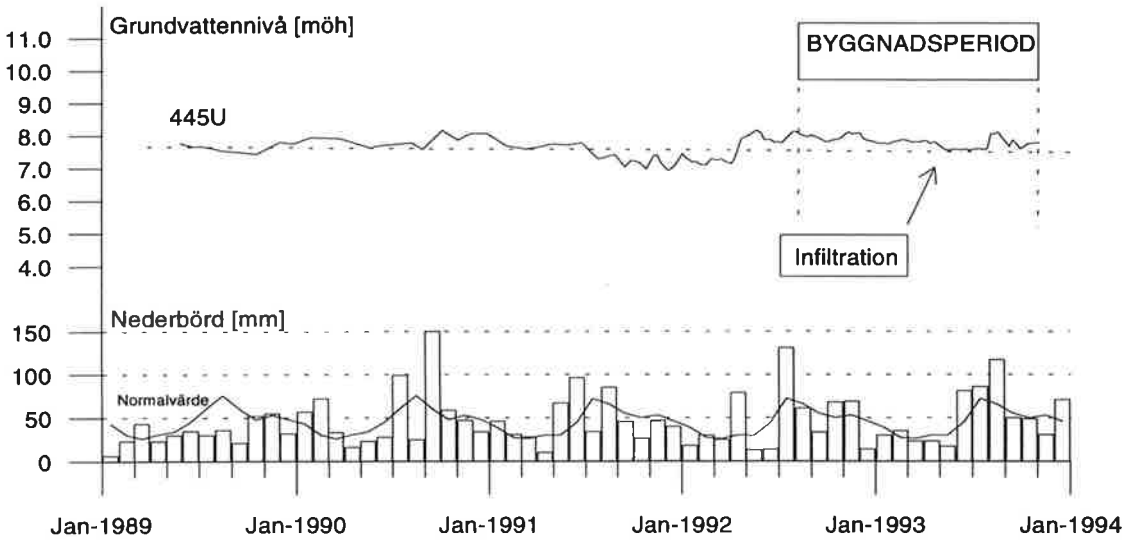
Undre grundvattenyta i jordlagren



Figur 3.9 Grundvattenvariation i 219U, samt nederbördsobservationer

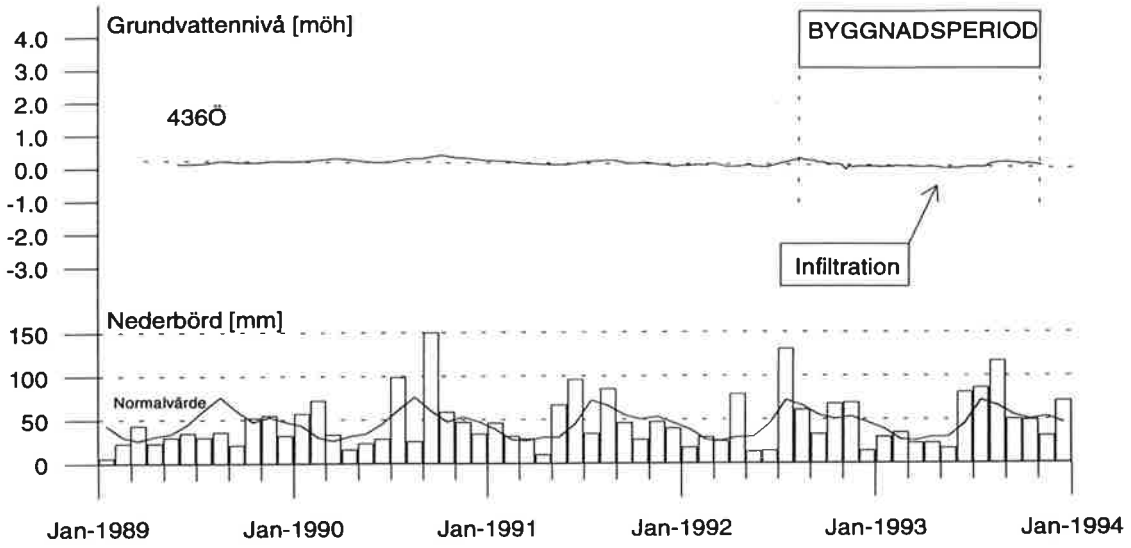


Figur 3.10 Grundvattenvariation i 222U, samt nederbördsobservationer

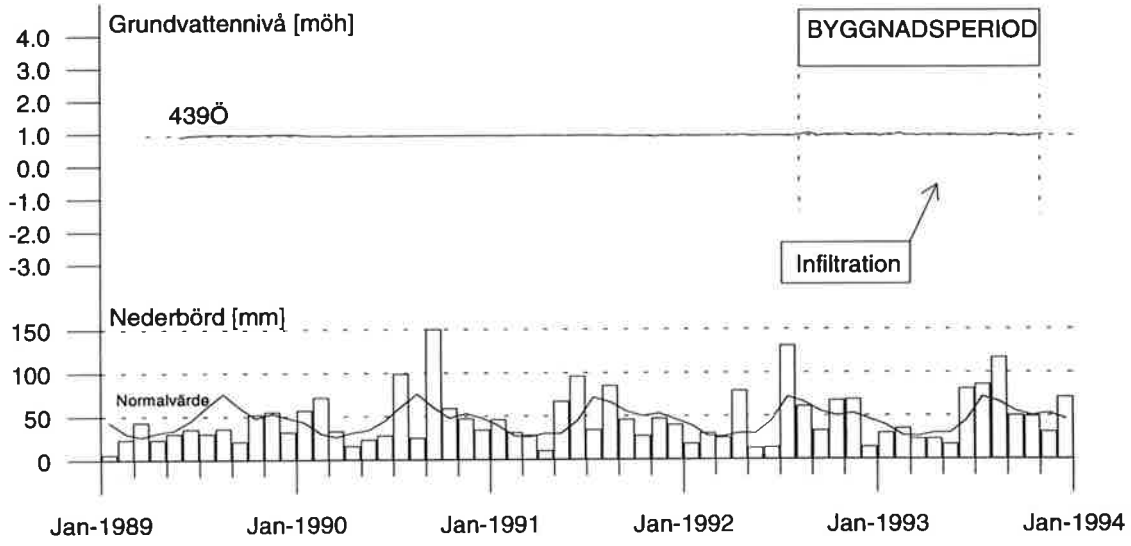


Figur 3.11 Grundvattenvariation i 445U, samt nederbördsobservationer

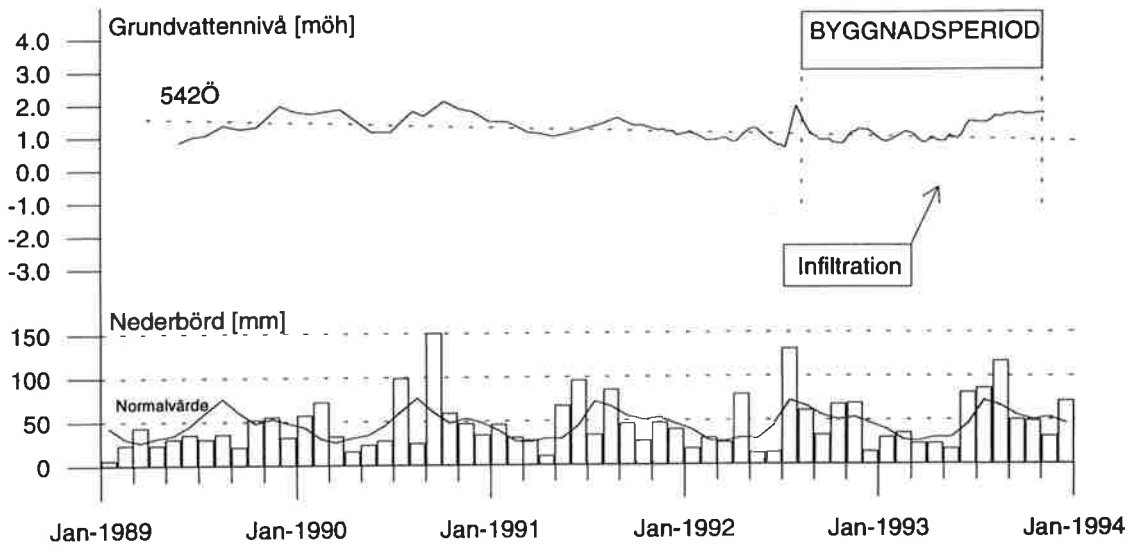
Övre grundvattenyta i jordlagren



Figur 3.12 Grundvattenvariation i 436Ö, samt nederbördsobservationer



Figur 3.13 Grundvattenvariation i 439Ö, samt nederbördsobservationer



Figur 3.14 Grundvattenvariation i 542Ö, samt nederbördsobservationer

Sammanfattande tabell för studerade grundvattenobservationshål av spetsnivå, bergöverytans nivå (om angiven), "normalnivå" och trend (om urskiljbar) samt infiltrationsgräns (enligt vattendom).

Hål-beteckning	Berg-överyta	Spets-nivå	"Normal-nivå"	Trend	Infiltrations-gräns
T35U	+1,3	−3,25	—	—	−3,0
T39U	+1,5	−4,78	+0,4	−3,6 cm/år	−2,0
T40U	+4,5	−9,97	+5,0	−43,2 cm/år	+4,0
T41U	+2,0	−9,54	+4,0	+9,3 cm/år	+3,0
T42U	+4,0	−18,67	—	—	−3,0
T43U	+2,1	−10,56	—	—	+1,0
T44U	±0,0	−10,38	—	—	−1,0
T46U	−1,6	−1,65	±0,0	−11,0 cm/år	±0,0
219U	−6,0	−5,72	±0,0	−5,5 cm/år	−0,5
222U	−2,9	−2,90	+0,5	−11,3 cm/år	+0,4
445U	—	+4,50	+7,5	−3,7 cm/år	+ 7,0
436Ö	—	−1,24	±0,0	−5,8 cm/år	±0,0
439Ö	—	−0,34	+1,0	−0,6 cm/år	+0,4
542Ö	—	+0,52	+1,2	−15,9 cm/år	+1,0

Bilaga 4 visar ett exempel på det protokoll som använts av NCC för dokumentering av injekteringsarbetena för bergrummen under Kungliga Biblioteket, samt ett exempel på hur dessa data behandlats i kalkylprogrammet EXCEL.

NCC

KUNGLIGA BIBLIOTEKET
PROJEKT HUMLAN Kod 7:2
INJEKTERINGSPROTOKOLL

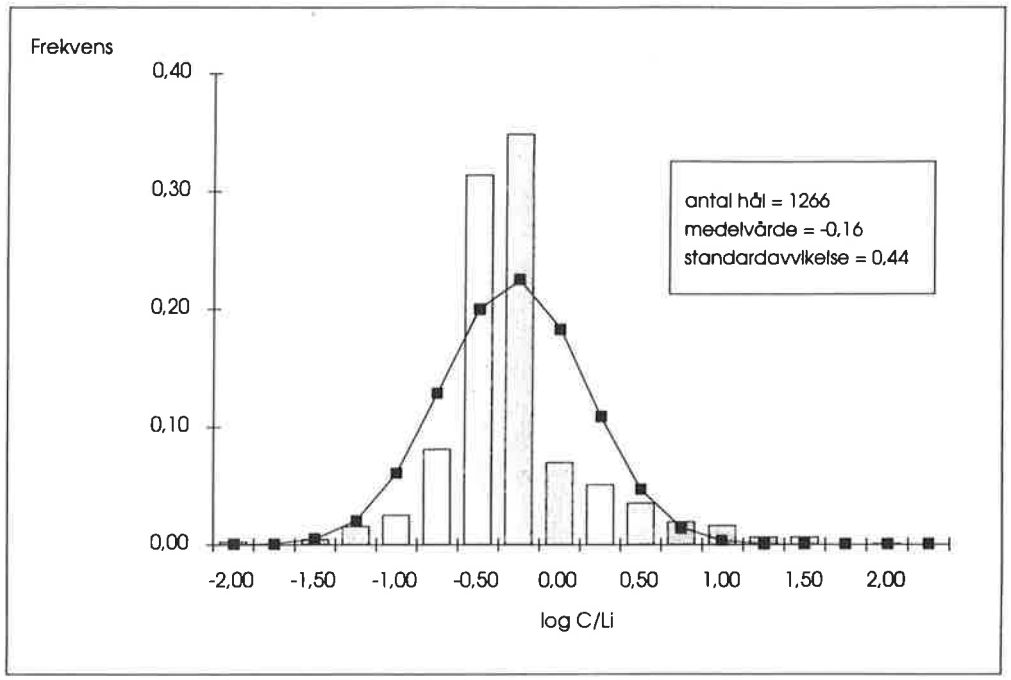
Rapport nr.:	42 SKÄRM 1G03
Datum:	930209
Utförd av:	OE

Efterinjekt.:	Förinjekt.: X	Temperatur injekt.bruk: +8°C
Byggnadsdel: BERGRUM 1		Sekt: 0/043
Cementtyp: SM	Tillsatsmedel: BENT 4% INTR.PL 0.5%	

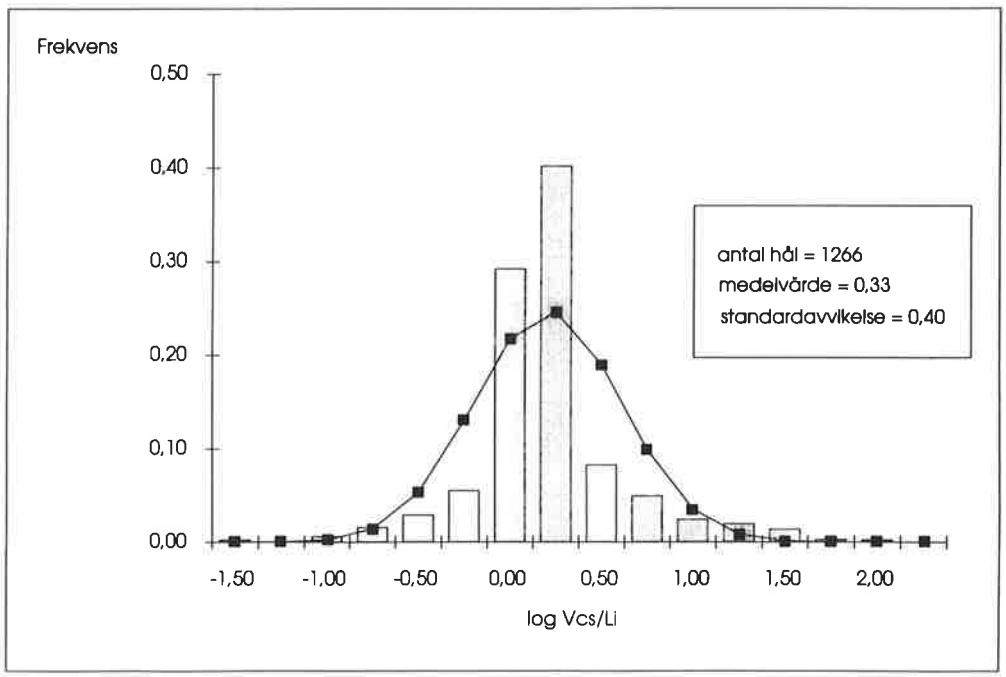
Hål nr	Borrlängd m	Injekt.längd m	Fördr.id Hål nr	Antal lior (hål 1 - 0.5 l) 1	2	1	0.5	Hålrum	Cement kg	Injekt.tryck (bar) Ant	Slut	Pumpar Start	Slut	Anmärkning Pump nr
1	12	11		64						5-20	20	03¹¹	03⁴⁹	1
2				21								03³⁰	03⁵⁵	1
3				24								03³¹	04⁰⁸	2
4				21								03⁴²	03⁵¹	2
5				21								03⁴⁶	03⁵⁴	3
6				26								03⁴⁰	03⁴⁵	3
7				25								03³⁵	03³⁷	3
8				21								03³²	03³⁵	3
9				22								03³⁷	03⁴¹	2
10				20								03³³	03³⁶	2
11				20								03³⁰	03³³	2
12				21								03²⁶	03²⁹	2
13				65								03⁰⁹	03²⁵	2
14				21								03²⁶	03³⁰	3
15				24								03¹⁸	03²⁶	3
16				21								03¹³	03¹⁸	3
17				20								03⁰⁶	03¹³	3
18				20								02⁴³	02⁵⁴	1
17				22								02⁴³	02⁴⁷	1
20				20								02³⁸	02⁴²	1
21				21								02³⁰	02³⁴	3
22				20								02²⁶	02³⁰	3
23				22								02²⁰	02²⁵	3
24				20								02¹³	02²⁰	3
25			27	278			31					01⁵⁴	02³¹	3
26				43								02⁴¹	02⁵⁴	2
27			25											
28				363			34					02¹⁰	02⁴¹	2
29				22								02⁰¹	02⁰⁹	2
30				20								01⁵⁷	02⁰¹	2
31				20								01⁵²	01⁵⁶	2
32				23								02²⁵	02³⁵	1
33				20								02²¹	02²⁵	1
34				21								02¹⁷	02²¹	1
35				20								02¹⁰	02¹⁶	1
36				19								02⁰⁴	02¹⁰	1
37				20								02⁰⁰	02⁰⁴	1
38				20								01⁵⁵	01⁵⁹	1
39				19								01⁴⁹	01⁵⁵	1
Summa	468		Summa	1510			65		532					

Injektering bergrum 1 sektion 003, rapport 63 - skärm 1G08A																	
				W/C=3		W/C=2		W/C=1		W/C=0,5							
Hål	Lb	Li	Fört	Vcs (3)	C (3)	Vcs (2)	C (2)	Vcs (1)	C (1)	Vcs (0,5	C (0,5)	(Vh)	(Ch)	Vcs	Vcs/Li	C	C/Li
nr	[m]	[m]	hål	[lit]	[kg]	[lit]	[kg]	[lit]	[kg]	[lit]	[kg]	[lit]	[kg]	[lit]	[lit/m]	[kg]	[kg/m]
1	6,0	5,0		13,0	3,9		0,0		0,0		0,0		0,0	13,0	2,6	3,9	0,8
2	6,0	5,0		13,0	3,9		0,0		0,0		0,0		0,0	13,0	2,6	3,9	0,8
3	6,0	5,0		14,0	4,2		0,0		0,0		0,0		0,0	14,0	2,8	4,2	0,8
4	6,0	5,0		14,0	4,2		0,0		0,0		0,0		0,0	14,0	2,8	4,2	0,8
5	6,0	5,0		16,0	4,8		0,0		0,0		0,0		0,0	16,0	3,2	4,8	1,0
6	6,0	5,0		14,0	4,2		0,0		0,0		0,0		0,0	14,0	2,8	4,2	0,8
7	6,0	5,0		14,0	4,2		0,0		0,0		0,0		0,0	14,0	2,8	4,2	0,8
8	6,0	5,0		14,0	4,2		0,0		0,0		0,0		0,0	14,0	2,8	4,2	0,8
9	6,0	5,0		15,0	4,5		0,0		0,0		0,0		0,0	15,0	3,0	4,5	0,9
10	6,0	5,0		17,0	5,1		0,0		0,0		0,0		0,0	17,0	3,4	5,1	1,0
11	6,0	5,0		13,0	3,9		0,0		0,0		0,0		0,0	13,0	2,6	3,9	0,8
12	6,0	5,0		14,0	4,2		0,0		0,0		0,0		0,0	14,0	2,8	4,2	0,8
13	6,0	5,0		17,0	5,1		0,0		0,0		0,0		0,0	17,0	3,4	5,1	1,0
14	6,0	5,0		14,0	4,2		0,0		0,0		0,0		0,0	14,0	2,8	4,2	0,8
15	6,0	5,0		14,0	4,2		0,0		0,0		0,0		0,0	14,0	2,8	4,2	0,8
16	6,0	5,0		13,0	3,9		0,0		0,0		0,0		0,0	13,0	2,6	3,9	0,8
17	6,0	5,0		13,0	3,9		0,0		0,0		0,0		0,0	13,0	2,6	3,9	0,8
18	6,0	5,0		14,0	4,2		0,0		0,0		0,0		0,0	14,0	2,8	4,2	0,8
19	6,0	5,0		13,0	3,9		0,0		0,0		0,0		0,0	13,0	2,6	3,9	0,8
20	6,0	5,0		13,0	3,9		0,0		0,0		0,0		0,0	13,0	2,6	3,9	0,8
21	6,0	5,0		12,0	3,6		0,0		0,0		0,0		0,0	12,0	2,4	3,6	0,7
22	6,0	5,0		14,0	4,2		0,0		0,0		0,0		0,0	14,0	2,8	4,2	0,8
23	6,0	5,0		14,0	4,2		0,0		0,0		0,0		0,0	14,0	2,8	4,2	0,8
24	6,0	5,0		17,0	5,1		0,0		0,0		0,0		0,0	17,0	3,4	5,1	1,0
25	6,0	5,0		15,0	4,5		0,0		0,0		0,0		0,0	15,0	3,0	4,5	0,9
26	6,0	5,0		12,0	3,6		0,0		0,0		0,0		0,0	12,0	2,4	3,6	0,7
27	6,0	5,0		13,0	3,9		0,0		0,0		0,0		0,0	13,0	2,6	3,9	0,8
28	6,0	5,0		13,0	3,9		0,0		0,0		0,0		0,0	13,0	2,6	3,9	0,8
29	6,0	5,0		14,0	4,2		0,0		0,0		0,0		0,0	14,0	2,8	4,2	0,8
30	6,0	5,0		13,0	3,9		0,0		0,0		0,0		0,0	13,0	2,6	3,9	0,8
31	6,0	5,0		14,0	4,2		0,0		0,0		0,0		0,0	14,0	2,8	4,2	0,8
32	6,0	5,0		42,0	12,5		0,0		0,0		0,0		0,0	42,0	8,4	12,5	2,5
33	6,0	5,0		12,0	3,6		0,0		0,0		0,0		0,0	12,0	2,4	3,6	0,7
34	6,0	5,0		12,0	3,6		0,0		0,0		0,0		0,0	12,0	2,4	3,6	0,7
35	6,0	5,0		12,0	3,6		0,0		0,0		0,0		0,0	12,0	2,4	3,6	0,7
36	6,0	5,0		14,0	4,2		0,0		0,0		0,0		0,0	14,0	2,8	4,2	0,8
37	6,0	5,0		26,0	7,8		0,0		0,0		0,0		0,0	26,0	5,2	7,8	1,6
38	6,0	5,0		14,0	4,2		0,0		0,0		0,0		0,0	14,0	2,8	4,2	0,8
39	6,0	5,0		13,0	3,9		0,0		0,0		0,0		0,0	13,0	2,6	3,9	0,8
40	6,0	5,0		13,0	3,9		0,0		0,0		0,0		0,0	13,0	2,6	3,9	0,8
41	6,0	5,0		13,0	3,9		0,0		0,0		0,0		0,0	13,0	2,6	3,9	0,8
42	6,0	5,0		13,0	3,9		0,0		0,0		0,0		0,0	13,0	2,6	3,9	0,8
43	6,0	5,0		14,0	4,2		0,0		0,0		0,0		0,0	14,0	2,8	4,2	0,8
44	6,0	5,0		14,0	4,2		0,0		0,0		0,0		0,0	14,0	2,8	4,2	0,8
45	6,0	5,0		16,0	4,8		0,0		0,0		0,0		0,0	16,0	3,2	4,8	1,0
46	6,0	5,0		15,0	4,5		0,0		0,0		0,0		0,0	15,0	3,0	4,5	0,9
47	6,0	5,0		13,0	3,9		0,0		0,0		0,0		0,0	13,0	2,6	3,9	0,8
48	6,0	5,0		15,0	4,5		0,0		0,0		0,0		0,0	15,0	3,0	4,5	0,9
49	6,0	5,0		10,0	3,0		0,0		0,0		0,0		0,0	10,0	2,0	3,0	0,6
50	6,0	5,0		15,0	4,5		0,0		0,0		0,0		0,0	15,0	3,0	4,5	0,9
51	6,0	5,0		20,0	6,0		0,0		0,0		0,0		0,0	20,0	4,0	6,0	1,2
52	6,0	5,0		12,0	3,6		0,0		0,0		0,0		0,0	12,0	2,4	3,6	0,7
53	6,0	5,0	58	54,0	16,1		0,0		0,0		0,0		0,0	54,0	10,8	16,1	3,2
54	6,0	5,0		14,0	4,2		0,0		0,0		0,0		0,0	14,0	2,8	4,2	0,8
55	6,0	5,0		12,0	3,6		0,0		0,0		0,0		0,0	12,0	2,4	3,6	0,7
56	6,0	5,0		12,0	3,6		0,0		0,0		0,0		0,0	12,0	2,4	3,6	0,7
57	6,0	5,0		12,0	3,6		0,0		0,0		0,0		0,0	12,0	2,4	3,6	0,7
58	6,0	5,0			0,0		0,0		0,0		0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
59	6,0	5,0		12,0	3,6		0,0		0,0		0,0		0,0	12,0	2,4	3,6	0,7
60	6,0	5,0		12,0	3,6		0,0		0,0		0,0		0,0	12,0	2,4	3,6	0,7
61	6,0	5,0		12,0	3,6		0,0		0,0		0,0		0,0	12,0	2,4	3,6	0,7
62	6,0	5,0		14,0	4,2		0,0		0,0		0,0		0,0	14,0	2,8	4,2	0,8
63	6,0	5,0		20,0	6,0		0,0		0,0		0,0		0,0	20,0	4,0	6,0	1,2
64	6,0	5,0		12,0	3,6		0,0		0,0		0,0		0,0	12,0	2,4	3,6	0,7
65	6,0	5,0		20,0	6,0		0,0		0,0		0,0		0,0	20,0	4,0	6,0	1,2
S	390,0	325,0		967,0		0,0		0,0		0,0		0,0		967,0	3,0		medel
S					288,7		0,0		0,0		0,0		0,0		medel	288,7	0,9

Bilaga 5 presenterar statistisk presentation av åtgången injekteringsmaterial. Observera att i figurerna angivna medelvärden respektive standardavvikelser gäller för logaritmerade värden.

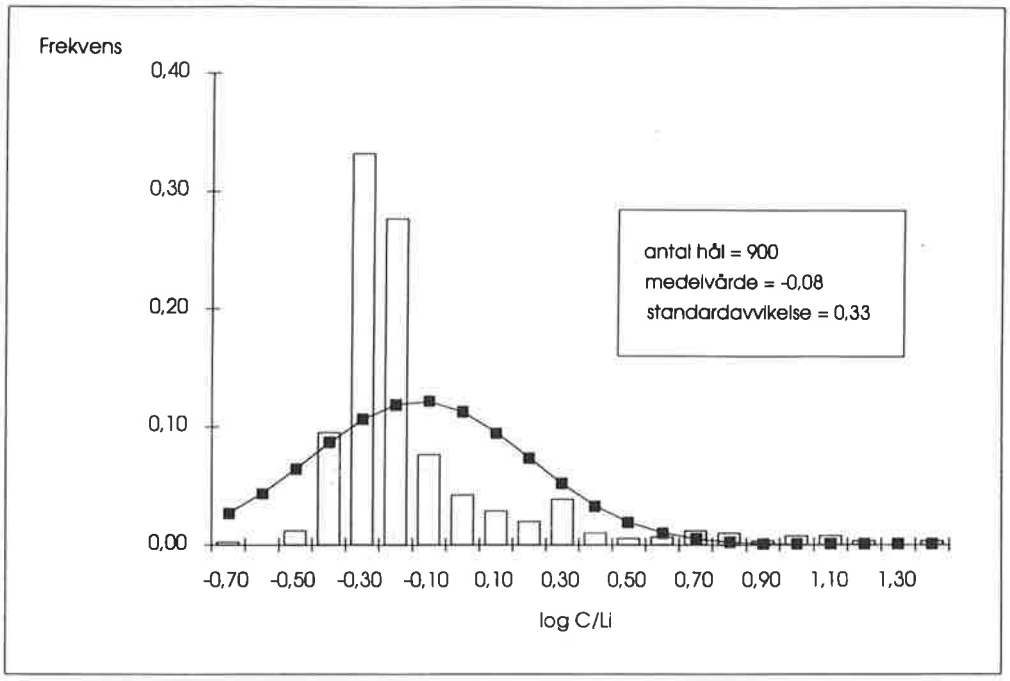


Figur 5.1 Åtgång injekteringsmaterial (kg cement) i transporttunnel

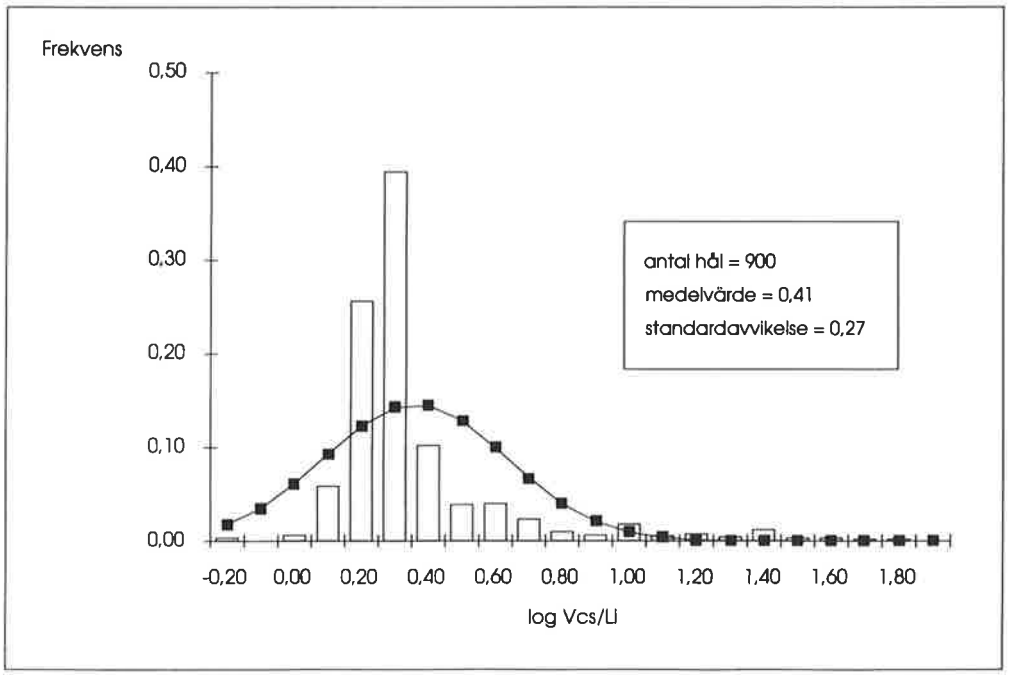


Figur 5.2 Åtgång injekteringsmaterial (liter suspension) i transporttunnel

Bergrum 1 galleri

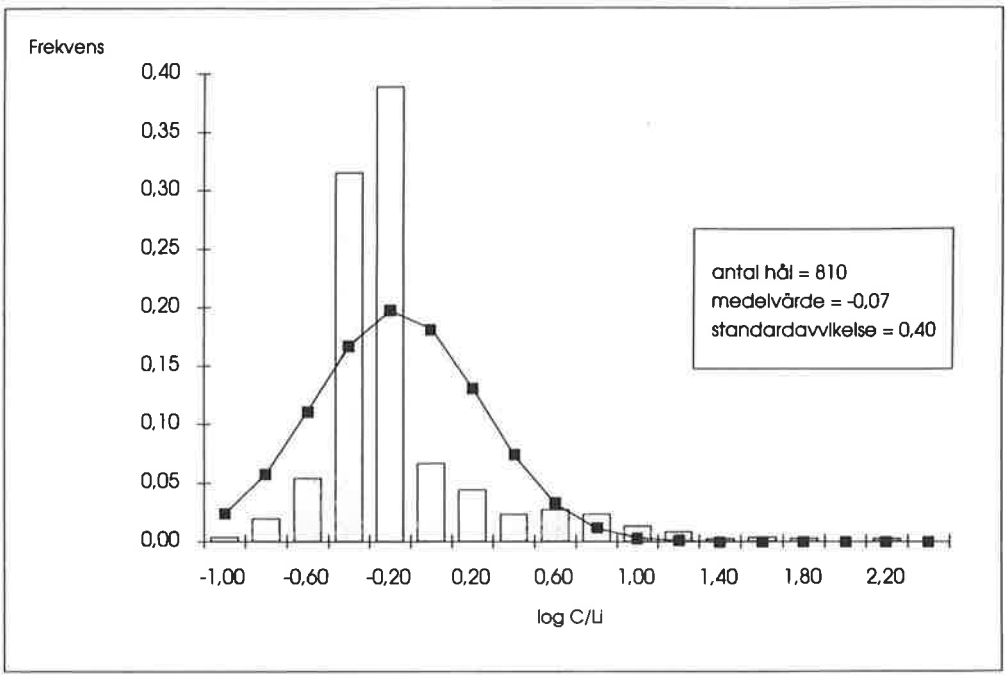


Figur 5.3 Åtgång injekteringsmaterial (kg cement) i bergrum 1 (galleri)

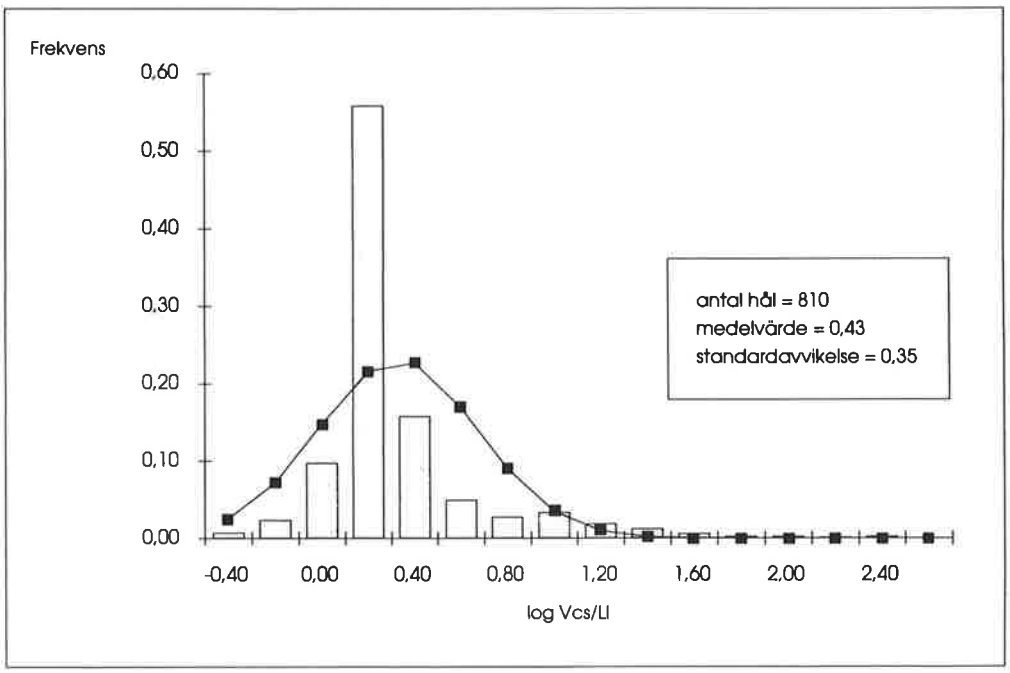


Figur 5.4 Åtgång injekteringsmaterial (liter suspension) i bergrum 1 (galleri)

Bergrum 1 mellanpall

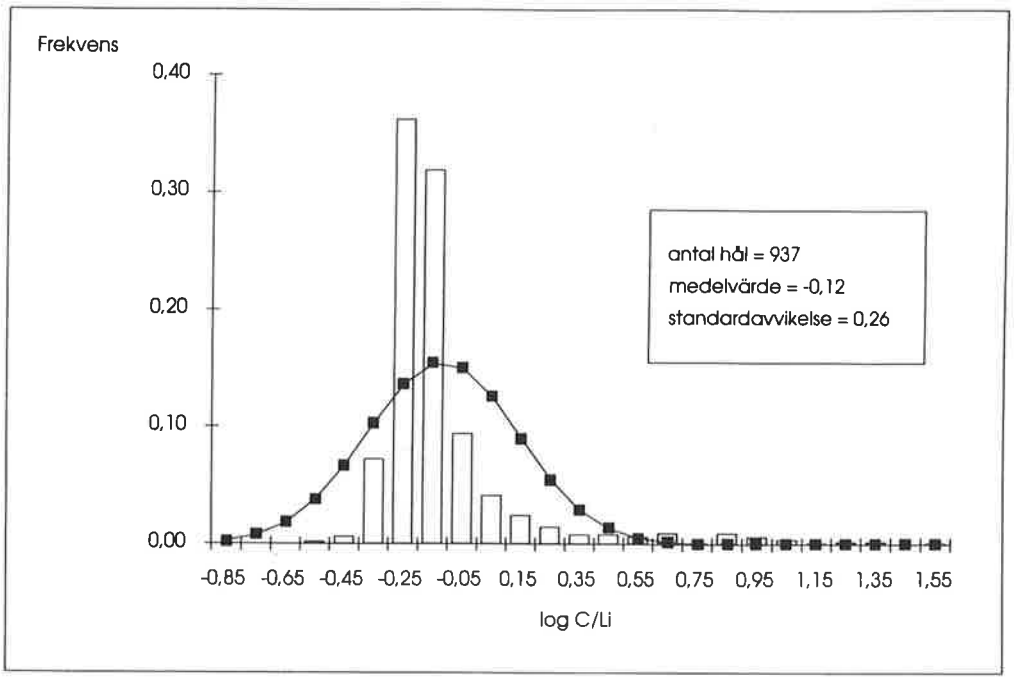


Figur 5.5 Åtgång injekteringsmaterial (kg cement) i bergrum 1 (mellanpall)

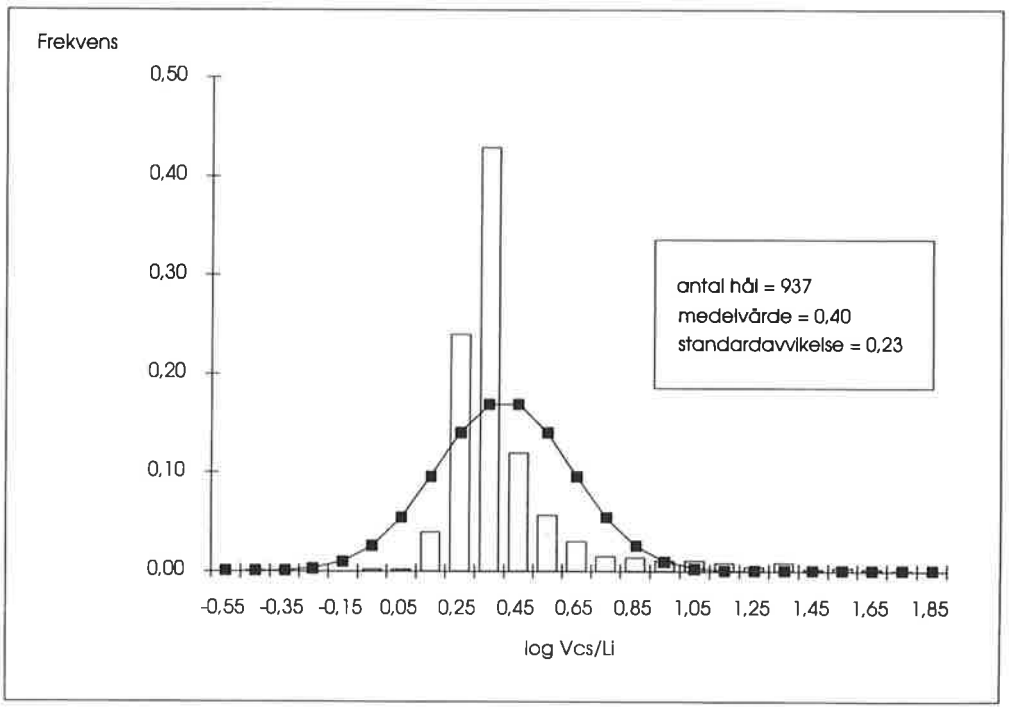


Figur 5.6 Åtgång injekteringsmaterial (liter suspension) i bergrum 1 (mellanpall)

Bergrum 2 galleri

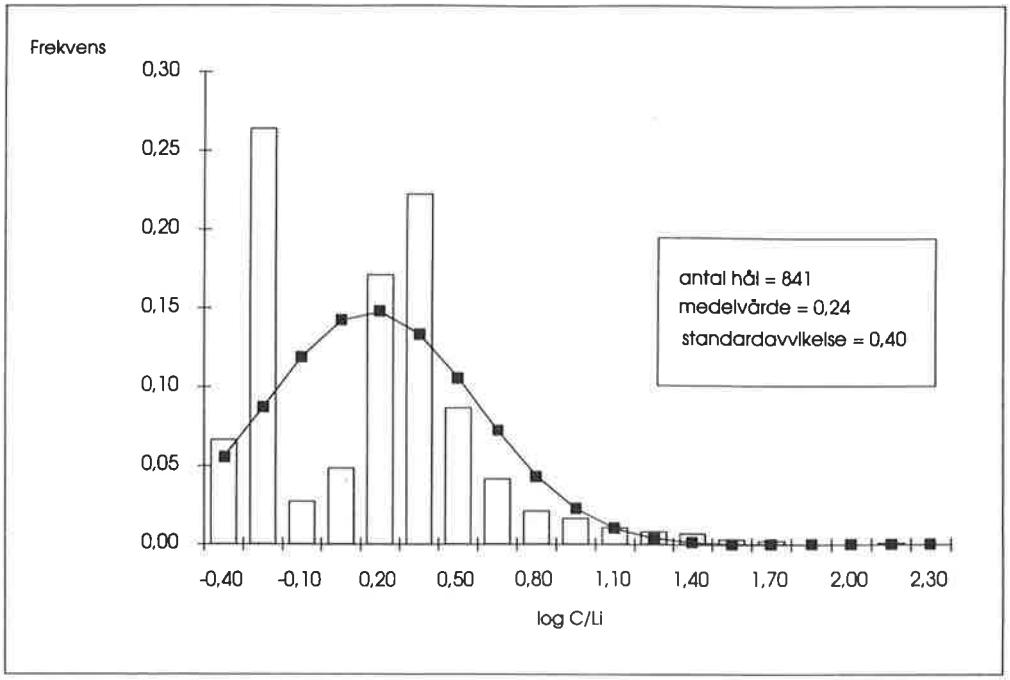


Figur 5.7 Åtgång injekteringsmaterial (kg cement) i bergrum 2 (galleri)

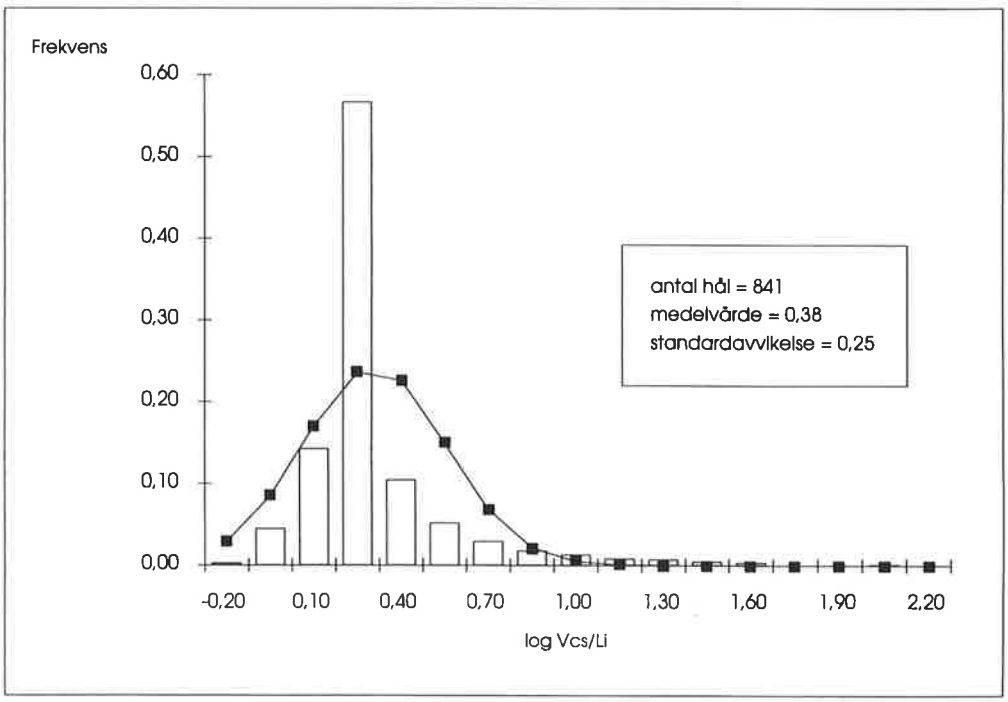


Figur 5.8 Åtgång inje`kteringsmaterial (liter suspension) i bergrum 2 (galleri)

Bergrum 2 mellanpall



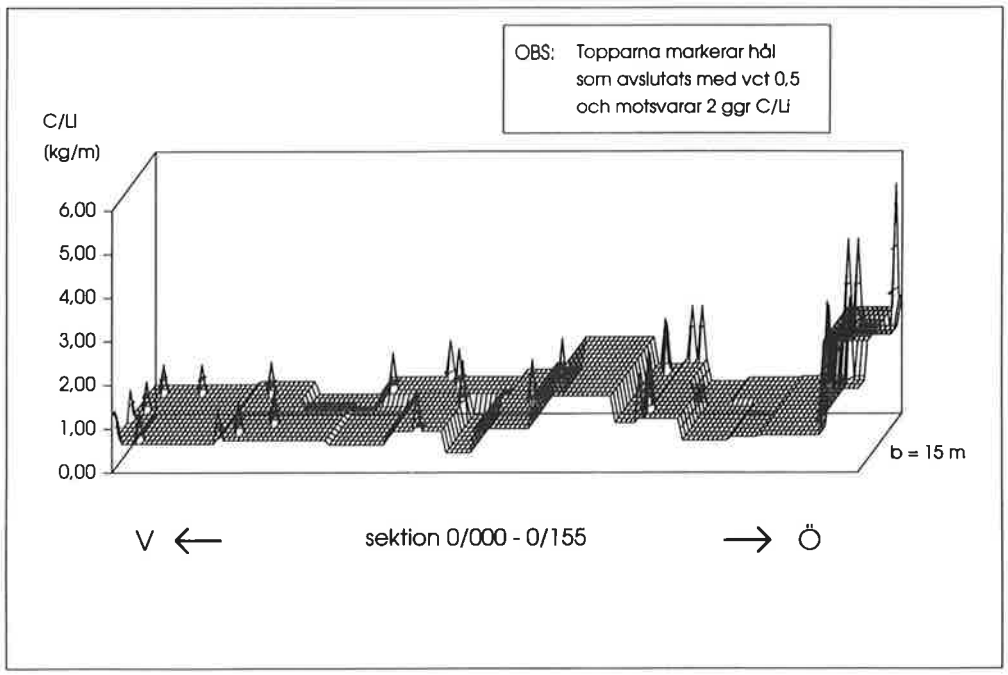
Figur 5.9 Åtgång injekteringsmaterial (kg cement) i bergrum 2 (mellanpall)



Figur 5.10 Åtgång injekteringsmaterial (liter suspension) i bergrum 2 (mellanpall)

Bergrum 1

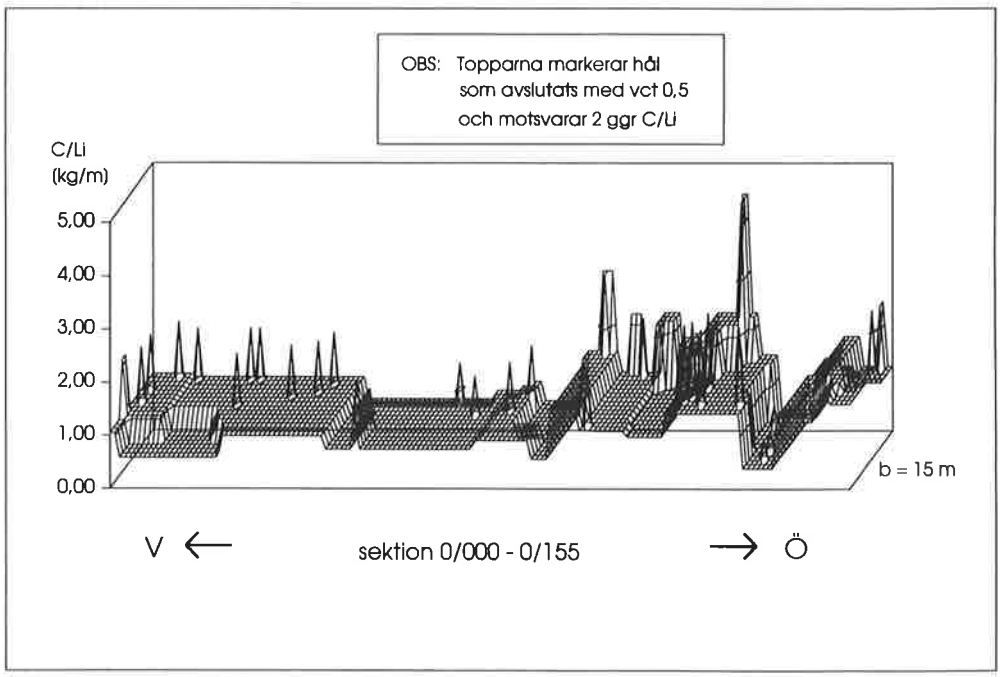
Sektion	Injekterad mängd [kg]	Hålfyllnad [kg]	Borrlängd totalt [m]	Åtgång inj.-mtrl per borr-meter [kg/m]	Antal hål med vct 0,5	Antal hål totalt
0/000-0/022	2225	3795	3370	0,66	8 (~ 3%)	289
0/020-0/045	1750	3125	2376	0,74	4 (~ 2%)	201
0/035-0/050	950	2530	2094	0,45	0	170
0/045-0/058	550	1300	860	0,64	0	74
0/058-0/070	825	1050	866	0,95	2 (~ 3%)	73
0/050-0/078	1425	2048	1692	0,84	3 (~ 2%)	129
0/075-0/088	1400	1680	1388	1,01	2 (~ 2%)	94
0/088-0/100	1500	2375	858	1,75	0	73
0/105-0/110	455	1225	400	1,14	4 (~ 12%)	32
0/110-0/118	900	2250	728	1,24	4 (~ 6%)	67
0/115-0/128	980	4025	1324	0,74	0	109
0/125-0/135	895	3250	1084	0,83	0	88
0/135-0/145	1020	3575	1182	0,86	0	97
0/145-0/155	2425	2700	889	2,73	1 (~ 1%)	73
0/140-0/154	850	1225	424	2,00	2 (~ 6%)	33
0/149-0/155	950	1725	495	1,92	3 (~ 6%)	47
Summa	19100	37878	20030	-	33	1649



Figur 6.1 Åtgång injekteringsmaterial för botteninjektering i bergrum 1 (kg cement per meter borrhål)

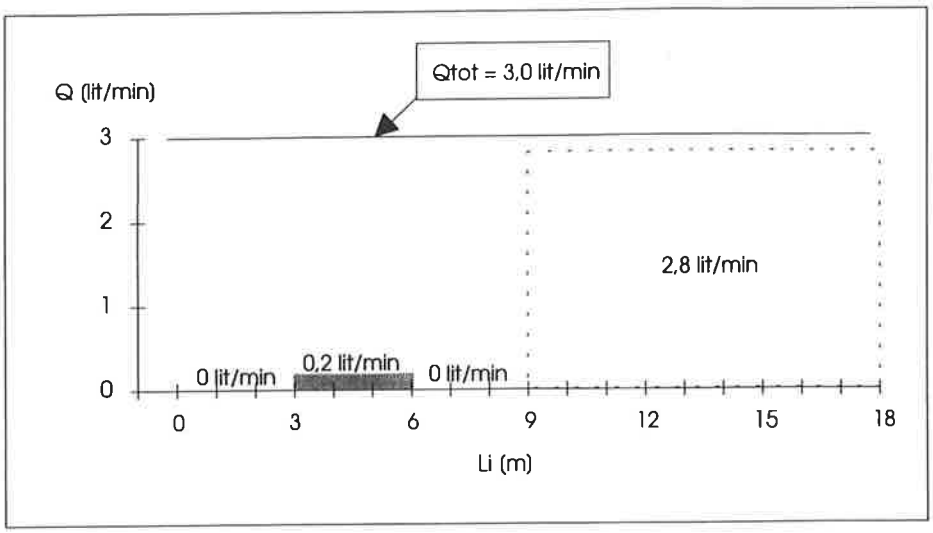
Bergrum 2

Sektion	Injekterad mängd [kg]	Hålfyllnad [kg]	Borrlängd totalt [m]	Åtgång inj.-mtrl per borr-meter [kg/m]	Antal hål med vct 0,5	Antal hål totalt
0/000-0/010	1425	1850	1350	1,05	5 (~ 5%)	107
0/005-0/022	650	1330	1102	0,59	0	97
0/010-0/045	2425	3600	2434	1,00	7 (~ 3%)	210
0/045-0/078	1175	1825	1577	0,75	4 (~ 3%)	125
0/045-0/072	425	725	787	0,54	0	73
0/075-0/085	275	650	301	0,91	2 (~ 9%)	22
0/085-0/095	425	910	758	0,56	0	61
0/095-0/100	1075	2250	718	1,50	4 (~ 7%)	61
0/100-0/102	375	1025	340	1,10	1 (~ 3%)	28
0/102-0/110	875	2450	800	1,09	4 (~ 4%)	66
0/110-0/118	875	2700	889	0,98	6 (~ 8%)	73
0/118-0/127	1350	2025	609	2,22	4 (~ 7%)	55
0/127-0/132	2064	4275	1454	1,42	5 (~ 4%)	116
0/130-0/140	1306	3325	1037	1,26	3 (~ 3%)	90
0/140-0/150	1045	2300	771	1,36	0	62
0/145-0/155	915	1550	518	1,77	0	42
0/150-0/155	1097	2200	687	1,60	0	60
0/150-0/155	653	1850	539	1,21	3 (~ 6%)	50
Summa	18430	36840	16671	-	48	1398

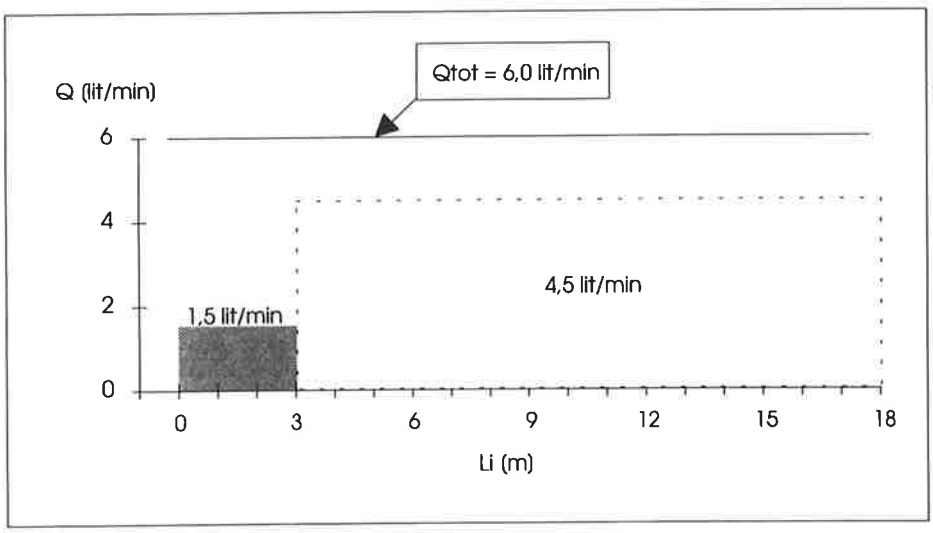


Figur 6.2 Åtgång injekteringsmaterial för botteninjektering i bergrum 2 (kg cement per meter borrhål)

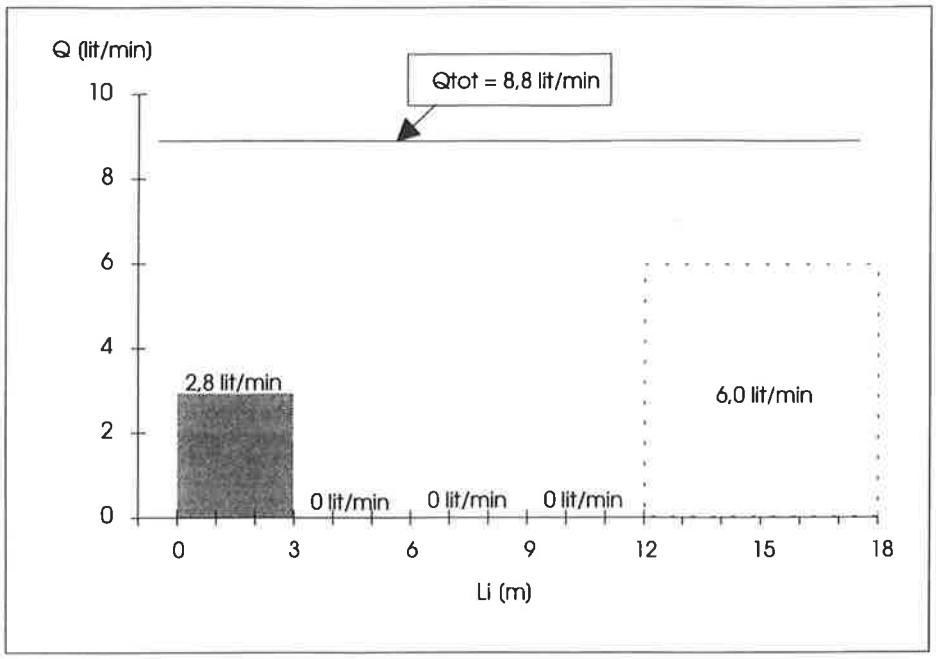
I diagrammen nedan presenteras resultaten från vattenförlustmätningarna med lång enkelmanschett. Mätningarna utfördes med inpressningstrycket 4 bar och hålen mättes i 3 m etapper.



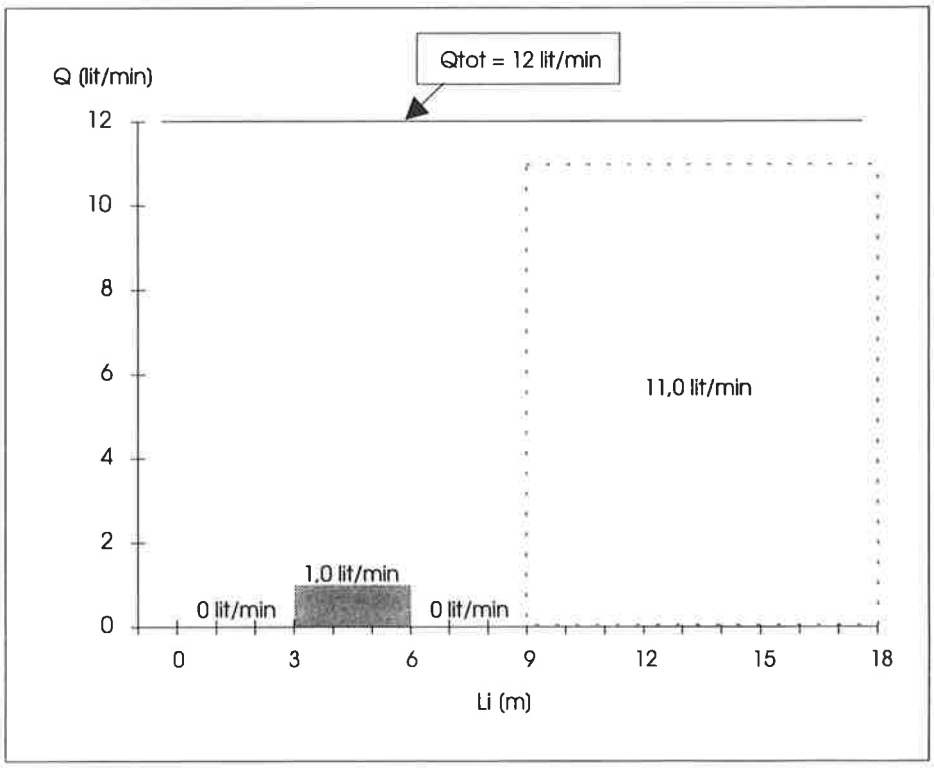
Figur 7.1 Vattenförlustmätning med lång enkelmanschett i hål nr 34 skärm 20



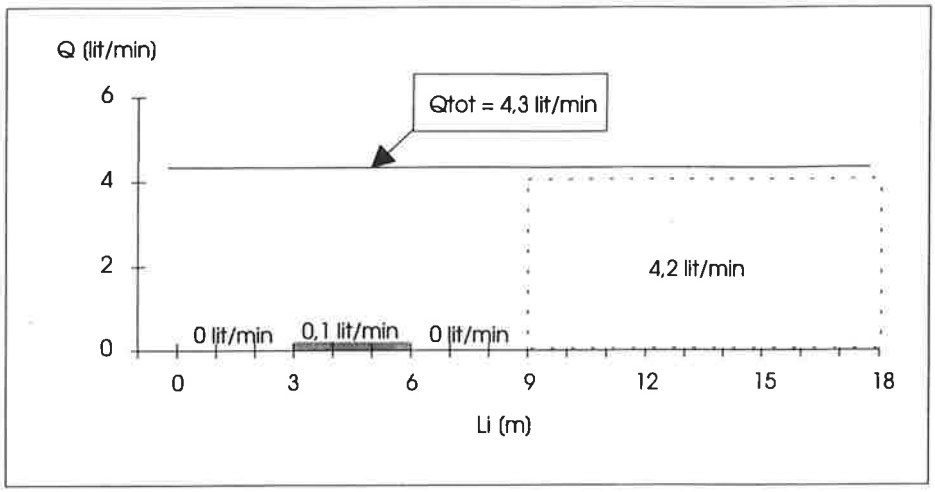
Figur 7.2 Vattenförlustmätning med lång enkelmanschett i hål nr 20 skärm 21



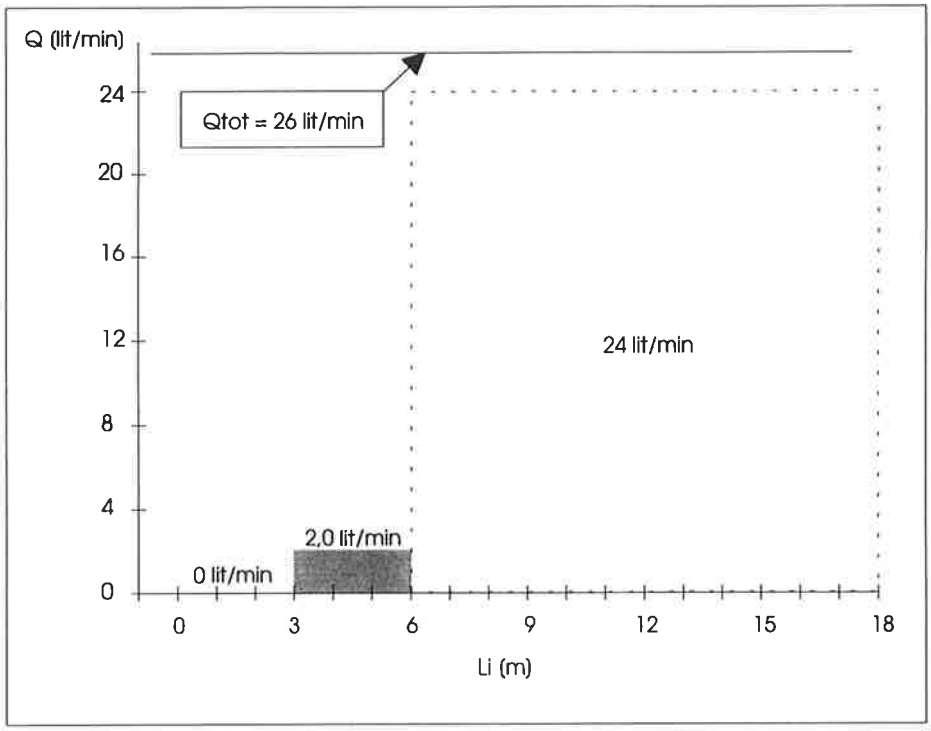
Figur 7.3 Vattenförlustmätning med lång enkelmanschett i hål nr 2 skärm 23



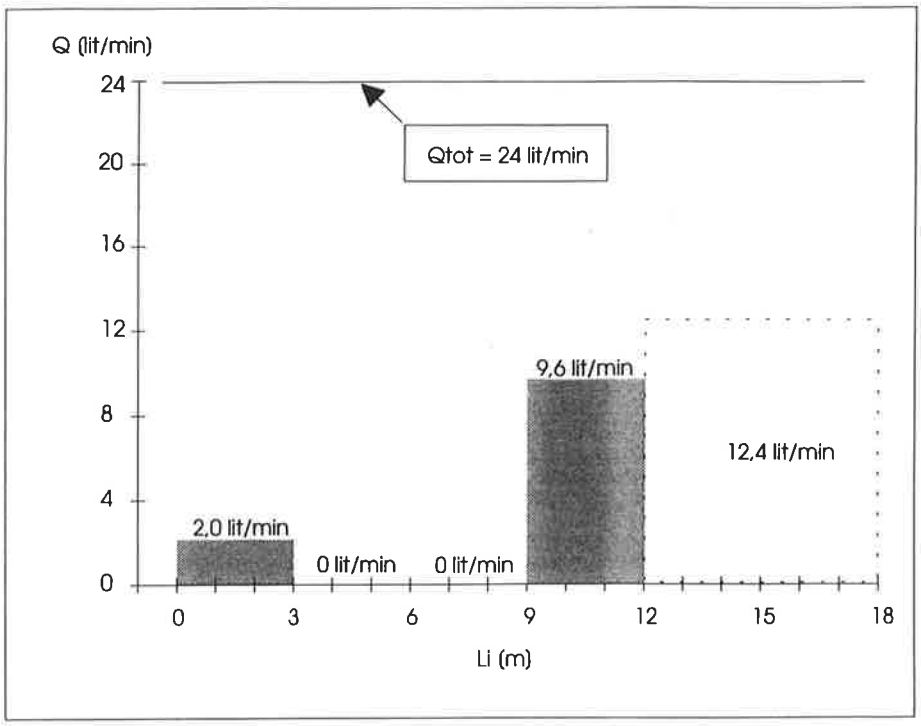
Figur 7.4 Vattenförlustmätning med lång enkelmanschett i hål nr 26 skärm 23



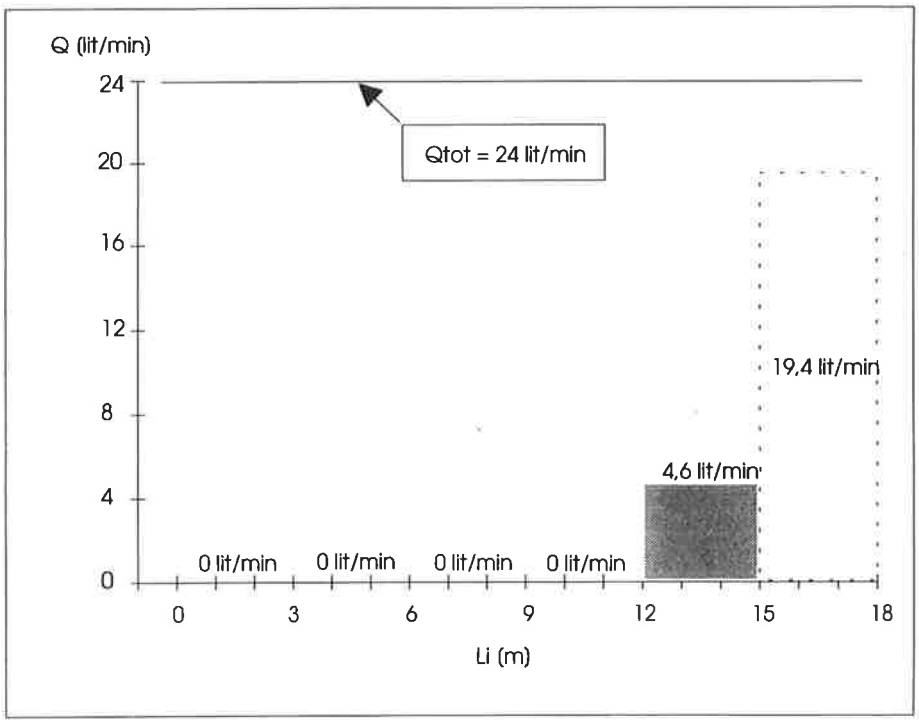
Figur 7.5 Vattenförlustmätning med lång enkelmanschett i hål nr 27 skärm 23



Figur 7.6 Vattenförlustmätning med lång enkelmanschett i hål nr 30 skärm 24

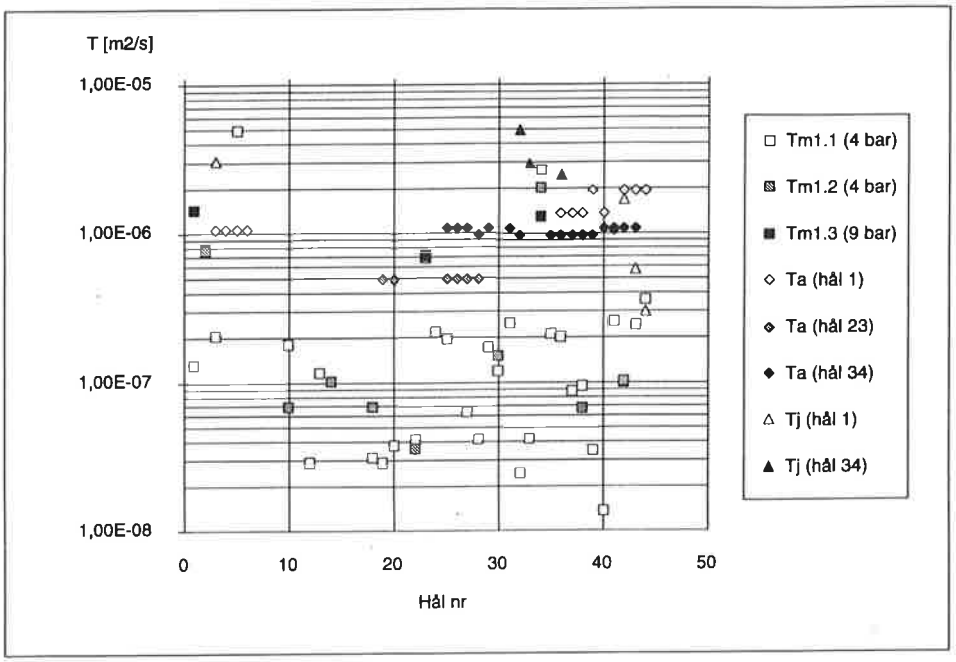


Figur 7.7 Vattenförlustmätning med lång enkelmanschett i hål nr 33 skärm 24

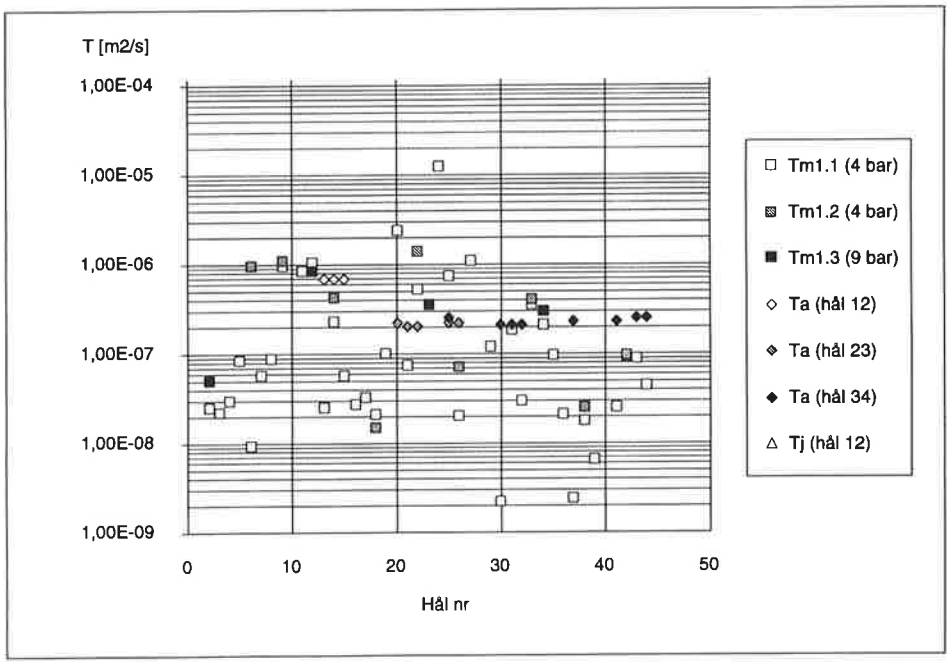


Figur 7.8 Vattenförlustmätning med lång enkelmanschett i hål nr 40 skärm 24

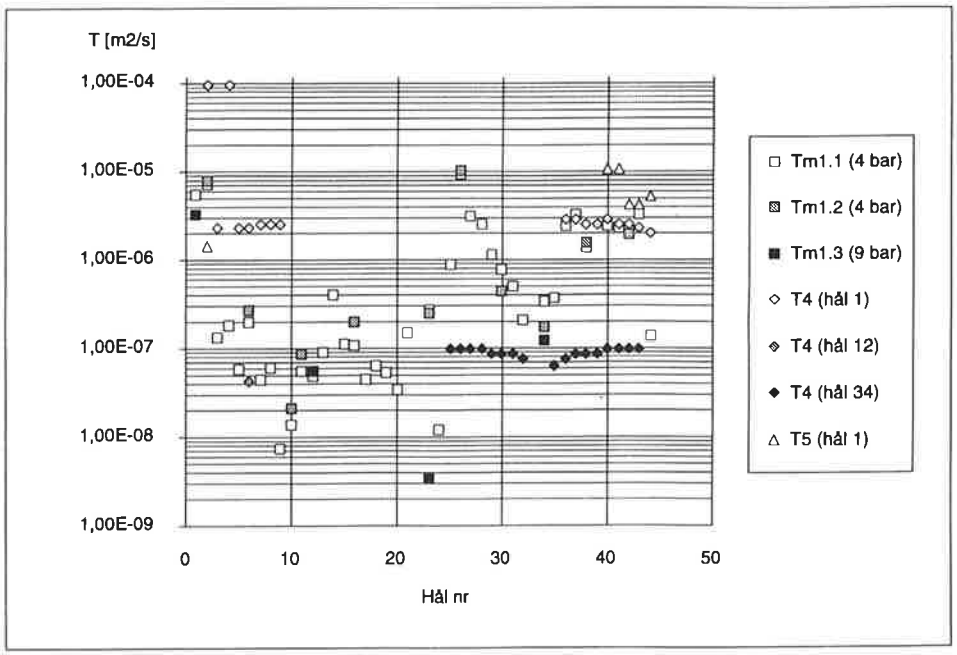
I diagrammen nedan jämförs transmissiviteten erhållen med olika utvärderingsalternativ. T_m enligt Moyés metod (före respektive efter spolning, samt vid interferenstest), T_a enligt avstånd/avsänkningsanalys, samt T_j enligt Jacobs metod.



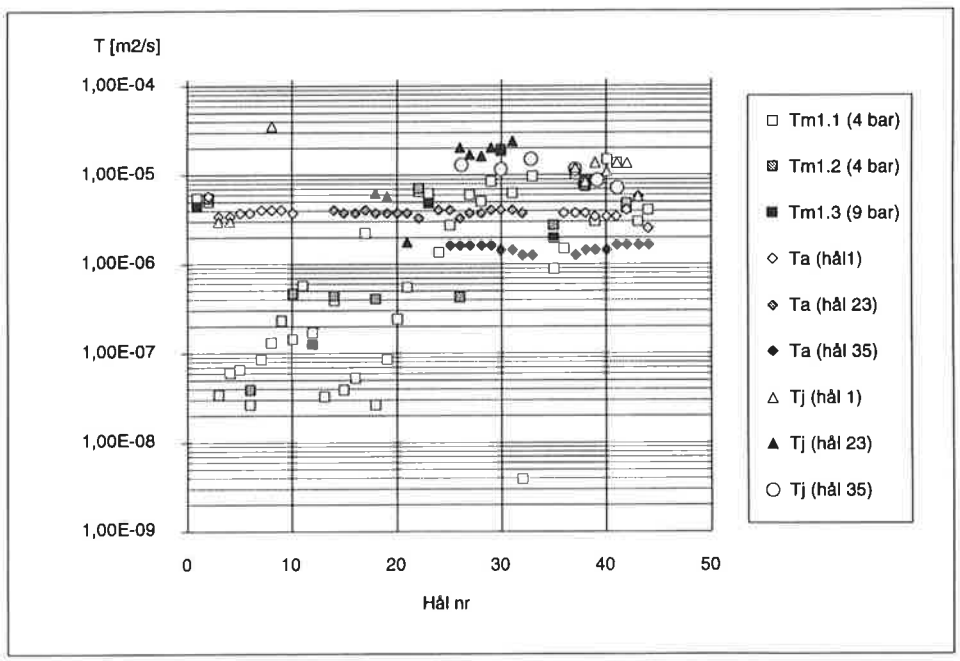
Figur 8.1 Jämförelse av utvärderingsalternativ för transmissiviteten - skärm 20



Figur 8.2 Jämförelse av utvärderingsalternativ för transmissiviteten - skärm 21

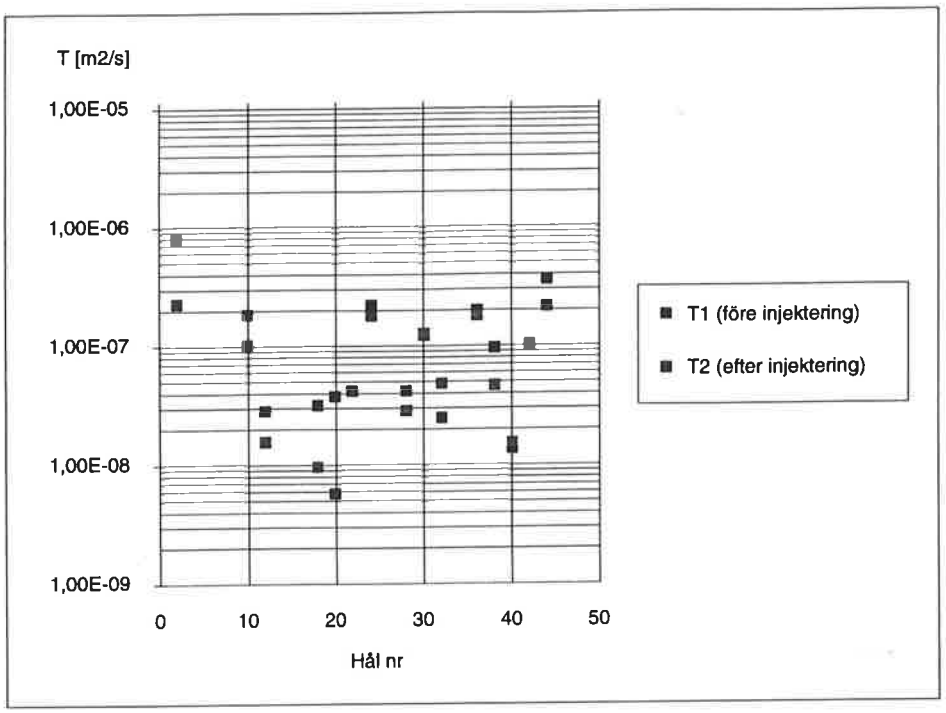


Figur 8.3 Jämförelse av utvärderingsalternativ för transmissiviteten - skärm 23

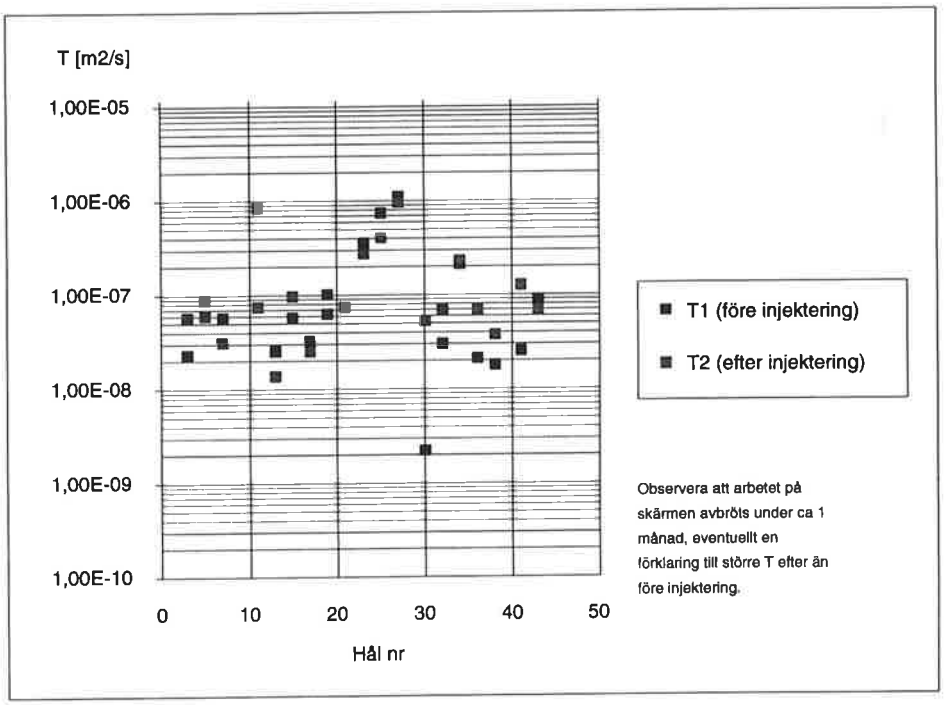


Figur 8.4 Jämförelse av utvärderingsalternativ för transmissiviteten - skärm 24

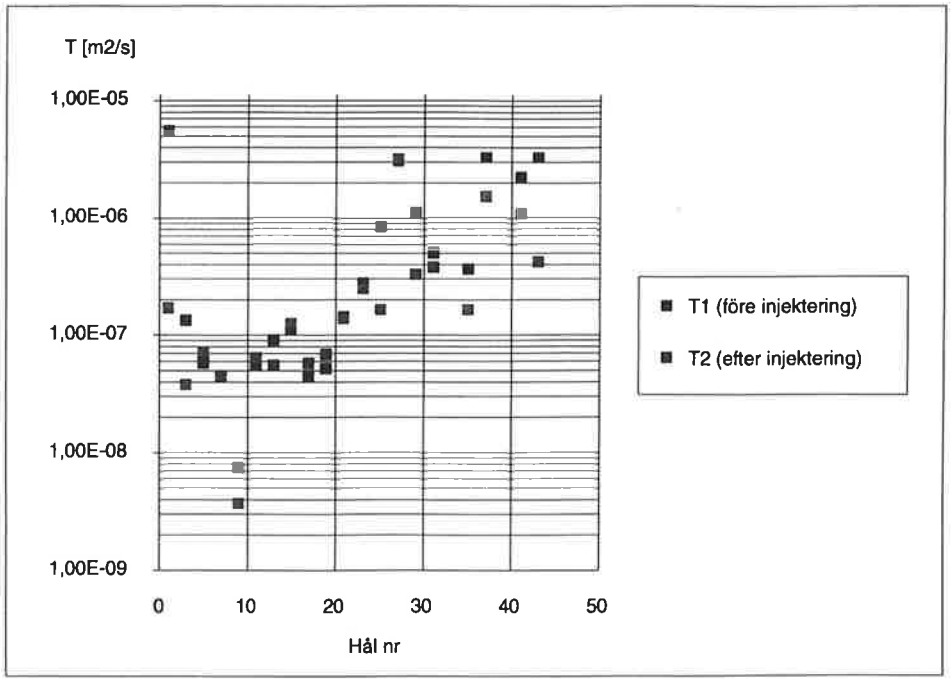
I diagrammen nedan jämförs transmissiviteten T_m erhållen med enligt Moyés metod för sparade hål, före respektive efter injektering i omgång 1.



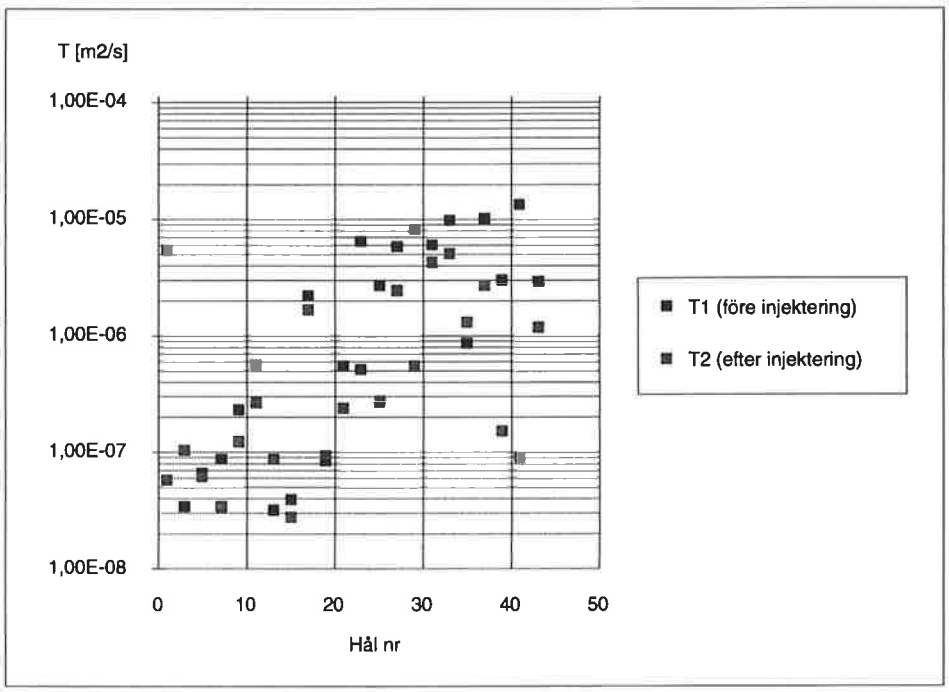
Figur 9.1 Jämförelse av transmissiviteten före resp efter injektering - skärm 20



Figur 9.2 Jämförelse av transmissiviteten före resp efter injektering - skärm 21



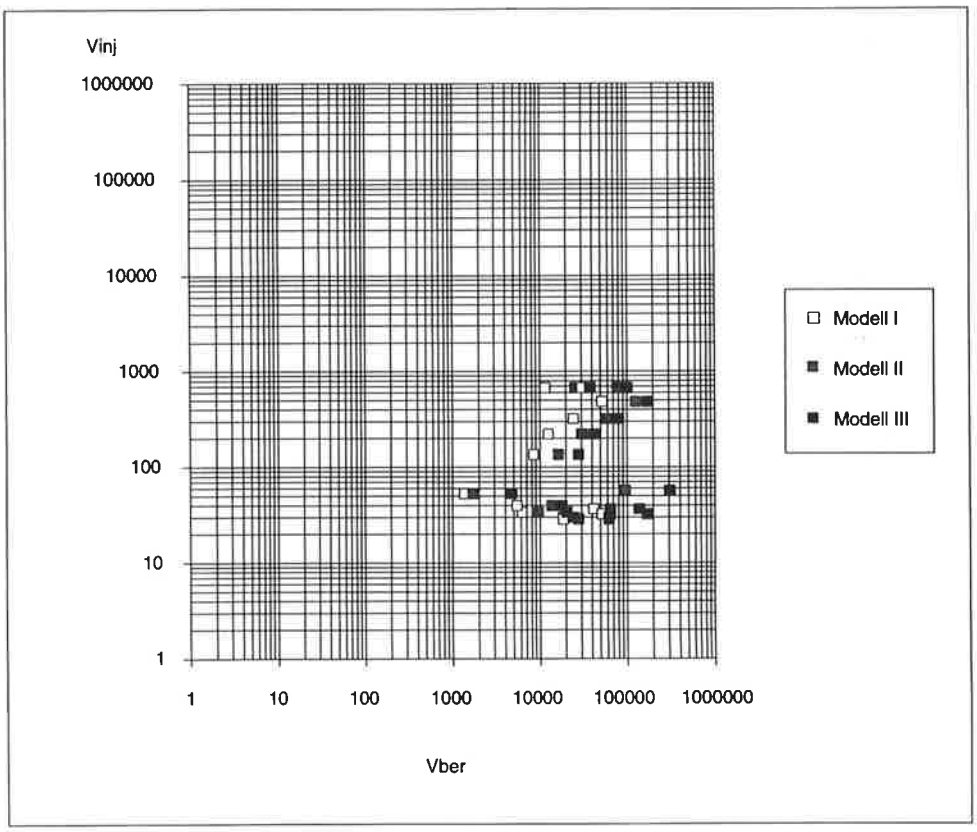
Figur 9.3 Jämförelse av transmissiviteten före resp efter injektering - skärm 23



Figur 9.4 Jämförelse av transmissiviteten före resp efter injektering - skärm 24

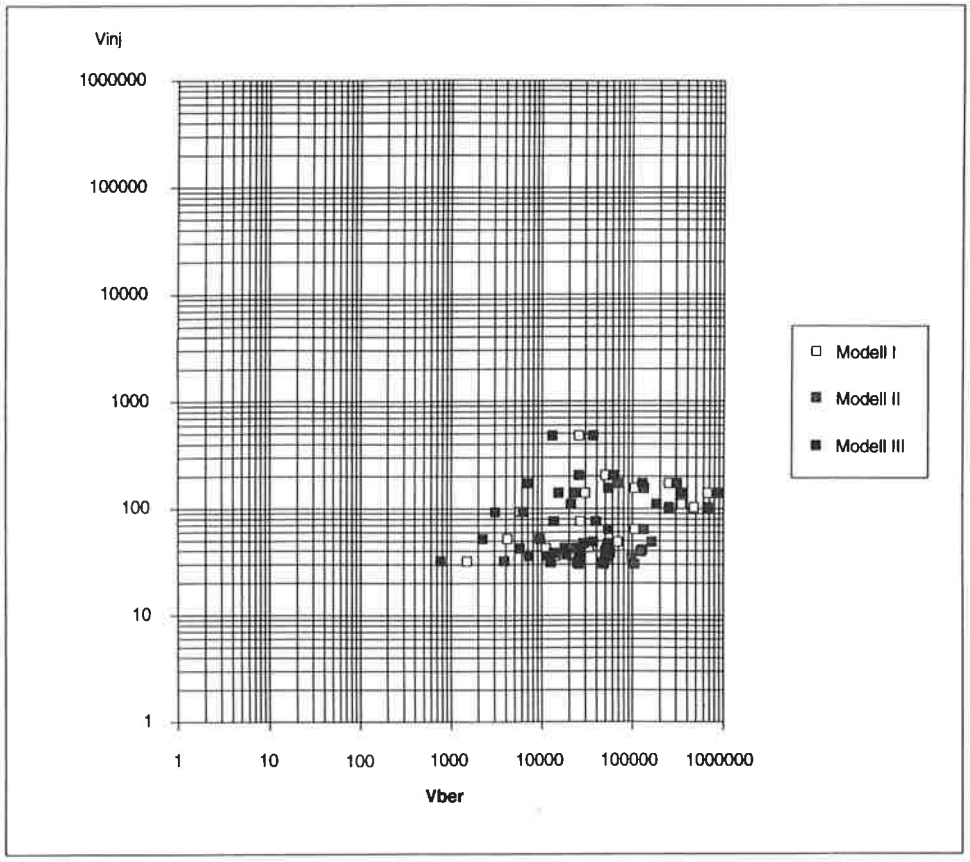
Bilaga 10 visar volymsåtgång beräknat med sprickplansmodeller I, II och III, samt verklig injekterad volym (större än 30 liter), för skärmparen 20-21 och 23-24.

Skärmar 20 o. 21 (volym i liter)	Hål nr	Vinj	Modell I Vber	Modell II Vber	Modell III Vber
Injekteringsomgång 1, SH	3	134	8560	16229	28532
Injekteringsomgång 2, SH	2	58	92052	98502	306842
-"-	10	37	40928	65668	136426
-"-	12	34	6260	9850	20865
-"-	24	52	1393	1742	4644
-"-	30	32	51160	65668	170533
-"-	32	30	19076	24352	63587
-"-	38	29	18558	27362	61860
Injekteringsomgång 2, SH	5	322	24075	60195	80251
-"-	7	223	12640	30098	42132
-"-	11	670	30094	76612	100314
-"-	13	39	5417	13681	18056
-"-	25	668	11638	25983	38793
-"-	41	493	51160	128599	170533



Figur 10.1 Jämförelse mellan sprickplansmodellerna för skärm 20 o. 21

Skärmar 23 o. 24 (volym i liter)	Hål nr	Vinj	Modell I Vber	Modell II Vber	Modell III Vber
Injekteringsomgång 1, SH	16	52	4197	9649	2176
-"-	40	154	104326	131741	54095
Injekteringsomgång 2, SH	9	32	1488	3800	771
-"-	11	38	25795	57003	13375
-"-	13	36	22193	53203	11508
-"-	15	35	50438	98806	26153
-"-	21	47	54670	53203	28348
-"-	27	109	350125	21054	181546
-"-	29	140	29727	22405	15414
-"-	37	63	105660	134433	54787
-"-	43	76	26460	40145	13720
Injekteringsomgång 1, MC	8	41	51975	128599	26950
-"-	12	48	69141	164169	35851
Injekteringsomgång 1, SH	36	40	50817	125447	26349
-"-	42	471	25602	36623	13275
-"-	28	170	54228	67650	7030
Injekteringsomgång 2, SH	5	31	24459	46515	12682
-"-	7	36	13860	25720	7187
-"-	9	30	48917	106710	25365
-"-	13	43	34217	51987	17742
-"-	15	42	11142	23531	5777
-"-	17	140	667054	902932	345880
-"-	29	94	5800	6103	3007
-"-	35	206	50196	61457	26028
-"-	37	172	249578	310222	129411
-"-	41	37	36105	49251	18721
-"-	43	102	478893	684039	248315



Figur 10.2 Jämförelse mellan sprickplansmodellerna för skärm 23 o. 24